

Laura Pyhänen

Massiivibetonin valunaikainen jäähtytys

Jäähtytysputkiston suunnittelu

Massiivibetonin valunaikainen jäähtytys

Jäähtytysputkiston suunnittelu

Laura Pyhänen
Opinnäytetyö
Kevät 2023
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma, talonrakennustekniikan suuntautumisvaihtoehto

Tekijä: Laura Pyhänen

Opinnäytetyön nimi: Massiivibetonin valunaikainen jäähdytys

Opinnäytetyön englanninkielinen nimi: Cooling methods for mass concrete

Työn ohjaajat: Leading Specialist Kimmo Ylinen ja Yliopettaja Raimo Hannila

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2023

Sivumäärä: 67

Massiivibetonirakentamisen suurimpia haasteita ovat suuresta betonimäärästä johtuva korkea hydrataatiolämpö ja sen aiheuttamat ongelmat rakenteessa. Korkea lämpötila aiheuttaa lämpölaajenemista aineessa. Betonirakenteissa keskiosan lämpötila pysyy pidempään korkeana pintaosien jäähtyessä. Tästä johtuen rakenteeseen syntyy lämpöjännityksiä. Lämpöjännityksen ylittäessä betonin vetolujuuden syntyy rakenteeseen halkeamia.

Tässä opinnäytetyössä käsiteltiin lämmönkehityksen aiheuttamia haasteita massiivibetonirakenteiden suunnittelun kannalta. Työssä pyrittiin huomioimaan teollisuuden rakennuskohteissa haasteeksi muodostuvan betonin korkea lämpötila ja suuret lämpötilaerot rakenteen eri osien välillä.

Opinnäytetyössä esitettiin keinoja hallita betonin lämmönkehitystä betonireseptiin ja betonin ainesosiin vaikuttamalla. Lisäksi tässä opinnäytetyössä pyrittiin esittämään yksinkertainen suunnitteluohje massiiviseen betonirakenteeseen asennettavalle jäähdytysputkistolle. Työssä laskettiin käytännön esimerkillä jäähdytysputkiston suunnittelu.

Lähteinä käytettiin tieteellisiä tutkimuksia ja artikkeleja sekä standardeja. Lisäksi työssä esiteltiin muutama laskentaohjelma, joilla betonin lämmönkehitystä voidaan arvioida. Esimerkkitapauksessa esiteltiin putkistojäähdytyksen suunnittelu teoriaosuuteen perustuen.

Tuloksena saatiin selkeä vastaus putkistojäähdytyksen tehokkuudesta sekä betonin koostumuksen vallinnan tärkeydestä. Työssä havaittiin teoreettisen laskennan avulla betonin maksimilämmön huomattava aleneminen suunnitellun jäähdytysputkiston avulla. Valmista työtä voidaan käyttää ohjenuorana massiivisiin betonirakenteisiin sopivaa betonia valittaessa sekä massiivista valua suunniteltaessa.

Asiasanat: hydrataatiolämpö, massiivinen betonirakenne, lämmönkehitys, halkeilu, jäähdytysputkisto

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Civil Engineering, Option of House Building Engineering

Author: Laura Pyhänen

Title of thesis: Cooling Methods for Mass Concrete

Supervisors: Leading Specialist Kimmo Ylinen and Senior Lecturer Raimo Hannila

Spring 2023

Number of pages: 67

Heat development in mass concrete structures is one of the greatest challenges in concrete design. The amount of concrete is proportional to the amount of heat emitted due to the hydration process of cement. Mass concrete structures are prone to cracking due to their high thermal stresses. When the thermal stress exceeds the tensile strength of concrete, cracks will form.

This thesis deals with the challenges caused by heat development in mass concrete. Multiple possibilities for lowering the maximum temperature in hardening concrete were presented throughout the thesis. In addition, a simple design guide for a pipe cooling system was created.

This thesis serves as a guideline for control of the hydration heat before/and after casting. The case study presented at the end uses the theory explained in the thesis. Scientific studies and articles as well as standards were used as sources.

The result was a clear response to the efficiency of pipe cooling system and the importance of selecting the right concrete composition. This thesis can be used as a guide for the selection of concrete suitable for mass concrete structures, as well as for the planning of the casting process.

Keywords: Hydration process, mass concrete structure, heat generation, cracking, pipe cooling system

SISÄLLYS

LYHENTEET JA MERKINNÄT	7
1 BETONIN KOOSTUMUS JA OMINAISUUDET	10
1.1 Sementti	10
1.2 Kiviaines	14
1.3 Seosaineet	15
1.3.1 Lentotuhka	17
1.3.2 Masuunikuonajauhe	18
1.3.3 Silika	20
1.4 Lisäaineet	20
1.5 Hydrataatio	21
1.6 Hydrataatioon vaikuttavat tekijät	24
1.6.1 Sideaineen ominaisuudet	24
1.6.2 Valulämpötila	26
1.6.3 Vesi-sementtisuhte	26
1.7 Kuljetus	27
2 MASSIIVINEN TERÄSBETONI	29
2.1 Kriittiset lämpötilat	30
2.2 Korkean lämpötilan seuraukset	31
2.2.1 Halkeilu	31
2.2.2 Lujuuskato	32
2.2.3 Notkeuskato	32
2.3 Massiivisten rakenteiden valu	33
3 JÄÄHDYTYSKEINOT	35
3.1 Massan esijäähdytys	35
3.1.1 Kiviaineksen jäähdytys	35
3.1.2 Veden jäähdytys	36
3.1.3 Nestemäinen tyyppi	37
3.2 Sideaineen valinta	38

3.3	Valun jälkeinen jäädytys.....	40
3.3.1	Putkiston valinta.....	40
3.3.2	Vesikiertoinen jäädytys.....	42
3.3.3	Ilmakiertoinen jäädytys.....	43
4	PUTKISTOJÄÄHDYTYKSEN SUUNNITTELU	44
4.1	ACI-menetelmä	44
4.2	Tarvittavat lähtötiedot	44
4.3	Kaavioiden tulkinta.....	46
5	JÄÄHDYTYSPUTKISTON LASKENTA.....	51
6	YHTEENVETO	64
	LÄHTEET.....	65

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Al_2O_3	alumiinioksidi
C_2S	dikalsiumsilikaatti
C_3A	trikalsiumaluminaatti
C_3S	trikalsiumsilikaatti
C_4AF	tetrakalsiumaluminaattiferriitti
$CaCO_3$	kalkkikivi, kalsiumkarbonaatti
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	kipsi
C_c	betonin ominaislämpökapasiteetti
CH	kalsiumhydroksidi
C_i	jään ominaislämpökapasiteetti
$C-S-H$ -geeli	kalsiumsilikaattihydraatti-geeli
C_w	veden ominaislämpökapasiteetti
d	alempi seulakoko
D	ylempi seulakoko
Fe_2O_3	rautaoksidi
k	sementin sisältämän ja lisätyn masuunikuonajauheen yhteismäärä
k_s	sementin sisältämä masuunikuonajauhe
k_{S_s}	sementin sisältämien kaikkien seosaineiden summa
L	putken pituus
lt	sementin sisältämän ja lisätyn lentotuhkan yhteismäärä
l_s	sementin sisältämä lentotuhka
m_i	lisätyn jään massa
m_w	veden määrä betonireseptissä
$m_{w,c}$	betonin kokonaisvesimäärä
Q	veden virtausnopeus
s	sementin sisältämän ja lisätyn silikan yhteismäärä
S	putkiston riviväli
SiO_2	piioksidi
S_s	sementin sisältämä silika
t	jäähdytyksen pituus

$T_{c.1}$	betonin jäädyttämätön lämpötila
$T_{c.2}$	betonin lopullinen lämpötila
$T_{c.2}$	betonin loppulämpötila
$T_{c.2.1}$	betonin lämpötila putken kohdassa //m
$T_{w.1}$	veden alkulämpötila
$T_{w.1}$	veden alkulämpötila, eli putkistoon sisään virtaavan veden lämpötila
$T_{w.2}$	putkistosta poistuvan veden lämpötila
α	betonin terminen diffusiviteetti
Δt	ajan muutos
ΔT_w	veden lämpötilanmuutos
λ	betonin lämmönjohtavuus
ρ	betonin tiheys
θ_m	betonin lopullisen keskilämpötilan ja veden alkulämpötilan erotus
θ_o	betonin alkulämpötilan ja veden alkulämpötilan erotus
θ_w	putkistoon virtaavan ja sieltä poistuvan veden lämpötilaero

JOHDANTO

Betoni on yleisin käytetty rakennusmateriaali. Sen edullinen hinta, muokattavuus, hyvä saatavuus sekä erinomaiset palon- ja kosteudenkesto tekevät siitä houkuttelevan valinnan erilaisiin projekteihin. Yksi betonin käyttökohde ovat massiiviset betonirakenteet, kuten padot, sillat ja perustukset. Massiivinen koko tuottaa ongelmia sementin ja veden hydrataatioreaktiosta syntyvän lämmön takia. Hydrataatiolämmön lisäksi haasteita tuottavat äärimäiset sääolosuhteet valun aikana, kuten kova tuuli sekä kuuma tai kylmä ilma. Useat betonin ominaisuudet, kuten sen lujuus ja kestävyys, kärsivät lämmön noustessa, jolloin rakenteesta voi tulla käyttökelvoton suunniteltuun kohteeseen.

Opinnäytetyössä perehdytään keinoihin, joilla betonin lämpötilaa voidaan hallita. Lisäksi esitellään pääpiirteittäin liian korkean lämpötilan aiheuttamat vauriot betonirakenteeseen. Työssä esitellään yksinkertaisia keinoja lämpötilan hallintaan ja jäähdytysjärjestelmän määrittämiseen. Lisäksi alussa kuvataan keinoja, joilla betonimassan lämpötilan nousua on mahdollista hillitä ennen valua sekä joitain työmaateknisiä mahdollisuuksia lämpötilan hallitsemiseksi. Lopuksi keskitytään ennen valua asennettavaan jäähdytysputkistoon.

Työ rajataan koskemaan lämpimissä olosuhteissa tapahtuvia massiivirakenteiden valuja, joissa käytetään teollisuusrakenteille tyypillisiä betonin lujuusluokkia C25/30 ... C35/45. Työssä esitetään putkisto-jäähdytysjärjestelmän suunnittelu ACI-raportissa 207.1R-96 esitettyä menetelmää hyödyntäen. Menetelmä on muutettu SI-järjestelmään.

1 BETONIN KOOSTUMUS JA OMINAISUUDET

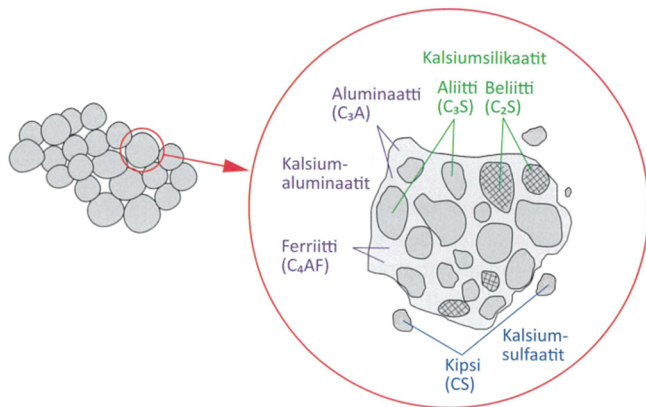
Betoni valmistetaan sementistä, vedestä ja kiviaineksesta. Näiden lisäksi betoniseokseen voidaan lisätä erilaisia lisä- ja seosaineita betonin ominaisuuksien parantamiseksi. Eri osa-aineiden suhteita muuntelemalla vaikutetaan betonin työstettävyyteen, tiiveyteen, lujuuteen sekä valmiin rakenteen säilyvyysominaisuuksiin. (1, s.13)

Luvuissa 2.1–2.7 kerrotaan betonin koostumuksesta ja ominaisuuksista. Luvuissa perehdytään eri seosaineisiin ja niiden vaikutukseen betonin lämmönkehitykseen. Luvussa 2.5 kerrotaan betonin ja veden reaktiosta ja loppu luvussa käsitellään betonin kuljetusta ja siihen liittyviä huomioita.

1.1 Sementti

Sementti on hienojakoista epäorgaanista jauhetta. Se koostuu kalkkikivestä (kalsiumkarbonaatti CaCO_3), piidioksidista (SiO_2 , sementtikemian lyhenne S), rautaoksidista (Fe_2O_3 , lyhenne F) ja alumiinioksidista (Al_2O_3 , lyhenne A). Raaka-aineet jauhetaan sopivassa suhteessa, minkä jälkeen raakajauhe esilämmittetään. Tämän jälkeen jauhe poltetaan kiertouunissa, jossa kalkki- pii-, alumiini- ja rautayhdisteet reagoivat kalsiumyhdisteiksi. Klinkkeriä syntyy, kun jauheen lämpötila kohoaa $1\ 450^\circ\text{C}$:seen, jolloin jauhe sulaa osittain ja klinkkerimineraalit pääsevät muodostumaan. (1, s.25.)

Klinkkeri koostuu pääosin aliitista, beliitistä, aluminaatista ja ferriitistä. Kalsiumsilikaattien (aliitti ja beliitti), kalsiumaluminaattien (aluminaatti ja ferriitti) sekä kalsiumsulfaattien (kipsi) yhdessä muodostava jauhe reagoi veden sekä mahdollisten sideaineiden kanssa muodostaen sementtipastaa. Kuvassa 1 on esitetty sementtiklinkkerin koostumus tarkemmin. Klinkkeriin lisätään kalsiumsulfaattia, eli kipsiä, jotta sementin sitoutumisaikaa voidaan kontrolloida. Lopullisessa sementissä on jauhettu klinkkeriä, kipsiä ja seosaineita halutun sementtilaadun aikaansaamiseksi. (1, s.25.) Seosaineita käsitellään luvussa 2.3.



KUVA 1. Sementtiklinkkerin koostumus (1, s.26)

Sementin kemiallista koostumusta muokkaamalla voidaan vaikuttaa betonin lämmön- ja lujuudenkehitykseen, betonin säilyvyyteen sekä sen työstettävyyteen. Suomalaisiin olosuhteisiin sopivia sementtikoostumuksia on Betoninormien by65 mukaan viisi.

- CEM I Portlandsementti
- CEM II Portlandseossementti
- CEM III Masuunikuonasementti
- CEM IV Pozzolaaniseimentti
- CEM V Seossementti. (1, s.29.)

Päälajit jaetaan edelleen eri sementtilajeihin niiden seosaineiden ja seosainemäärien perusteella. Standardi SFS-EN 197-1 tuntee seuraavat seosaineet:

- masuunikuona (S)
- kalkkikivi (L tai LL)
- silika (D)
- pozzolaanit (P tai Q)
- lentotuhka (V tai W)
- poltettu liuske (T). (1, s.29.)

Taulukossa 1 esitetään Suomessa sallittujen sementtien koostumukset. Sementit on merkitty taulukon niiden sementtilaji- ja seosainetunnuksen mukaan.

TAULUKKO 1. Suomalaisen sementtien koostumukset (1, s.30)

Sementtilaji	Koostumusvaatimukset / %					
	klinkkeri	kuona	silika	lentotuhka	kalkkikivi	muut
CEM I	95...100	-	-	-	-	0...5
CEM II/A-S	80...94	6...20	-	-	-	0...5
CEM II/B-S	65...79	21...35	-	-	-	0...5
CEM II/A-D	90...94	-	6...10	-	-	0...5
CEM II/A-V	80...94	-	-	6...20	-	0...5
CEM II/B-V	65...79	-	-	21...35	-	0...5
CEM II/A-LL	80...94	-	-	-	6...20	0...5
CEM II/A-M	80...88	12...20				0...5
CEM II/B-M	65...79	21...35				0...5
CEM III/A	35...64	36...65	-	-	-	0...5
CEM III/B	20...34	66...80	-	-	-	0...5

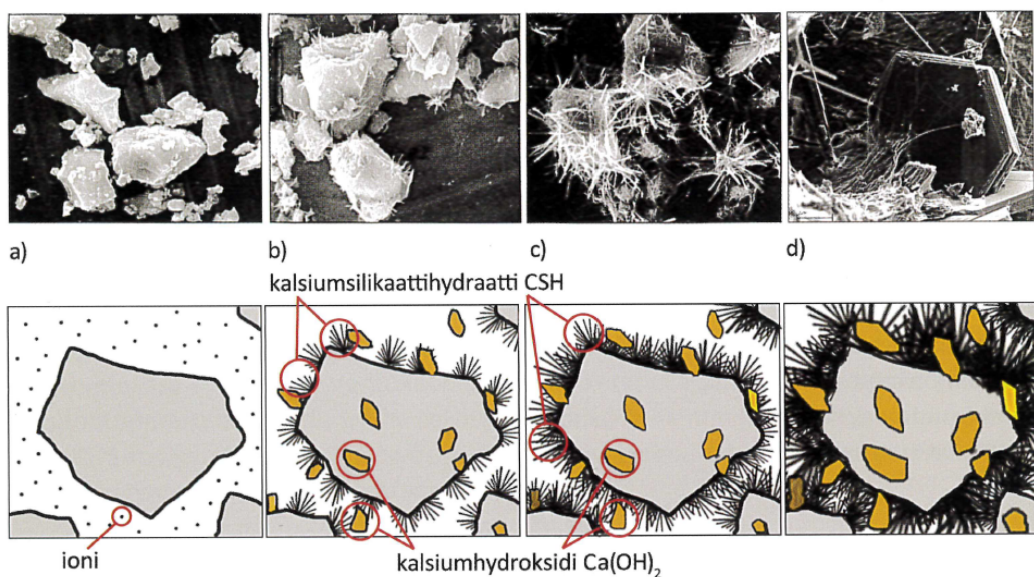
Sementit jaetaan kolmeen standardilujuusluokkaan: 32,5, 42,5 ja 52,5. Luvut viittaavat sementin puristuslujuuteen 28 vuorokauden iässä (N/mm²). Lujuusluokat jaetaan vielä kahteen varhaislujuusluokkaan: normaali varhaislujuus (N) ja korkea varhaislujuus (R). Taulukossa 2 on esitetty sementeille asetetut lujuusvaatimukset.

TAULUKKO 2. Sementtien varhais- ja standardilujuus vaatimukset (1, s.30)

Lujuusluokka	Puristuslujuus / MPa			
	Varhaislujuus		Standardilujuus	
	2 vrk	7 vrk	28 vrk	
32,5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5 R	≥ 10,0	-		
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5 R	≥ 20,0	-		
52,5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-
52,5 R	≥ 30,0	-		

Sementin ja veden reaktiosta syntyy sementtipastaa, jota kutsutaan myös sementtiliimaksi. Sementtipasta liittää yhteen betonin muut ainesosat. Veden ja sementin reaktiota kutsutaan nimellä hydrataatio. Hydrataatiota käsitellään tarkemmin luvussa 2.5. Sementtahiukkasista syntyy sauvamaisia ja levymäisiä kiteitä ja näistä edelleen massaa, sementtigeeliä. (1, s.35.) Sementtigeelin synty, sitoutuminen ja kovettuminen on kuvattu vaiheittain kuvassa 2. Hydrataation seurauksena sementtipasta kovettuu sementtikiveksi, joka säilyttää lujuutensa myös vedessä.

Sementin ja veden sekoituksen jälkeen sementtahiukkasten pinnasta liukenee veteen kalsiumia, silikaattia, alumiinia sekä alkalimetalleja (kuva 2, a). Tämän jälkeen hydrataatiotuotteita, kuten kalsiumsilikaatti-hydraatti-geeliä (C-S-H-geeliä), alkaa muodostua sementtirakeiden pintaan ja edelleen rakeiden pinnalta vesitilaan (kuva 2, b). Sitoutuminen alkaa, kun reaktiotuotteet ovat laajentuneet toisiinsa kiinni muutamassa tunnissa (kuva 2, c). Hydrataation täydelliseen tapahtumiseen kuluu niin kauan aikaa, kunnes kaikki vapaa vesi ja reagoimaton sementti ovat reagoineet. Kuvassa 2 d) on kuvattu sementin ja veden reaktio muutaman vuorokauden ikäisenä. (1, s.36.) Täydelliseen reaktioon kuluu vuosia. (2, s.8.)



KUVA 2. Sementin sitoutumisen ja kovettumisen eri asteita valo- ja kaavakuvin esitettynä (1, s.36.)

Veden tulee olla puhdasta, eikä se saa sisältää humusta tai sokeria, vaahdota tai sisältää paljon levää tai muita pieneliöitä. Vesijohtovesi sekä luonnosta otettu, juomakelpoinen vesi, ovat yleensä sopivia betonin valmistusta varten. Betoniteollisuuden prosesseissa käytettyä vettä voidaan myös kierrättää betonin valmistukseen, kunhan sen soveltuvuus on varmistettu. Veden sisältämälle kloridipitoisuudelle on asetettu reunaehdot. (1, s.59.)

Kovettuakseen sementti tarvitsee vettä vähintään 40 % sementin painosta. Teoreettisesti jo 20 – 25 % riittäisi koko sementin hydrataatioon, mutta vettä sitoutuu sementtiin syntyviin C-S-H-geelihiukoksiin noin 20 %, jolloin lopullisen vesimäärän tarve on suurempi. Vesi-sementtisuhte vaikuttaa sementtipastan hydrataation etenemiseen ja hydrataatiotuotteen ominaisuuksiin. (3, s.6.)

1.2 Kiviaines

Betoniseoksessa käytettävällä kiviaineksella on merkittävä vaikutus betonin ominaisuuksiin. Betonimasasta n. 65–80 % on kiviainesta, joka koostuu hiekasta, kalliomurskeesta ja sorasta. Kiviaineksena voidaan käyttää luonnon kiviainesta, keinokiviainesta, uusiokiviainesta tai kierrätyskiviainesta. Kiviaines, eli runkoaines luokitellaan rakeisuutensa perusteella filleriksi, hienoksi kiviaineeksi, luonnon lajittamaksi, koostekiviaineeksi sekä karkeaksi kiviaineeksi. Raekoko määritellään seulomalla kiviaines standardin

SFS-EN 933-1 mukaisesti. Kiviaines nimetään raekoon perusteella d/D merkinnällä, missä d on alempi seulakoko ja D ylempi seulakoko. Kiviaineksen luokittelu on esitetty taulukossa 3. (1, s.44.)

Kiviaineksen raemuoto vaikuttaa betonin erottuvuuteen ja tiheyteen. Pyöreät ja sileät kivet mahdollistavat massan hyvän muokattavuuden sekä tarvitsevat vähiten sementtiliimaa. (1, s.48.)

TAULUKKO 3. Kiviainestuotteiden luokittelu raekoon mukaan (1, s.45)

Kiviainestuotteiden jaottelu	Raekoot D / mm
Fillerikiviaines	$<0,063$
Hieno kiviaines	$0/1, 0/2$ tai $0/4$
Luonnon lajittama $0/8$	$0/8$
Koostekiviaines (sora- tai kalliomurske)	$0/5, 0/6$ tai $0/8$
Karkea kiviaines	d/D ($d < D, d \geq 2; D \geq 4$)

1.3 Seosaineet

Seosaineilla pyritään parantamaan betonin ominaisuuksia, kuten sulfaatinkestävyyttä, koossapysyvyyttä, vesitiiveyttä ja hydrataatiolämmön hallitsemista. Seosaineet ovat epäorgaanisia, mineraalisia aineita, jotka jaetaan kahteen seosainetyyppiin. Tyyppi I sisältää seosaineet, jotka ovat lähes reagoimattomia betonin muiden osa-aineiden kanssa eikä niitä käsitellä tässä työssä. Tyyppi II sisältää seosaineet, jotka reagoivat kahdella eri tavalla betonin kanssa. Reaktiot tapahtuvat pozzolaanisesti, eli sementin hydrataatiossa muodostuvan kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen C-S-H-geeliä tai ne ovat piilevästi hydraulisia, eli niiden hydrauliset ominaisuudet alkavat vasta niiden reagoidessa veden ja sementin reaktiossa syntyvän kalsiumhydroksidin kanssa. (4, s.15.)

Tärkeimmät tyypin II seosaineet tämän työn kannalta ovat lentotuhka, silika sekä jauhettu granuloitu masuunikuona. Näistä pozzolaanisia aineita ovat lentotuhka ja silika, kun taas masuunikuonalla on piilevä hydraulinen ominaisuus. (4, s.15.)

Seosaineiden liiallisella käytöllä on myös epäsuotuisia ominaisuuksia. Tämän vuoksi niiden käyttöä on rajoitettu. Esimerkiksi masuunikuona lisää jonkin verran betonin virumaa ja karbonatisoitumisnopeutta, kun taas silika lisää betonin vedentarvetta ja näin ollen seokseen on aina lisättävä notkistavia lisäaineita (1, s.58). Kaiken kaikkiaan seosaineet vähentävät kalsiumhydroksidin (CH) osuutta kovettuneessa betonissa, mikä johtaa karbonatisoitumisen nopeutumiseen (5, s.14). Seosaineiden enimmäismäärät riippuvat sementin seosainemäärästä sekä valettavan betonirakenteen rasitusluokasta. (1, s.58.) Seosaineiden suurimmat sallitut määrät on esitetty taulukossa 4.

TAULUKKO 4. Betonin valmistuksessa käytettävien seosaineiden suurimmat sallitut määrät eri rasitusluokissa lasketaan seuraavasti (1, s.58)

Rasitusluokka	Suurin sallittu seosainelisäys / %		
	Masuunikuona	Lentotuhka	Silika
X0 XC1	$\frac{(100 - k_{S_s} - 0,053k_s) - 1,0l_t - 9,0s}{0,053}$	$\frac{(100 - k_{S_s} - 1,0l_t) - 0,053k - 9,0s}{1,0}$	$\frac{(100 - k_{S_s} - 9,0s_s) - 0,053k - 1,0l_t}{9,0}$
XC2, XC3 XC4 XS1, XS2 XD1, XD2 XF1, XF3 XA1	$\frac{(100 - k_{S_s} - 0,025k_s) - 2,22l_t - 9,0s}{0,25}$	$\frac{(100 - k_{S_s} - 2,22l_t) - 0,25k - 9,0s}{2,22}$	$\frac{(100 - k_{S_s} - 9,0s_s) - 0,25k - 2,22l_t}{9,0}$
XS3 XD3	$\frac{(100 - k_{S_s} - 0,25k_s) - 2,22l_t - 9,0s}{0,25}$	$\frac{(100 - k_{S_s} - 3,33l_t) - 0,25k - 9,0s}{3,33}$	$\frac{(100 - k_{S_s} - 9,0s_s) - 0,25k - 2,22l_t}{9,0}$
XF2, XF4	InfraRYL 2006 <i>Sillan betonirakenteet</i> kohdan 42020.1 mukaan.		
missä: k_{S_s} on sementin sisältämien kaikkien seosaineiden summa (%) k_s on sementin sisältämä masuunikuonajauhe (%) l_t on sementin sisältämä lentotuhka (%) s_s on sementin sisältämä silika (%) k on sementin sisältämän ja lisätyn masuunikuonajauheen yhteismäärä (%) l_t on sementin sisältämän ja lisätyn lentotuhkan yhteismäärä (%) s on sementin sisältämän ja lisätyn silikan yhteismäärä (%) Kaikki annostusprosentit lasketaan alkuperäisestä sementistä			

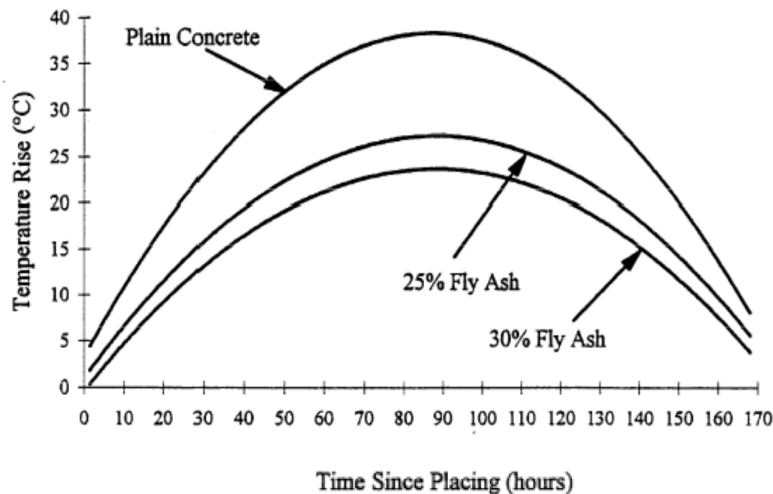
1.3.1 Lentotuhka

Lentotuhkaa muodostuu orgaanisen polttoaineen, kuten kivihiilen poltossa voimalaitoksissa. Palamatta jäänyt polttojäätännöksen tuhka jakaantuu painavampaan pohjatuhkaan ja kevyempiin lentotuhkahiukkasiin. Lentotuhka siirretään paineilman avulla varastosiiiloihin. Lentotuhka partikkelit ovat pääasiassa pyöreitä, lasimaisia partikkeleja, jotka notkistavat betonia. (6, s.3.)

Lentotuhkaa käytetään taloudellisista, teknillisistä ja ekologisista syistä betonin seosaineena. Jokaista tonnia kohden lentotuhkaa voidaan sementtiä vähentää 400 kg. Lentotuhkalla voidaan myös korvata hienoimpien kiviainesten määrää seoksessa, sillä sen raekoko on 1–150 µm:n suuruusluokkaa (1, s.56). Suurin osa lentotuhkasta on piioksidia joka reagoi portlandsementin hydrataatioreaktion aikana muodostuvan kalsiumhydroksidin kanssa. Piioksidi on fysikaaliseltaan rakenteeltaan lasimainen, mikä mahdollistaa erinomaiset ominaisuudet yhdessä veden ja CH:n kanssa C-S-H geelin muodostumiselle. Perustuen lentotuhkan raejakaumaan sekä sen pallomaisiin hiukkasiin käytetään sitä parantamaan betonin notkeutta ja koossapysyvyyttä. (6, s.4.)

Lentotuhkan sisältämän hehkutushäviön määrä jakaa lentotuhkan luokkiin A, B tai C standardin SFS - EN 450-1 mukaan. Standardi on määritellyt eri luokkiin kuuluvien lentotuhkan sisältämän hehkutushäviön määrät siten, että luokassa A palamattoman hiilen määrä saa olla maksimissaan 5,0 painoprosenttia, luokassa B maksimissaan 7,0 painoprosenttia sekä luokassa C maksimissaan 9,0 painoprosenttia. (7, s.8.)

Sementin korvaus lentotuhkalla pienentää hydratoitumislämpöä. Korvaamalla 30 % kokonaissementtimäärästä voidaan betonirakenteen sisäistä lämpötilaa pienentää n. 15 °C. Kuvassa 3 on kuvattu betonin lämpötilankehitys valun jälkeen betoneille, joissa sideaineesta 0 %, 25 % ja 30 % on korvattu lentotuhkalla. (8, s.14.)



KUVA 3. Muutokset betonin lämpötilaan, kun sementistä korvataan 25 % tai 30 % lentotuhkalla (8, s.14)

Betonin varhaisiässä kemiallisen kestävyden kannalta lentotuhka toimii passiivisena osa-aineena. Jos betonissa on tarpeeksi kosteutta, tuottaa lentotuhka myöhemmin pysyviä kovettumistuotteita kalsiumhydroksidia kuluttaen. Tästä johtuen betonin tiiviys ja kemiallinen kestävyys lisääntyvät. (9.)

Betonin karbonatisoituminen saattaa nopeutua kalsiumhydroksidin määrän vähentyessä, jolloin huokosveden emäksisyys laskee. Koska lentotuhkan reaktionopeus on sementtiä hitaampaa, pienentää sen käyttö betonin alkulujuuksia, mutta parantaa lopullista puristuslujuutta. (9.)

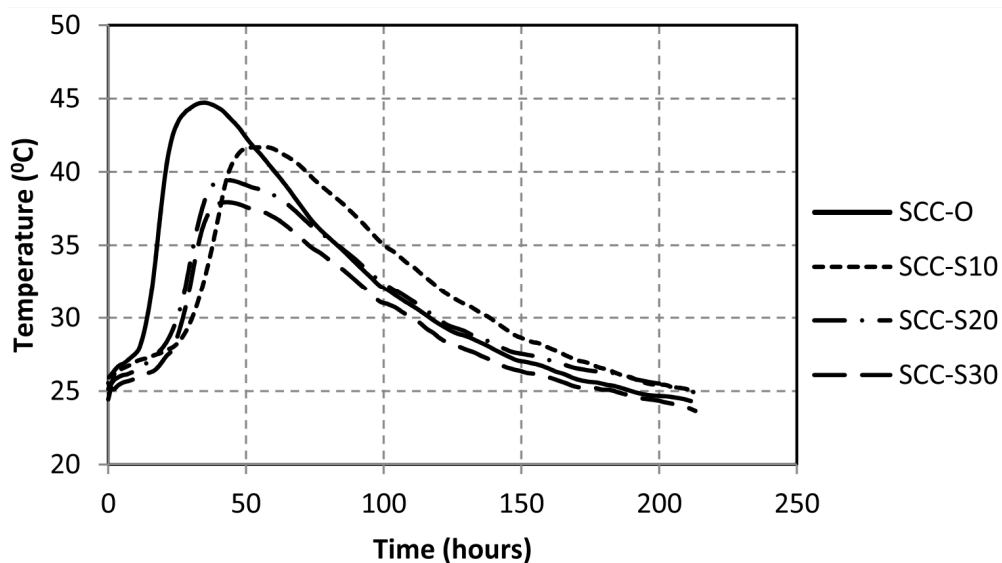
1.3.2 Masuunikuonajauhe

Raakaraudan valmistuksen yhteydessä muodostuu masuunikuonaa. Prosessia säädellään lisäämällä masuuniuuniin kalkkia. Masuunikuona muodostuu pääasiassa kalsiumin, piin, alumiinin sekä magnesiumin yhdisteistä. Nämä pääyhdisteiden muodostavat n. 90 % masuunikuonasta. Loput masuunikuonasta on rauta-, mangaani-, alkalimetalli- ja titaaniyhdisteitä sekä rikkiä. (6, s. 14.)

Betoniin käytettävä masuunikuona on yleensä hienoksi jauhettua, lasimaisen olemuksen omaavaa granuloitua masuunikuonaa. Kuonasula on jäädytetty nopeasti korkeapaineisten vesisuihkujen avulla. Tällöin kuonasulasta muodostuu rakeinen tuote, jonka lasimaisuus on korkea. Näin valmistetulla masuunikuonajauheella on ns. piilevät hydrauliset ominaisuudet. Se muuttuu hydrauliseksi portlandsementin ja veden reaktiosta vapautuneen kalsiumhydroksidin avulla, muttei kuluta sitä pozzolaanisten seosaineiden tavoin. Masuunikuona ei myöskään tuota kalsiumhydroksidia. Portlandsementti yhdessä masuunikuonan

kanssa muodostaa sideaineseoksen, jossa molempien osa-aineiden kovettuessa seoksen lujuus kehittyy. Sementtikiven huokosrakenne pienenee, kun masuunikuonaa käytetään betonin sideaineena. Betonin kokonaishuokoisuus ei kuitenkaan pienene masuunikuonajauheen käytöstä (6, s. 14). Masuunikuonan yleinen soveltuvuus on osoitettu standardissa SFS - EN 15167-1 (4, s. 15).

Massiivisten, lämpimissä olosuhteissa sijaitsevien betonirakenteiden kannalta masuunikuona on tärkein seosaine, sillä sen käyttö pienentää betonin hydratoitumislämpöä huomattavasti, kunhan sideaineen kokonaismäärä pysyy vakiona (6, s. 16). Hydrataatiolämmön aleneminen perustuu sideaineen korvaamiseen masuunikuonalla, jolloin nopeasti reagoivien C_3A ja C_3S klinkkerien määrä seoksessa vähenee. Masuunikuonalla itselläänkin on hydrataatiolämpöä alentava vaikutus, mutta vaikutus ei ole niin suuri, kuin sideaineen vähentämisellä (10, s. 26). Masuunikuonan käyttö betonin sideaineena aiheuttaa alkulujuuden merkittävää alenemista, sillä hydrataatiolämmön laskiessa betonin lujuudenkehitys hidastuu (6, s. 16). Kuvassa 4 on osoitettu hydrataatiolämmön aleneminen, kun betoniseoksessa sideaineen määrästä on korvattu masuunikuonalla 0 %, 10 %, 20 % ja 30 %. Kuvasta käy ilmi, että 30 %:n muutos sementistä masuunikuonaan pudottaa hydrataatiolämpöä noin 15 % (11, s. 293).



KUVA 4. Lämpötilan nousu betonissa eri masuunikuonapitoisuuksilla (11, s. 293)

1.3.3 Silika

Silika on ferropiin ja piin valmistuksen yhteydessä syntyvä tuote. Poistokaasuista suodattamalla saatu silika sisältää 90 % piioksidia (SiO_2) ja on hienojakoinen, lasimainen pozzolaani. Silikan kemiallinen koostumus riippuu siitä, millaista piirautaseosta tuotetaan. Standardissa SFS- EN 13263- 1 on osoitettu silikan yleinen soveltuvuus ja vaatimukset. (1, s. 57.)

Silika on erittäin hienojakoista. Sen raekoko on luokkaa 0,1 μm , ja sen ominaispinta-ala on n. 50 kertaa suurempi, kuin sementin ja lentotuhkan (6, s. 27). Tämän vuoksi silika lisää betonin vedentarvetta ja sen kanssa on tarpeen käyttää vedentarvetta vähentäviä lisäaineita. (1, s. 57.)

Silikan käytön vaikutus betonirakenteen hydratoitumislämpöön on lievästi pienentävä, kun sementtiä korvataan silikalla niin, että 28 d:n lujuus päättyy samaksi. Betonin lujuutta, kemiallista kestävyyttä, koossapysyvyyttä, tiiveyttä ja vedenpitävyyttä voidaan parantaa silikan käytöllä huomattavasti. Fysikaalinen ja kemiallinen kestävyys perustuu piioksidin ja kalsiumhydraatin reaktioon muodostaen C-S-H-geeliä. Lujuutta on mahdollista parantaa 15–25 %, kun vesi-sideainesuhde on alle 0,5 ja sementistä 5–8 % on korvattu silikalla. (6, s. 28.)

1.4 Lisäaineet

Betonissa voidaan käyttää lisäaineita taloudellisista tai teknisistä syistä. Lisäaineiden käytöllä pyritään vaikuttamaan betonimassan tai kovettuneen betonin ominaisuuksiin joko fysikaalisesti tai kemiallisesti. Lisäaineiden maksimimäärä on sidottu sementin määrään ja raja-arvona käytetään 50 g lisäainetta/kg sementtiä. Lisäaine standardi SFS-EN 934 luokittelee CE-merkityt lisäaineet eri vaikutuksien mukaan. (1, s. 60.)

Jotta betonia olisi helpompi työstää ilman, että betoniseokseen on lisättävä vettä, käytetään notkistavia lisäaineita. Ne erottavat sementtipartikkelit toisistaan ja betonin juoksevuus paranee. Koska betonia on helpompi työstää, saadaan siitä tiiviimpää, mikä yleisesti helpottaa suunnitellun puristuslujuuden saavuttamista. Notkistavat lisäaineet ovat tarpeen yleensä betoneissa, joissa on matala vesi-sementtisuhte. (1, s. 62.)

Huokostimet kasvattavat betonin ilmamäärää, jolloin sen lujuus heikkenee. Tällainen betoni on kuitenkin pakkasen- ja säänkestävää. Huokostin pienentää betoniveden pintajännitystä ja synnyttää ilmahuokosia, eli ns. suojahuokosia betoniin. (1, s. 63.)

Betonin sitoutumisnopeutta, sen alkua ja kovettumisen nopeutta voidaan säännellä lisäämällä betoniin hidastavia tai kiihdyttäviä lisäaineita. Hidastimet ovat hyödyksi, kun betoni pitää kuljettaa pitkän matkan päästä työmaalle tai valun valmistuminen vie pitkään ja halutaan säilyttää betonin työstettävyys. Pitkäkestoisten valujen betonin tiivistys on mahdollista, kun betonin sitoutuminen ei ole ehtinyt alkaa liian aikaisin. Kiihdyttäviä lisäaineita käytetään puolestaan silloin, kun on tarpeen saavuttaa muotipurku- tai jäätymislajuus nopeasti. (1, s. 64.)

Kutistumista vähentävät lisäaineet auttavat kuivumiskutistumasta aiheutuvien voimien vähentämisessä. Kuivumiskutistumaa on mahdollista vähentää jopa 25–50 %. Vaikutus perustuu veden pintajännityksen pienenemiseen kapillaarihuokosissa. (1, s. 65.)

1.5 Hydrataatio

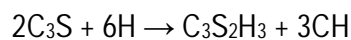
Hydrataatio on prosessi, jossa vesi reagoi vedettömän aineen kanssa muodostaen uutta hydraattia (2, s.8). Sementtikemiassa ja tässä työssä hydrataatiolla tarkoitetaan sementin tai sen osa-aineen reagoimista veden kanssa. Hydrataatioprosessissa tapahtuvat kemialliset sekä fysikaaliset muutokset sitouttavat ja lopulta kovettavat betonimassan kovaksi betonikiveksi. Jos betonissa riittää vettä, voi hydrataatioprosessi jatkua vuosien ajan. Koko vuosien pitkän hydrataatioprosessin aikana jatkuu myös betonin lujuudenkehitys (2, s.8). Sementin sitoutumisnopeus veteen riippuu paljon lämpötilasta. Karkeasti voidaan todeta 10 °C:sen lämpötilannousun pudottavan sementin sitoutumisaikaa puolella. (1, s. 37.)

Kun vesi ja sementti reagoivat keskenään reagoivat ensin klinkkerimineraalien aluminaattiyhdisteet (trikalsiumaluminaatti C_3A ja tetrakalsiumaluminaattiferriitti C_4AF). Nämä yhdisteet reagoivat nopeasti veden kanssa ja sementtipasta alkaa sitoutua. Reaktiota veden ja aluminaattiyhdisteiden välillä hidastetaan aina sementtiin lisättyä kipsillä ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), jolloin saadaan seokselle sopiva työstöaika. Aluminaattiyhdisteillä ei sinällään ole vaikutusta lopulliseen rakenteen lujuuteen, mutta ne ovat välttämättömiä sementin varhaisreaktioiden kannalta. (1, s. 35.)

Sementin lujuuteen vaikuttavat kalsiumsilikaattifaasit trikalsiumsilikaatti (C₃S) ja dikalsiumsilikaatti (C₂S). Trikalsiumsilikaatin reaktiota veden kanssa pidetään sementin kannalta tärkeimpänä, sillä reaktiotuotteenä syntynyt aliitti vaikuttaa sementtipastan sitoutumiseen sekä erityisesti betonin varhaislujuuden kehittymiseen. C₃S reagoi heti tullessaan kosketuksiin veden kanssa ja onkin merkittävä mittari hydrataation etenemisessä. (2, s. 12.)

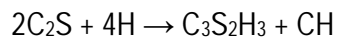
Trikalsiumsilikaatin hydrataatiota kuvaa karkeasti kaava 1.

KAAVA 1. Trikalsiumsilikaatin hydrataatio (2, s. 12.)



Dikalsiumsilikaatin hydrataatiota kuvaa karkeasti kaava 2.

KAAVA 2. Dikalsiumsilikaatin hydrataatio (2, s. 22.)



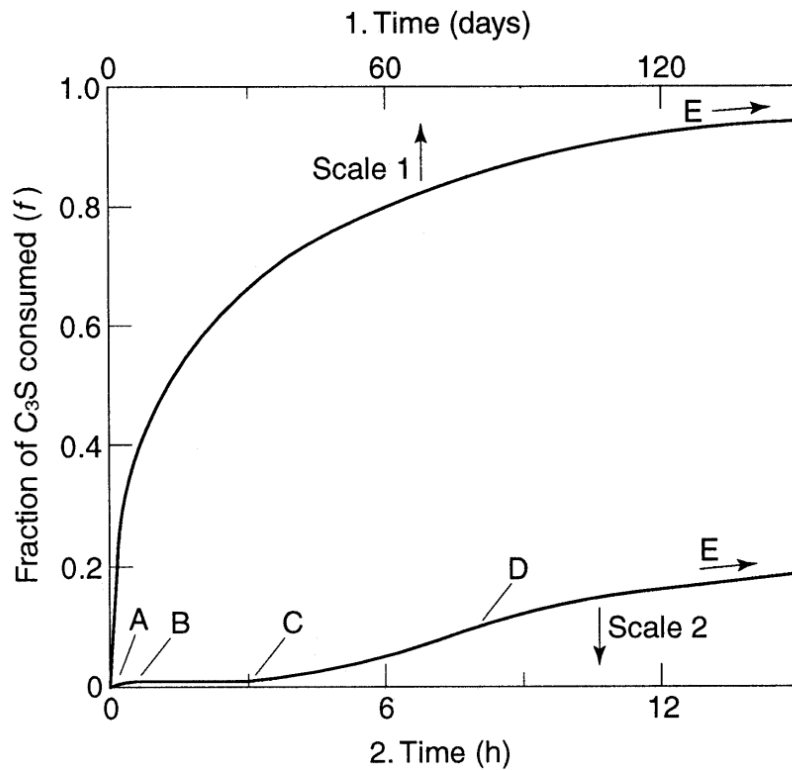
Hydrataatioreaktio voidaan jakaa 4 vaiheeseen, joita on kuvattu kuvassa 5. Reagoimattoman C₃H:n määrä on piirretty kuvaajaan ajanfunktiona. (2, s. 13.)

Vaiheessa A, eli alkuvaiheessa (alkureaktio) C₃S aiheuttaa hydrataatioreaktion välittömästi tullessaan kosketuksiin veden kanssa. Reaktio kestää tyypillisesti vain muutamia minutteja, mutta on voimakas eksotermisen reaktio. Vaiheen loputtua C₃S:sta on reagoanut < 1 %. (2, s. 13.)

Vaiheen B, eli lepovaiheen aikana reaktionopeus ja lämmöntuotto ovat maltillisia ja vaiheen kesto muutamia tunteja. Lepovaiheen aikana reagoivan materiaalin osuus ei kasva huomattavasti. Vaiheen loppuun C₃S:stä on reagoanut muutamia prosentteja. (2, s. 13.)

Trikalsiumsilikaatin pääreaktiota veden kanssa kuvaa vaihe C (kiihtyvä vaihe). Tällöin reaktionopeus kasvaa nopeasti saavuttaen maksimiarvonsa 5–10 tunnin kuluttua. Kiihtyvän vaiheen aikana lämmöntuotto nopeutuu huomattavasti ja reaktiossa muodostuu pysyviä hydrataatiotuotteita. Tässä vaiheessa myös sementtipasta sitoutuu. (2, s. 13.)

Kiihtyvän vaiheen loputtua, kun reaktionopeus on saavuttanut maksimiarvonsa, siirtyy hydrataatio hidastuvaan vaiheeseen (D). Tätä seuraa vielä loppuvaihe (E), jonka aikana C_3S kuluu loppuun. Mitä vähemmän vapaata C_3S :ää on, sitä hitaammaksi reaktionopeus laskee. Tähän voi kulua useita vuosia riippuen käytetyn C_3S :n hienoudesta. (2, s. 13.)

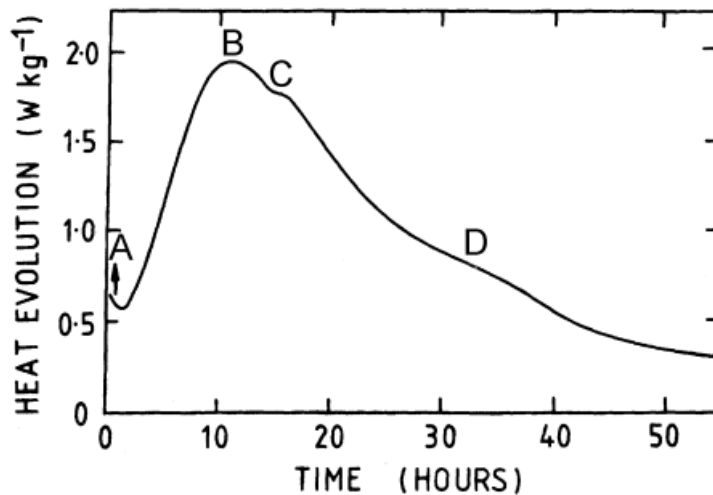


KUVA 5. Trikalsiumsilikaatin (C_3S) hydrataation eteneminen pastassa. A-B: alkuvaihe; B-C: lepovaihe; C-D: kiihtyvä vaihe; D-E: hidastuva vaihe, E ->: loppuvaihe (2, s. 14)

Hydrataatioprosessi portlandsementin ja veden välillä sisältää saman- ja eriaikaisia kemiallisia reaktioita. Portlandsementin klinkkerimineraalien reaktionopeus vaihtelee, mistä johtuen hydrataation eteneminen vaihteittain vaihtelee. (2, s. 22.)

Hydrataatioon liittyy voimakkaasti lämmönkehittyminen ja sen vapautuminen. Hydrataatioreaktiossa sementin lujuuden kehitys tapahtuu samassa suhteessa lämmönkehityksen kanssa. Eri sementtien lämmöntuotantonopeudet vaihtelevat. Hitaimmin veden kanssa reagoivat sementit omaavat pienemmät lämmöntuotanton arvot, kuin nopeasti reagoivat sementit. Massiivisissa valuissa tulee käyttää mahdollisimman hitaasti reagoivia sementtejä, rakenteen lujuusvaatimukset huomioiden. (1, s. 39.)

Trikaalsiumsilikaatin hydrataation tavoin portlandinsementin hydrataatio voidaan jakaa neljään vaiheeseen. Sementin hydrataatiossa vapautuu lämpöä ja hydrataation etenemistä voidaan kuvata kalorimetri-käyrän avulla (kuva 6). Huomioitavaa on, että kuvissa 5 ja 6 vaiheiden nimet ovat samat, mutta niiden nopeudet vaihtelevat. Kuvassa 6 vaiheet A (alkuvaihe), B (lepovaihe), C (kiihtyvä vaihe) ja D (hidastuva vaihe) kuvaavat portlandsementin reaktioita. (2, s. 28.)



KUVA 6. Portlandsementtipastan lämmöntuotonnopeus ajan funktiona (20 °C, isoterminen kalorimetria) (2, s. 28)

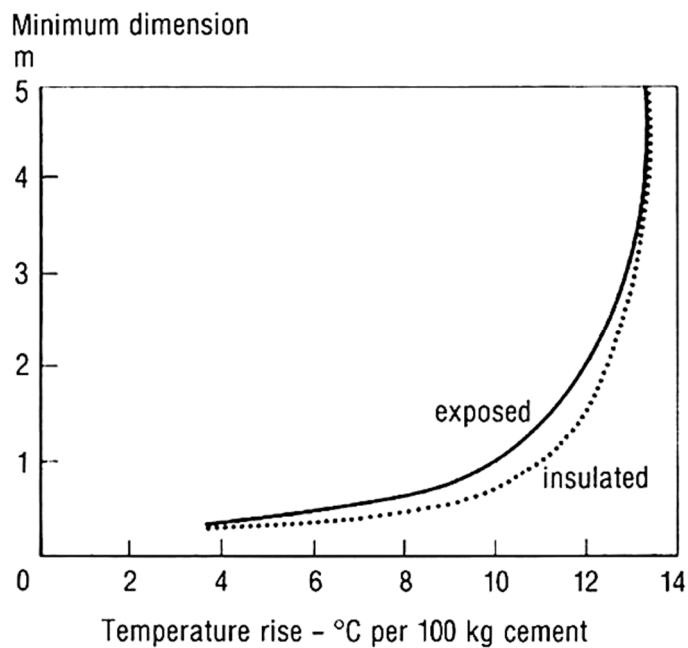
1.6 Hydrataatioon vaikuttavat tekijät

Hydrataatioon vaikuttavia tekijöitä on useita. Tässä työssä käsitellään sideaineen ominaisuuksien, kuten sen hienouden ja kemiallisen koostumuksen, betonin valulämpötilan ja vesi-sementtisuhteen vaikutus hydrataatiolämpöön ja edelleen betonin lämmönkehitykseen.

1.6.1 Sideaineen ominaisuudet

Käytetyn sideaineen hienous vaikuttaa hydrataatiosta syntyneeseen lämpötilaan. Mitä hienommaksi jauhetta sideainetta käytetään, sitä suurempi yhteispinta-ala betonihiukkasilla on. Hydrataatio tapahtuu betonihiukkasten pinnalla, joten sitä pääsee reagoimaan veden kanssa enemmän, kun hiukkasten yhteispinta-ala on suuri. Tällöin myös reaktiolämpö kasvaa. Massiivisissa betonirakenteissa tulisi käyttää siis mahdollisimman karkeaa sideainetta. (12, s. 94.)

Sideaineen hienouden lisäksi vielä suurempi vaikutus betonin lämmönkehitykseen syntyy käytetyn sideaineen määrästä (1, s. 378). Jos sementtiä voidaan korvata seosaineilla, tai vähentämällä sementin määrää samalla, kun betonin kiviaineksen suurinta raekokoa kasvatetaan, saadaan betonin lämmöntuottoa hillittyä (12, s. 94). Kuvassa 7 esitetään rakenteen mittojen ja sementtimäärän vaikutus betonin lämmön nousuun.

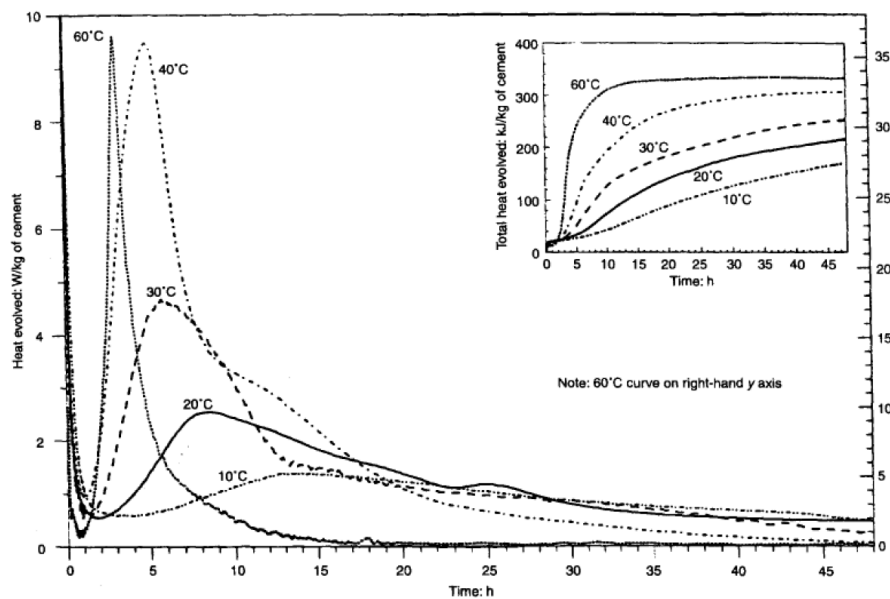


KUVA 7. Lämmön nousu massiivirakenteessa suhteessa rakenteen mittoihin ja sementtimäärään (12, s. 95)

Betonin kemiallinen koostumus vaikuttaa hydrataationopeuteen, sillä eri betoniklinkkerit (C_3S , C_2S , C_3A ja C_4AF) reagoivat veden kanssa eri nopeuksilla. Karkeasti eri klinkkerien reagoitinopeuksien kehitys voidaan laittaa järjestykseen: $C_3A > C_3S$ (aliitti) $> C_4AF$ (ferriitti) $> C_2S$ (beliitti) (10, s. 7). Massiivirakenteen betonimassaa valittaessa tulee pyrkiä lopputulokseen, jossa on vähiten aliitteja. Tällöin kovettumisprosessin aikaiset lämpötilaerot pysyvät tarpeeksi matalina, eikä halkeilua pääse tapahtumaan (12, s. 94).

1.6.2 Valulämpötila

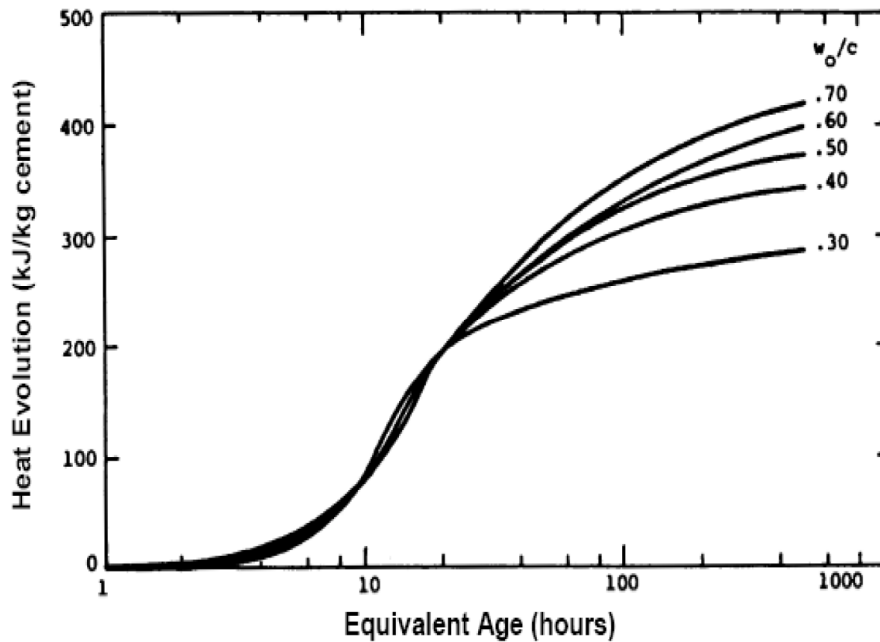
Mikäli valu tapahtuu lämpimissä olosuhteissa, vaikuttaa se kiihdyttävästi sementin lämpenemiseen myös kovettumisvaiheen alkuhetkissä. Kuumissa olosuhteissa suoritettujen valujen alkulämpö kohoaa nopeasti, mutta lämmöntuotto loppuu n. 15 tunnin jälkeen. Viileämissä oloissa suoritettujen valujen betonin lämpötila kohoaa maltillisemmin, mutta lämpötilan kohoaminen jatkuu vielä 48 tunnin kuluttuakin. (10, s. 8.) Kuva 8 kuvastaa saman betonimassan lämmönkehityksen eroja valulämpötilasta riippuen.



KUVA 8. Valulämpötilan vaikutus hydrataatiolämpöön (10, s. 8)

1.6.3 Vesi-sementtisuhte

Vesi-sementtisuhte on määrävä tekijä siinä, onko betonimassan mahdollista saavuttaa täydellinen hydrataatio. Täydellisessä reaktiossa hydrataatiotuotteet täyttävät lopulta kaiken sen tilan, jonka vesi alun perin vei seoksesta. Näin ollen seokset, joiden vesi-sementtisuhte on ollut suuri reagoivat pisimpään. Liian vähäinen vesi taas estää hydrataation tapahtumisen. Pienin sallittu vesi-sementtisuhte on 0,3, mutta tällaisella suhteella betonista tulee erittäin paksua ja jäykkää ja sen muovaaminen saattaa olla mahdotonta. (10, s. 9.) Yleisimmin sopiva vesi-sementtisuhte on 0,4 – 0,45 ellei jopa korkeampi, jolloin massa on tarpeeksi notkeaa työstettävyyden takaamiseksi. (9.) Vesi-sementtisuhteen vaikutusta hydrataatiolämpöön kuvataan kuvassa 9.



KUVA 9. Vesi-sementtisuhteen vaikutus lämmönkehitykseen (10, s. 9)

1.7 Kuljetus

Massiivirakenteen valun kannalta on tärkeää, että betonin saapuminen työmaalle toimii sujuvasti. Betoninkuljetusautojen tulee saapua työmaalle minuuttien tarkkuudella ja niiden vaihtuvuuden tulee olla jatkuvaa. Suotuisa etäisyys betoniasemalta valupaikalle on alle 10 km. (13, s. 27.) Betonin lämpötilan kannalta betonin kuljetusautonrummun tulisi olla vaalea. Lisäksi rumpu voidaan eristää lämpöä heijastavalla alumiinilla. Kuumissa oloissa sijaitsevat valut kannattaa suorittaa mahdollisuuksien mukaan yöaikaan. (10, s. 15.)

Työmailla, joilla tarvittavan betonin määrä on suuri, voi olla järkevää perustaa väliaikainen betoniasema. Tällöin kuljetus valettaville rakenteille ei kestä kauan. Työmaatontilla sijaitseva betoniasema mahdollistaa betonin lämpötilaan vaikuttamisen myös mekaanisesti, eikä betonin notkeus ehdi muuttua kuljetuksen aikana. (13, s. 27.)

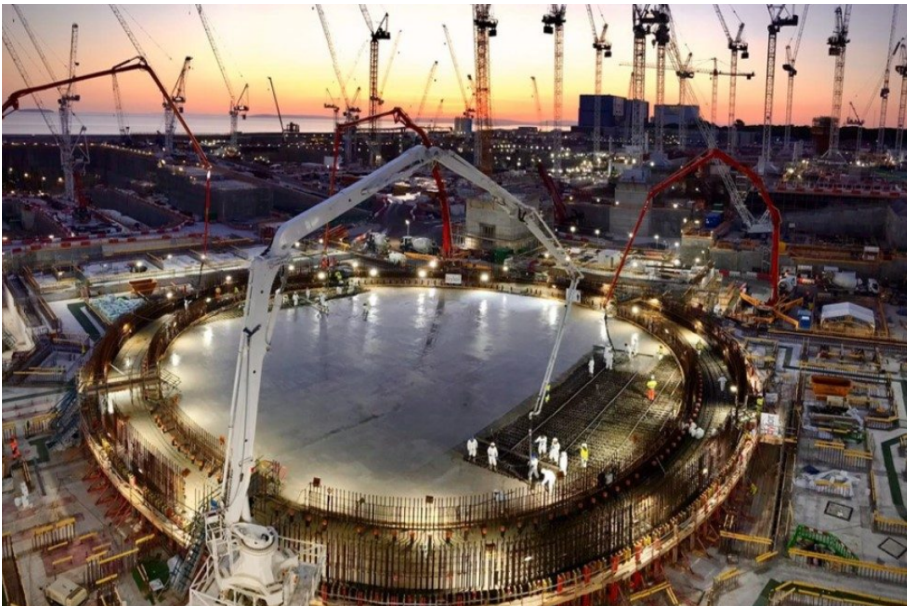
Jos betoni tuodaan työmaalle betoninkuljetusautolla, tulee huomioida kuljetuksen aikainen betonimassan kovettuminen. Sementti alkaa sitoutumaan heti veden kanssa reagoidessaan. Kuumissa ja kuivissa

oloissa veden haihtuminen betonimassasta lisääntyy, jolloin betonin vesi-sementtisuhte muuttuu. Pidemmällä matkalla vaikutuksetkin ovat suurempia. Betonin lämpötila muuttuu kuljetuksen aikana kuljetusnopeudesta ja ulkoilman lämpötilaerosta betonimassan lämpötilaan riippuen. Lämpötilan muutos kuumissa olosuhteissa on kuitenkin vain muutamia asteita. (1, s. 318.)

Mikäli betoniseoksen lämpötila nousee kuljetuksen aikana, on betonin lämpötilaa mahdollista laskea työmaalla nestemäisen typen avulla. Tätä käsitellään luvussa 4.1.

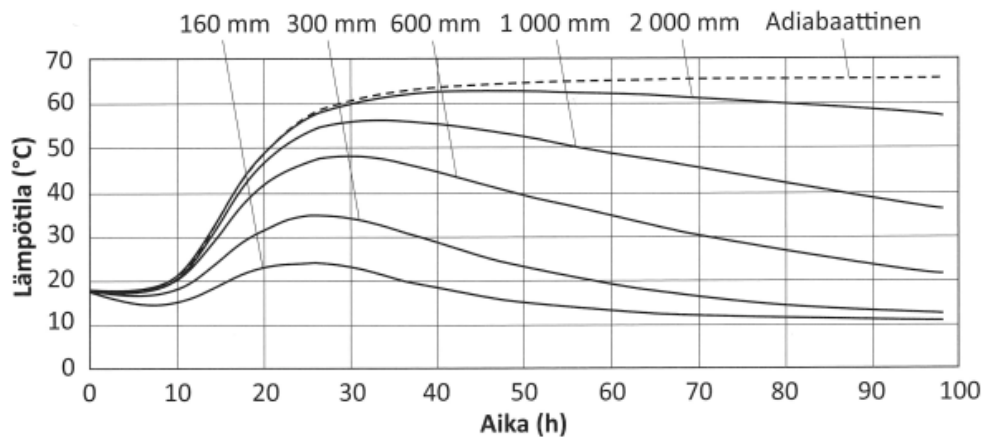
2 MASSIIVINEN TERÄSBETONI

Massiiviseksi betonirakenteeksi luetaan rakenteet, jotka koonsa puolesta tarvitsevat lisätoimenpiteitä hydrataatiolämmön aiheuttaman lämmönmuodonmuutoksen ja korkeiden kovettumislämpötilojen hallitsemiseksi. Karkeasti massiivisen rakenteen minimimitaksi voidaan nimetä yksi metri, vaikkakin lämpötilat ja niiden erot voivat nousta kriittisen korkeiksi pienemmissäkin rakenteista, joiden betonissa on käytetty paljon sideainetta. (1, s. 376.) Kuvassa 10 on käynnissä ydinreaktorin perustusvalu.



KUVA 10. Ydinreaktorin perustusvalu (14)

Hydrataation aikana vapautuva lämmön määrä on huomattava. Osa pahimmista rakenteelle syntyneistä vaurioista on peräisin liian korkeaksi muodostuneesta hydrataatiolämmöstä. (12, s. 92.) Rakenteen koko vaikuttaa siihen, kuinka tehokkaasti hydrataatioreaktiosta muodostunut lämpö pääsee poistumaan rakenteen sisäosista. Massiivisten betonirakenteiden tapauksessa lämmönsiirtyminen hidastuu ja lämpötilaero pinnan ja keskiosan välillä kasvaa. (15, s. 53.) Kuvassa 11 esitetään seinämäisen rakenteen paksuuden vaikutus keskiosan hydrataatiolämmön kehittymiseen. Mittauksessa on käytetty nopeasti kovetuvaa sementtiä. Adiabaattinen lämpötilan nousu tarkoittaa tilannetta, jossa rakenteesta ei poistuu lämpöä ollenkaan.



KUVA 11. Rakenteen paksuuden vaikutus hydrataatiolämmön kehitykseen (15, s. 53)

2.1 Kriittiset lämpötilat

Standardissa SFS 5975 rajoitetaan betonimassan lämpötilaerot seuraavasti:

- Kovettumisvaiheen maksimilämpötilan ei tule nousta yli +70 °C.
- Lämpötilaerojen väli betonirakenteen sisällä ei saa olla yli 20 °C/m.

Massiivisissa rakenteissa voidaan poikkeuksetta odottaa, että lämpötila nousee korkeaksi, jolloin betonin lämpötilan hallinnasta laaditaan suunnitelma. Suunnitelma sisältää muotituksen, betonoinnin, jälkihoidon, viimeistelyn, rakenteen suojauksen ja jäädytyksen. Jos lämpötila on kovettumisen aikana noussut yli 60 °C:een, on vaikutukset lujuuteen selvitettävä. Kovettumisvaiheen lämpötilan noustessa yli 70 °C:een tulee vaikutukset rakenteen lujuus- sekä säilyvyysominaisuuksiin selvittää. Ilman tarkempia selvityksiä lämpötilan vaikutuksesta lujuuteen, tulee olettaa, että puristuslujuuden aleneminen on 10 %, kun lämpötila nousee 60 °C:sta 70 °C:een. (16.)

Edellä mainittujen lämpötilarajojen lisäksi betoni luokitellaan lämpökäsitellyksi, jos:

- betonimassan lämpötila on yli +40 °C
- lämpötila kovettumisvaiheen aikana on yli +50 °C
- lämpötilan nousu kovettumisvaiheen aikana on yli +25 °C. (16)

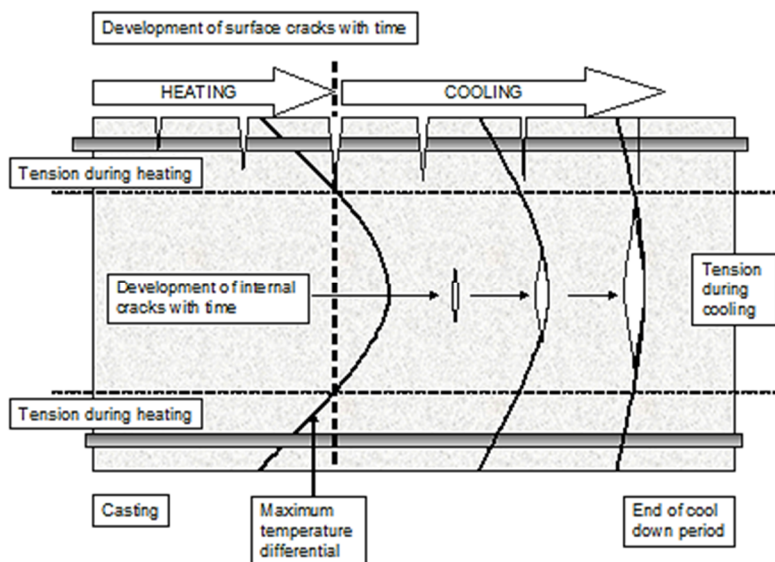
2.2 Korkean lämpötilan seuraukset

Kuumissa oloissa betonin ominaisuudet muuttuvat. Kuumia olosuhteita aiheuttavat ulkoilman lämpötila, betonin lämpötila, kova tuulennopeus sekä matala ilmankosteus. Korkea lämpötila aiheuttaa mm. betonin notkeuden menetystä, veden lisätarvetta, puristuslujuuden heikkenemistä sekä halkeilun vaaraa. (10, s. 1.)

2.2.1 Halkeilu

Massiivisissa rakenteissa lämpötila pinnan ja rakenteen keskiosan välillä ei ole sama. Lämpö pääsee poistumaan pinnalta nopeammin, kuin rakenteen keskeltä, jolloin pinnan ja keskustan välille syntyy lämpötilaero ja rakenteen pinnalle syntyy vetojännityksiä. Kun pinnan vetojännitykset ylittävät betonin vetolujuuden alkaa pinta halkeilla. (15, s. 53). Raja-arvona halkeilun syntymiselle voidaan pitää 20 °C:n lämpötilaeroa (1, s. 377). Täydellinen halkeamien välttäminen on vaikeaa, joten tavoitteena on hallita halkeamien leveyttä ja halkeamaväliä.

Kuvassa 12 on kuvattu lämpöliikkeen aiheuttamien halkeamien syntyä. Kyseiset halkeamat aiheutuvat hydrataatiolämmön seurauksena, kun rakenteen eri osien välille muodostuu suuri lämpötilaero (1, s. 104).



KUVA 12. Betonirakenteen pinta- ja sisäisten halkeamien synty (17)

Materiaalin lämpeneminen aiheuttaa yleisesti lämpölaajenemista. Lämmin betoni omaa siis suuremman tilavuuden kuin viileä betoni. Erityisesti massiivisissa rakenteissa, joissa keskiosan lämpötila pysyy korkeana pitkään sen jälkeen, kun pintaosien lämpötila on laskenut, muodostuu jännityksiä. (1, s. 105.)

Liiallinen lämmönkehitys ja suuret lämpötilaerot rakenteen pinnan ja keskustan välillä aiheuttavat suuria pakkovoimia. Rakenteen sisäosat lämpenevät enemmän, kuin pinnat, joilta lämpö pääsee haihtumaan ympäröivään ilmaan. Pintaosilla tapahtuu kuivumiskutistumista. Rakenteen sisäosissa oleva lämpö pyrkii kuitenkin tasaantumaan ympärillä olevan viileämmän materiaalin kanssa, jolloin rakenteen osien välille muodostuu jännityksiä. Ytimeistä poistuva lämpö paisuttaa jo kutistunutta pintaa, jolloin syntyy pintahalkeilua. (1, s. 105.)

2.2.2 Lujuuskato

Betonin lujuus kehittyy samassa suhteessa lämpötilan nousun kanssa. Jotta betoni alkaa kovettumaan, tarvitsee se lämpöä. Kun käytetään betoniseosta, jossa on paljon sementtiä sideaineena, nousee sen hydrataatiolämpö ja seos kovettuu nopeasti (1, s. 39). Massiivisissa betonirakenteissa kovettumisvaiheen hydrataatiolämpö voi nousta niin korkeaksi, että se vaikuttaa betonin loppulujuuteen haitallisesti. Mikäli käytetty betoni luokitellaan lämpökäsittelyksi, kuten luvussa 2.1 määriteltiin, on mahdollista, että betoni ei saavuta sille asetettua nimellislujutta.

Betonin lujuuskatoa aiheuttavat sen osa-aineiden erilaiset lämpölaajenemiskertoimet ja kosteuden siirtyminen rakenteen sisällä lämpimiltä osilta viileämmille. Valuvaiheessa lujuuskatoa pääsee tapahtumaan, jos betoniseos on alkanut sitoutumaan ennen, kuin tiivistäminen on tehty. (1, s. 504.)

2.2.3 Notkeuskato

Betonin on oltava tarpeeksi notkeaa, jotta rakenne on mahdollista valaa haluttuun muottiin ja lopputulos rakenteen pinnassa on tarpeeksi tasainen. Yksi betonin notkeuden mittari on standardin SFS- EN 12350- 2 mukaisesti suoritettava painumakoe. Koe suoritetaan täyttämällä teräksinen kartiomuotti kolmanneksittain betonilla, välillä tiivistäen. Täysi teräskartio poistetaan ja betonin painuma mitataan kartiomuotin pinnasta millimetreinä. Betonin notkeus ilmoitetaan painumaa vastaavina luokkina S1-S5. Betonirakenteen käyttökohde sekä valutyylit ratkaisevat minkä notkeusluokan betonia tulee käyttää.

Betonien notkeusluokat on kuvattu taulukossa 5. Massiivibetonirakenteille sopivalla betonilla painuman tulisi olla vähintään 100 mm, joka vastaa notkeusluokkaa S3. (1, s. 70.)

TAULUKKO 5. Standardin SFS-EN 12350-2 mukaisesti testatut betonimassan ominaisuudet (1, s. 71)

Luokka	Standardin SFS-EN 12350-2 mukaisesti määritetty painuma / mm
S1	10 ... 40
S2	50 ... 90
S3	100 ... 150
S4	160 ... 210
S5	≥ 220

Betonin lämpötilan noustessa seoksen notkeus vähenee ja sen vedentarve lisääntyy. Esimerkiksi betonin lämpötilan noustessa 10 asteesta 50 asteeseen, pienenee sen painumatestin tulos yli 100 mm:stä alle 30 mm:in. Vettä voidaan lisätä laskelmien mukaan etukäteen seokseen notkeuskadon välttämiseksi. Tarvittava lisävesimäärä lisääntyy lämpötilan noustessa ja ajan kuluessa. (10, s.10.)

2.3 Massiivisten rakenteiden valu

Massiivisiin rakenteisiin tarvittava yhtäjaksoisesti valettava betonimäärä on yleensä yli 500 m³. Suunnitelmattomia valusaumoja ei saa syntyä, joten valun tulee onnistua sujuvasti suunnitelmien mukaan. Suuri valualue tarvitsee kuitenkin yleensä aina hidastimia, jotta hydrataation alkua saadaan viivästettyä. Tärkeää on, ettei betoniseoksen sitoutuminen pääse alkamaan, ennen kuin valu on saatu tiivistettyä. (1, s. 379.)

Valun koon lisäksi hidastimia tarvitaan, kun valun aikainen sää on kuuma ja tuulinen. Massiivirakenteiden kannalta paras sää valulle olisi muutaman lämpöasteen sää mahdollisimman korkealla ilmankosteudella. Kuumissa maissa tämä ei kuitenkaan ole mahdollista vaan betonin valamiseen ja kovettumiseen suotui-

sat olosuhteet on luotava muilla keinoin. Kuuma keli pidentää jälkihoidon tarvetta kaikille betonirakenteille, mutta erityisesti massiivisille rakenteille, joiden jälkihoitoaika on muutenkin tavallisia rakenteita pidempi. (1, s. 380.)

Betonin siirtyessä betoninkuljetusautosta muottiin tulisi sen lämpötilan pysyä samana. Kuuma ulkoilma ja auringon lämpö kuitenkin lämmittävät betonia. Mitä pidempi kuljetusmatka betonilla on, sitä korkeammaksi sen lämpötila ehtii nousta ennen muottiin valua. Betonin kuljetushihna ja muotti kannattaa suojata auringolta. Jos betoni pumpataan muottiin, voidaan pumppausputki ympäröidä jäällä, jolloin putki osaltaan viilentää betonia valuprosessissa. Suurin vaikutus valuhetken lämpötilankehittymiseen betonissa saadaan aikaan ulkoilman lämpötilalla. Kuumissa maissa lämpötila öisin on yleensä huomattavasti päivälämpötiloja alhaisempi. (10, s.16.)

Massiivisten rakenteiden valussa on tärkeää seurata betonin lämpötilankehittymistä. Mittauksia suoritetaan rakenteen koosta riippuen vähintään pinnalta, keskeltä ja pohjalta sekä muottien reunoilta. Mittauksilla varmistetaan lujouden kehitys, maksimilämpötila sekä lämpötilaerojen suuruus rakenteessa. Lämpötilojen seuranta valun tapahduttua on lähinnä laadunvarmistusta. Reunojen lämpötiloihin voidaan vaikuttaa vielä jonkin verran valun jälkeenkin, mutta lämpötilojen seurannan tarkoitus on lähinnä varmistaa oikean betonimassan valinnan, valun ja keskiosien jäähtymisen sekä reunojen eristämisen onnistuminen. (1, s. 379.)

3 JÄÄHDYTYSKEINOT

3.1 Massan esijäähdytys

Betonimassan alkulämpötila ennen kovettumisprosessin alkamista on likimain suoraan verrannollinen betonin maksimilämpötilaan. Mikäli betonin alkulämpötilaa saadaan laskettua $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, laskee betonin maksimilämpötila kovettumisen aikana myös $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. (10, s. 20.)

Massan esijäähdytykseksi luetaan kaksi eri menetelmää: Betonimassan ainesosien erillinen jäähdytys ja valmiin betonimassan jäähdytys. Menetelmän valintaan vaikuttavat valupaikan olosuhteet, kuin myös betonitoimittajan toimintaperiaatteet. (10, s. 20.)

Menetelmän tehokkuus riippuu käytetyn betoniseoksen sementtiityypistä, sen kemiallisesta koostumuksesta, seosaineiden määrästä ja valupaikan sääoloista, kuten kuumuudesta ja ilmankosteudesta. (10, s. 20.)

3.1.1 Kiviaineksen jäähdytys

Betoniseoksesta suurin osa on kiviainesta. Kiviaineksen lämpötilaa laskemalla voidaan vaikuttaa valmiin betoniseoksen loppulämpötilaan enemmän, kuin muiden aineiden lämpötilalla. (18, s. 6.)

Käytetyn kiviaineksen varastointipaikka vaikuttaa luonnollisesti kiviaineksen lämpötilaan. Viileässä ja varjoisassa paikassa varastoitu kiviaines laskee myös betonimassan lämpötilaa. Kiviainesta voidaan myös sumuttaa tai ruiskuttaa kylmällä vedellä, jolloin veden haihtuminen kiviaineksesta vie mukanaan myös kiviainesmassan lämpöä. Vedenmäärän tulee kuitenkin pysyä tarpeeksi alhaisena, jotta kaikki vesi haihtuu pois ennen kiviaineksen lisäämistä betoniseokseen. (18, s. 6.)

Kiviaineksen tehokkain jäähtyminen saadaan aikaiseksi upottamalla karkea kiviaines jäähdytysstiiloon, joka jäähdytetään vedellä tai ilmalla. Kyseinen jäähdytyskeino on hintava ja suuri käytetty vedenmäärä tekee menetelmästä joissakin projekteissa mahdollottoman. (18, s. 7.)

Toinen silloissa tapahtuva kiviaineksen jäähdysmenetelmä käyttää hyväksi alipaineella saavutettua veden kiehumispisteen alenemista. Kiviaineksen sisältävä kosteus haihtuu alipaineessa, jäähdyttäen kiviainesta. Kiviaineksen tulee olla tarpeeksi kosteaa, jotta tyhjiösilloja voidaan käyttää jäähdysmenetelmänä. (18, s. 7.)

3.1.2 Veden jäähdys

Betoniseoksen ainesosista vedellä on suurin ominaislämpökapasiteetti. Veden ominaislämpökapasiteetti on 4,19 kJ/(kg°C). Sementin ja karkean kiviaineksen lämpökapasiteetti on noin 1,1 kJ/(kg°C). Tästä johtuen veden lämpötilan aleneminen yhdellä asteella vaikuttaa betonin lämpötilaan huomattavasti muita aineita enemmän. (18, s. 4) Kylmän veden lisääminen seokseen alentaa betonin lämpötilaa kaavan 3 mukaisesti.

KAAVA 3. Betonin lämpötilan aleneminen veden lisäämisen seurauksena (18, s. 6)

$$T_{c.2} = \frac{m_w(\Delta T_w)}{m_{w.c}}$$

$T_{c.2}$ = Betonin loppulämpötila (°C)

m_w = veden määrä betonireseptissä (kg)

ΔT_w = veden lämpötilanmuutos (°C)

$m_{w.c}$ = betonin kokonaisvesimäärä (kg)

Veden korvaaminen jäähileillä tai jäämurskeella on mahdollista 75 % veden kokonaismäärästä. Menetelmä on tehokas, sillä jokainen 7,5 kg jäätä alentaa betonin loppulämpötilaa yhdellä asteella. (10, s. 23.)

Veden lisääminen kiinteässä muodossa alentaa betonin lämpötilaa kaavan 4 mukaisesti.

KAAVA 4. Betonin lämpötilan aleneminen, kun vedestä osa lisätään jäänä (18, s.6)

$$T_{c.2} = \frac{m_i c_i}{m_{w.c} c_w}$$

m_i = lisätyn jään massa (kg)

c_i = jään ominaislämpökapasiteetti (334 kJ/kgK)

c_w = veden ominaislämpökapasiteetti (4,18 kJ/kgK)

3.1.3 Nestemäinen typpi

Työmaalla ennen valua betonia voidaan vielä jäähdyttää nestemäisen typen avulla. Typpeä ruiskutetaan betoniautorummun sisään betoniseoksen pinnalle. Ruiskutettaessa 10–12 kg nestemäistä typpeä betoniukuutiometriä kohden, laskee betonin lämpötila yhdellä asteella. Nestemäistä typpeä voidaan käyttää myös kiviaineksen tai veden jäähdytykseen. (19, s. 26.)

Nestemäisellä typellä jäähdyttäminen ei vaikuta betonin ominaisuuksiin tai käyttäytymiseen, kunhan menetelmän käyttöaika rajoitetaan. Liian pitkä jäähdytys aiheuttaa massan jäätymistä, epähomogeenisuutta ja massan tiivistymistä. Menetelmänä betonin jäähdyttäminen typellä on edullinen ratkaisu ja se jäähdyttää seosta vaaditun määrän sekä tarpeen mukaan. (10, s. 24.)

Kuvassa 13 betoniautonrummussa olevaa betonia jäähdytetään nestemäisen typen avulla. Menetelmä on edullinen ja tehokas vaihtoehto, kun betonia pitää jäähdyttää vielä juuri ennen valua.

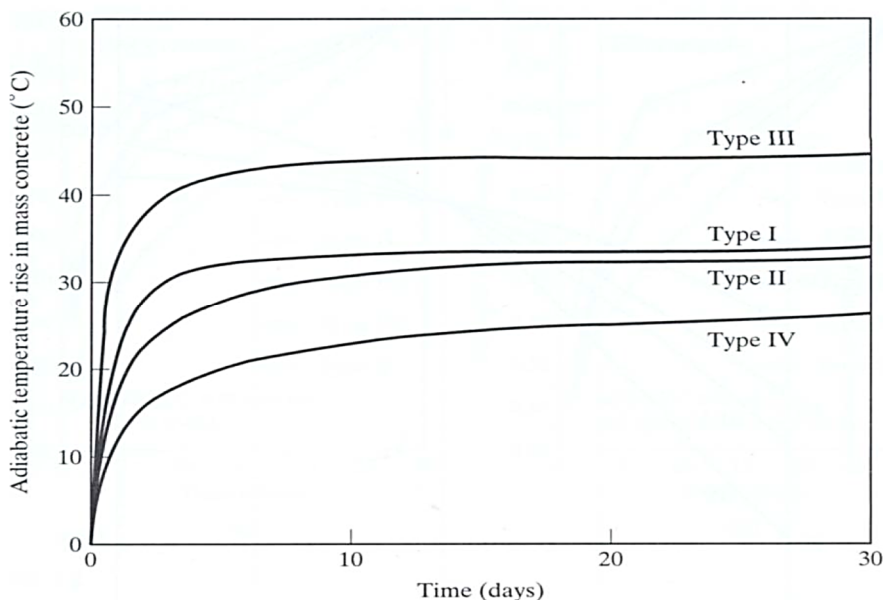


KUVA 13. Typpisiilot ja betoniauto työmaalla (20)

Kun betonia tai sen runkoainesta on jäädytetty voimakkaasti, kuluu osa hydrataation tuottamasta lämmöstä kiviaineksen lämpenemiseen. Tällöin itse betonin maksimilämpötila alentuu. (19, s. 27.)

3.2 Sideaineen valinta

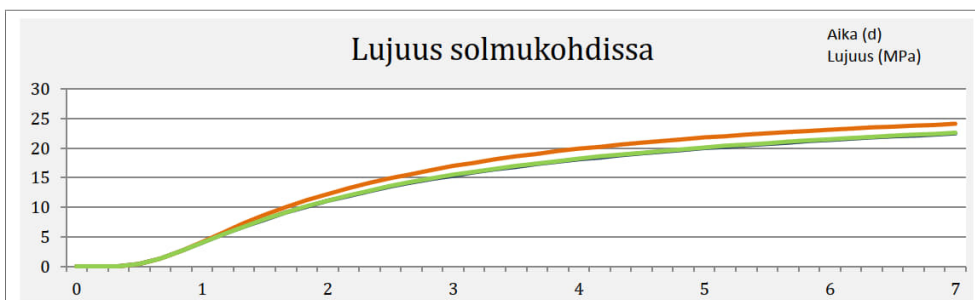
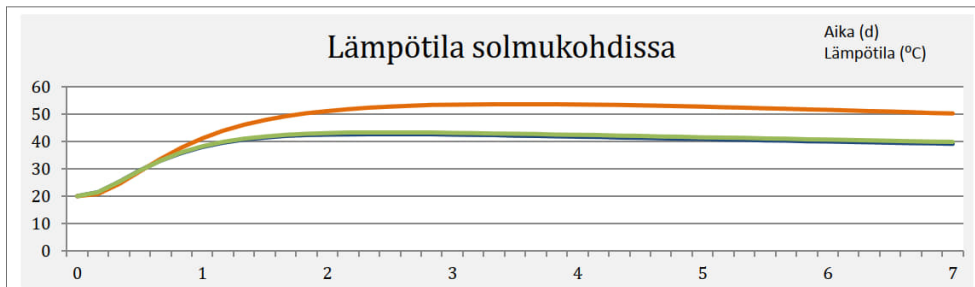
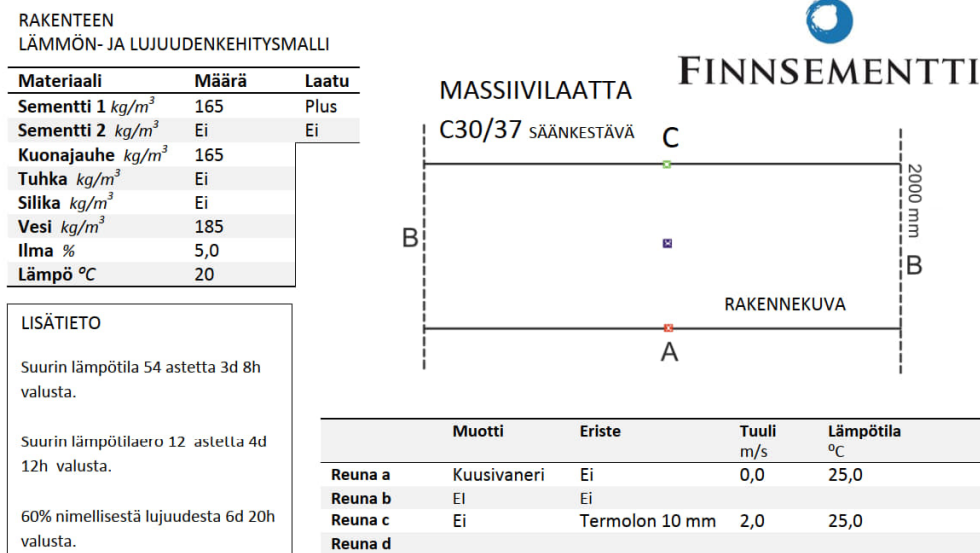
Eri sementtityypeillä on omanlaisensa vaikutus lämmöntuottoon. Suomen betonityypeistä alhaisin lämmöntuotto on SR-sementillä CEM I 42,5 N SR3. Sen lämmöntuotto on 320–340 kJ/kg. Toinen alhaisen lämmöntuoton omaava betonityyppi on Plus-sementti CEM II / B-M (S-LL) 42,5 N. Sen lämmöntuotto on 310–340 kJ/kg. Sopivaa sementtityyppiä valittaessa tulee kuitenkin pitää mielessä suunniteltavan rakenteen rasitusluokat ja säilyvyysvaatimukset. (12, s. 94.) Eri sementtityyppien vaikutusta lämmönkehitykseen massiivirakenteessa on kuvattu kuvassa 14.



KUVA 14. Tyypillisempien sementtityyppien aiheuttama lämmön nousu massiivirakenteessa, Suomessa käytössä tyypit I-III (21, s.35)

Yksi hyvä vaihtoehto massiivirakenteen betoniksi Suomessa olisi runsaasti masuunikuonalla seostettava (36–80 % sideaineesta) CEM I-tyyppinen sementti, jolloin sementtiseos mukailisi tyyppiä CEM III A tai B. (12, s.94.)

Finnsementin tarjoamasta betometrihausta löytyy esimerkki, jossa kahden metrin paksuisen massiivilaatan lämpötiloja on testattu betonilla, jonka sideaine koostumus on 50 % sementtityyppiä CEM II/B-M (S-LL) 42,5N (Plus-sementti) ja 50 % masuunikuonaa. (22.) Esimerkkirakenteen solmukohdissa mitattu lämpötila kohosi 54 asteeseen kolmantena päivänä valun suorittamisesta. Esimerkki jäljittelee ideaaliolosuhteita, eikä sen tuloksia voida suoraan käyttää 2 m paksuiseen massiivilaattaan. Kuva 15 osoittaa mittaus-
tulokset.



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 eristyksen huolellisuus ja oikea-aikaisuus. Tämän johdosta näillä laskelmilla Ei voi korvata työaikaista lujuuden seurantaa, joka on suoritettava Betoninormien mukaisesti esim. olosuhdekoekappaleilla tai rakenteen lämpömittausten avulla.

Lundin yliopiston kehittämällä Hacon 3-ohjelmalla samaisen esimerkin lämpötilojen laskeminen antaa huomattavasti korkeampia keskimääräisiä lämpötiloja. Ohjelmaan voidaan syöttää monipuolisesti valujan ja paikan olosuhteita, kuten muotituksen, eristämisen sekä ulkoilman lämpötiloja. (23.) Hacon 3-ohjelmaa on käytetty tämän työn esimerkkilaskussa luvussa 6.

3.3 Valun jälkeinen jäähdytys

Betoni alkaa kovettumaan heti valun jälkeen. Kovettumisen aikana hydrataatioprosessi on käynnissä ja betonin lämpötila nousee. Muottien sisään on mahdollista asentaa jäähdytysputkisto hillitsemään betonin lämpötilankehitystä ja tasaamaan lämpötilaeroja eri osien välillä. Menetelmä perustuu lämmönjohtumiseen, jossa kylmät putkistot sitovat lämpöä ympäröivästä betoniseoksesta. (10, s. 27.)

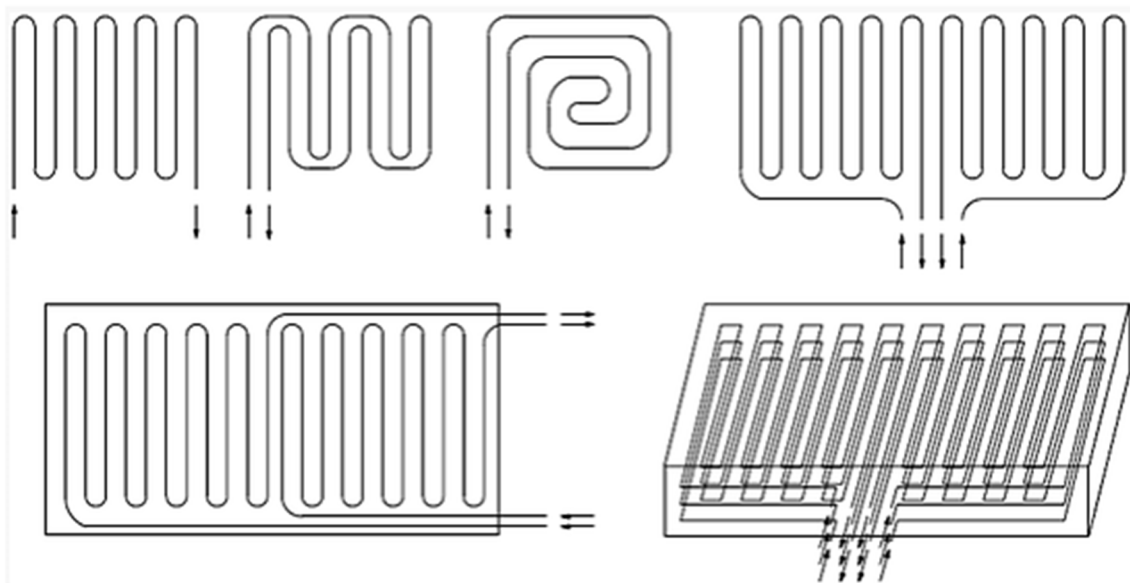
3.3.1 Putkiston valinta

Jäähdytysputkisto voidaan tehdä muovi-, alumiini-, tai teräsputkista. Materiaalin valinta tulee tehdä kohteen mukaan, sillä kaikki putkimateriaalit eivät sovi jokaiseen kohteeseen. 25 mm halkaisijan putki, joka on seinämiltään 1,5 mm paksu, on todettu toimivaksi. Tutkimusten mukaan isompi putki toimisi tehokkaammin ja jäähdytysnesteen lämpötila voisi olla korkeampi. (18, s. 10.)

Muoviputket ovat kevyitä, edullisia ja mahdollisia asentaa vähillä saumoilla, jolloin nesteen kulku putkessa helpottuu. Muovin alhainen lämmönjohto teräkseen verrattuna kuitenkin vähentää muovisen putkiston jäähdystehoa. Lisäksi massiivisissa rakenteissa raudoitteita ei välttämättä ole rakenteen keskellä tukemaan putkistoa. Tällöin käytettävän muoviputken tulee olla materiaalista, joka kestää valun sisällä ilman taipumista, tai rakenteeseen on asennettava lisäraudoitteita tukemaan jäähdytysputkistoa. Tästä syystä muoviputkia ei yleensä käytetä massiivirakenteiden jäähdyttämiseen. Alumiini puolestaan ei sovi valuihin, joissa jäähdytystarve kestää yli kolme kuukautta. Tällöin sementissä olevat alkaalit alkavat reagoimaan alumiinin kanssa aiheuttaen putkiston haurastumista ja lopulta vuotoa. (18, s. 10.)

Massiivirakenteita valettaessa tapahtuu valu kerroksittain, sillä koko rakenteen betonimäärää ei voida valaa kerralla. Jäähdytysputkisto asennetaan tasaisten välimatkojen päähän toisistaan valukerroksiin. Putkiston muoto toteutetaan jokaisen kohteen tarpeiden mukaisesti. Kuvassa 16 on kuvattu erilaisia jääh-

dytysputkiston muotovaihtoehtoja. Nuolet kuvaavat jäähdytysnesteen virtaussuuntaa. (10, s. 27.) Tehokain putkistoratkaisu hyödyntää useampaa putkea vierekkäin, joissa jokaisessa virtaa oma jäähdytysnestensä. Näin ollen jokaisen putken jäähdytysteho on samaa luokkaa, sillä putkien sisäinen neste pysyy saman lämpöisenä. Lyhyemmät putkistot myös varmistavat tasaisen jäähdytystehon, sillä jäähdytysneste ei ehdi lämmentä hydrataatiolämmön vaikutuksesta. (18, s.10.)



KUVA 16. Jäähdytysputkiston erilaisia muotoja (24, s. 169)

Putkistojäähditys voidaan myös suorittaa yhdellä putkella, joka mutkittelee valun sisällä ja putken läpi virtaa yhdestä lähteestä jäähdytysneste. Tällöin putkistonpäiden takia tarvitsee porata vain yksi reikä muottiin. Hydrataatiolämpö kuitenkin lämmittelee virtaavaa nestettä ja putkiston jäähdytysteho on eri putken alkupäässä, kuin sen loppupäässä. (24, s. 169.)

Putkiston pituudelle on asetettu raportissa ACI 207.4R-20 suosituspituudet. Sementin hienouden ja sen määrän kasvaessa putkiston pituuden tulee lyhentyä, jotta hydrataatiolämpöä saadaan alennettua tehokkaasti. Putkistojen pituudet keskenään on tärkeää pitää samanmittaisena, jotta jäähdytysteho pysyy tasaisena. Yksittäisen putken pituus voi olla väliltä ~185 m ... ~365 m. Paras maksimipituus yksittäiselle putkelle on ~245 m. (18, s.10.)

Kuvassa 17 Graham Construction asentaa jäähdytysputkistoa 3,6 m syvään anturaan kesällä 2019. Projekti tulee olemaan valmistuttuaan 43-kerroksinen asuinkäyttöön suunniteltu rakennus.



KUVA 17. Putkistojäähdytyksen asennus massiiviseen rakenteeseen (25)

Kaikista tasaisin jäähdytysteho saadaan aikaiseksi, kun putkiston asennusvälit ovat samat pysty- ja leveysuunnassa. Putkisto voidaan sitoa rakenteen raudoitteisiin tai valukerrokseen asennettaviin ankkureihin. (18, s. 10.)

3.3.2 Vesikiertoinen jäähdytys

Yleisin jäähdytykseen käytettävä neste on vesi, joka syötetään putkeen lähellä sijaitsevasta vesistöstä. Rakennuskohteissa, jotka sijaitsevat lämpimissä maissa tarpeeksi viileän veden löytäminen voi olla mahdotonta, jolloin vettä täytyy jäähdyttää ennen putkistoon ajoa. Kohteissa, joissa luonnonvesi sijaitsee kaukana, voidaan vesi tuoda työmaalle säiliöautossa. Tällöin säiliöautossa oleva vesi kiertäisi putkistossa ja se jäähdytettäisiin aina kiertojen välissä esimerkiksi nestemäisellä tyypellä tai sähköisellä jäähdytysmenetelmällä. (26, s. 41.)

Vesi tulee puhdistaa, jotta putkiin ei päädy sakkaumia. Vesi jäähdytetään noin 3 °C:een. Kylmempää nestettä tarvittaessa voidaan käyttää seosta, josta 70 % on vettä ja 30 % on jäänestoainetta. Tällaista nestettä jäähdyttämällä voidaan putkistoon ajaa 1 °C lämpötilassa olevaan nestettä. (18, s. 10.)

ja kiertävän veden lämpötilaero saa olla maksimissaan 20 °C. Tämän rajan ylittyessä betoniin saattaa putkien ympärille muodostua lämpötilaerosta johtuvaa halkeilua. (24, s. 170.)

Veden sopiva virtausnopeus 25 mm putkistolle on 15–17 l / min. Tällöin neste saavuttaa pyörrevirtauksen ja jäädyttää putken ympäristöä tehokkaasti. (18, s.10.) Pitkillä putkistoilla rakenteen tasaista jäähtymistä kannattaa tehostaa veden kiertosuunnan vaihtelulla tasaisin väliajoin noin 1–2 kertaa vuorokaudessa. (24, s. 170.)

Huomioitavaan on, että jäähdytysputkistosta saapuva vesi on lämmennyt, eikä sen suora luontoon palautus ole välttämättä sallittua ilman lisätoimenpiteitä. Veden palautus tarvitsee paikallisten viranomaisten niin vaatiessa erillisen luvan. (18, s.10.)

Massiivirakennetta kannattaa aloittaa jäädyttämään, kun betoni on alkanut kovettumaan. Ensimmäisten tuntien aikana betonin lämpötila ei ole vielä kohonnut niin korkeaksi, että jäädyttäminen olisi tarpeen. Jäädyttämistä jatketaan ainakin niin kauan, kunnes kovettumisprosessin maksimilämpötila on saavutettu. Jäädytyksen tarve kestää rakenteesta riippuen muutamasta päivästä kuukauteen. Kun nesteen virtaus putkistossa on lopetettu saattaa betonin lämpötila lähteä nousemaan uudestaan. Mikäli lämpötila nousee huomattavasti, tulee jäähdytysputkisto kytkeä päälle uudestaan ja jäähdytyskierruksia suorittaa, kunnes lämpötilan nousu pysyy sallituissa rajoissa. (18, s.10.)

3.3.3 Ilmakiertoinen jäädytys

Jäähdytysputkisto on todettu myös tehokkaaksi, kun veden sijasta jäädyttävänä aineena on käytetty ilmaa. Putkiston halkaisijan ja virtaaman täytyy olla suurempi, kuin vesijäädytteisessä putkistossa. Käytännössä putken halkaisijan tulee olla vähintään 80 mm ja virtaaman 8 m/s. Tämä selittyy ilman heikommalla lämpökapasiteetilla veteen verrattuna. (24, s. 173.)

Ilmakiertoinen jäädytys on edullisempi ja helpompi asentaa, kuin vesikiertoinen jäädytys, mutta menetelmä ei ole suosittu tai tunnettu. (24, s. 173.)

4 PUTKISTOJÄÄHDYTYKSEN SUUNNITTELU

Luvussa 4 käydään läpi putkistojäähdytyksen suunnittelu seuraamalla ACI-raportissa ACI 207.2R-07 esitettyä menetelmää. ACI-menetelmä noudattaa alkuperäisesti amerikkalaisia mittayksiköitä. Tässä työssä menetelmä esitetään SI-järjestelmän mittayksiköillä.

4.1 ACI-raportin 207.1R-96 menetelmä

ACI-menetelmä tarjoaa kolme eri käyttötarkoitusta. Sillä voidaan selvittää

- keskimääräinen betonin lämpötila jäähdytysputkistoa käytettäessä
- keskimääräinen betonin lämpötila missä tahansa kohtaa käytettyä jäähdytysputkea
- poistuvan veden lämpötila.. (27, s.17.)

Menetelmä laskee annetuilla arvoilla jäähdytyksen onnistumisen. Jäähdytysputkisto suunnitellaan kolme eri kaavioita tulkitsemalla, jonka jälkeen saadut tulokset kirjataan Excel-taulukkoon. Excel-taulukko kertoo suunnitellun jäähdytysjärjestelmän sopivuuden rakennuskohteeseen. Laskentakierroksia lisäämällä päästään optimoituun tulokseen. (27, s. 17.)

4.2 Tarvittavat lähtötiedot

Menetelmää käytettäessä tulee ensin selvittää seuraavat muuttujat:

- veden virtausnopeus Q (l/min)
- putken pituus L (m)
- putkiston riviväli S (m)
- betonin terminen diffusiviteetti taulukosta tai laskettuna α (m^2/vrk tai $\text{m}^2 \times 10^{-3}/\text{h}$)
- jäähdytyksen pituus t (vrk)
- veden alkulämpötila $T_{w,1}$ ($^{\circ}\text{C}$).

Annetuilla muuttujilla lasketaan ensimmäinen kierros, jonka jälkeen saatuja tuloksia voidaan parantaa lähtötietoja muuttamalla niiden muuttujien osalta, joilla se on mahdollista. (10, s. 45)

Betonin terminen diffusiviteetti α lasketaan kaavasta 5.

KAAVA 5. Betonin terminen diffusiviteetti laskentakaava (27, s. 16)

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_c}$$

λ = betonin lämmönjohtavuus (W/mK)

c_c = betonin ominaislämpökapasiteetti (J/kgK)

ρ = betonin tiheys (kg/m³)

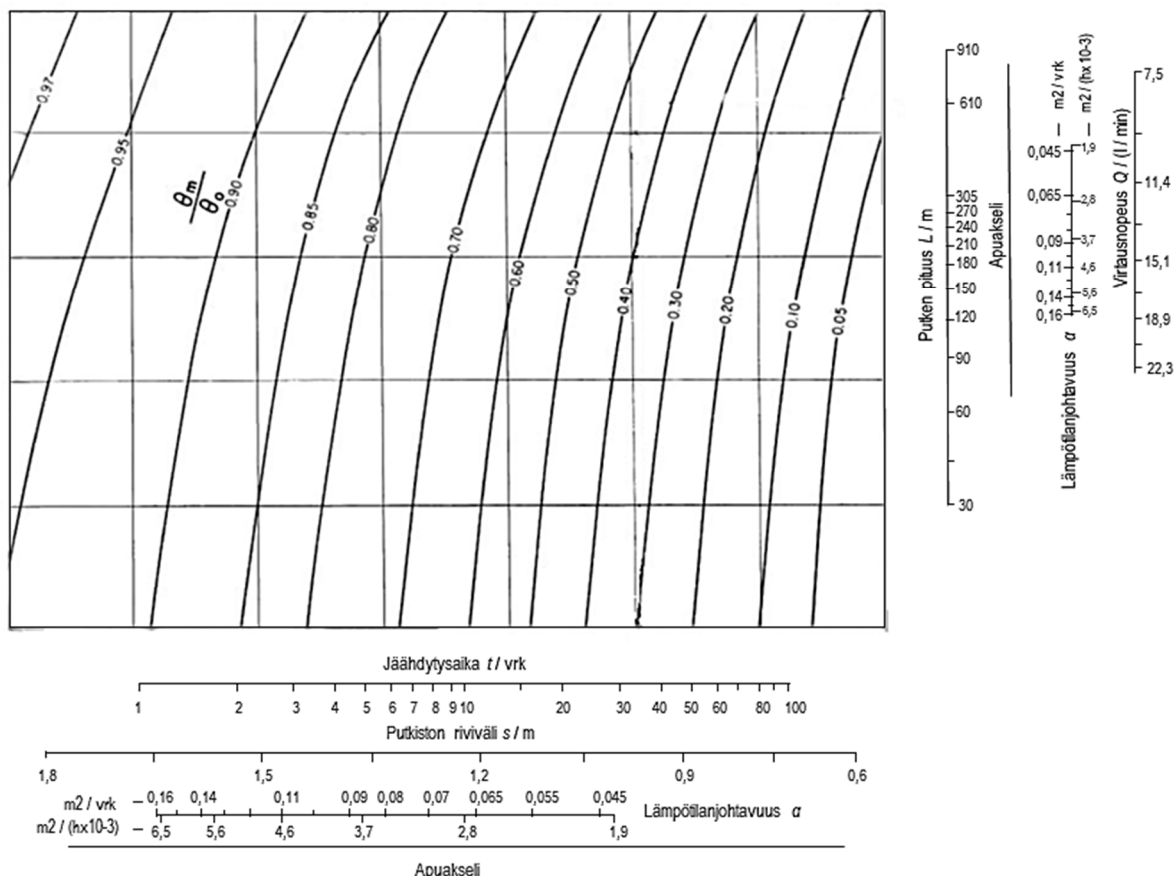
Jos betonissa käytettävän runkoaineen materiaali on tiedossa, voidaan terminen diffusiviteetti lukea suoraan taulukosta 6.

TAULUKKO 6. Betonin terminen diffusiviteetti runkoaineen materiaalista riippuen (27, s.7)

Karkean runkoaineen materiaali	terminen diffusiviteetti / (m ² /vrk)	terminen diffusiviteetti / (m ² /h10 ³)
Kvartsiitti	1,39	0,058
Kalkkikivi	1,22	0,051
Dolomiitti	1,20	0,050
Graniitti	1,03	0,043
Ryoliitti	0,84	0,035
Basaltti	0,77	0,032

4.3 Kaavioiden tulkinta

Kun tarvittavat esitiedot on saatu kerättyä, valitaan käyttötarkoitukseen sopiva kaavio. Kuvassa 18 on esitetty ACI-menetelmään kuuluva kaavio, jolla voidaan ratkaista betonin lopullinen keskilämpötila. Kaavioon piirretään alkuarvojen mukaan vaaka- ja pystyviivat, jotka leikkaavat toisensa pisteessä θ_m/θ_o . Tämä piste kertoo alkulämpötilan ja lopullisen keskilämpötilan suhteen. (27, s.17.)



KUVA 18. Betonin lopullinen keskilämpötila jäähdytyksen kanssa (27, s.17)

Kaaviota lähdetään lukemaan vasemmalta, veden virtaaman Q kohdalta, jolta piirretään suora viiva kohti oikeaa betonin termistä diffusiviteettiä α . Akselin kautta viiva viedään jäähdytysputken pituuden L kohdalle ja siitä edelleen suoraan kohti diagrammin pystyakselia. Tästä kohdasta piirretään vaakasuora viiva vasemmalle. (27, s.17.)

Pystysuora viiva piirretään aloittamalla putkien rivivälillä S kohti termistä diffusiviteettiä α . Yläakselin kautta viiva viedään kohti jäähdytyksen pituutta t ja siitä edelleen kohti diagrammin ylävaaka-akselia.

Tästä viiva piirretään pystysuorassa alaspäin, kunnes vaaka- ja pystysuoraviiva kohtaavat. Leikkauspisteestä luetaan suhdeluku θ_m/θ_o . (27, s.17.) Suhdeluku on määritelty kaavassa 6.

KAAVA 6. Suhdeluvun θ_m/θ_o määritelmä (27, s.17.)

$$\frac{\theta_m}{\theta_o} = \frac{T_{c.2} - T_{w.1}}{T_{c.1} - T_{w.1}}$$

θ_m = betonin lopullisen keskilämpötilan ja veden alkulämpötilan erotus (°C)

θ_o = betonin alkulämpötilan ja veden alkulämpötilan erotus (°C)

$T_{c.2}$ = betonin lopullinen lämpötila (°C)

$T_{c.1}$ = betonin jäähdyttämätön lämpötila (°C)

$T_{w.1}$ = veden alkulämpötila, eli putkistoon sisään virtaavan veden lämpötila (°C)

Kaavasta 6 voidaan johtaa kaava 7, josta selviää betonin lopullinen lämpötila jäähdytyksen jälkeen.

KAAVA 7. Betonin lämpötila jäähdytyksen jälkeen

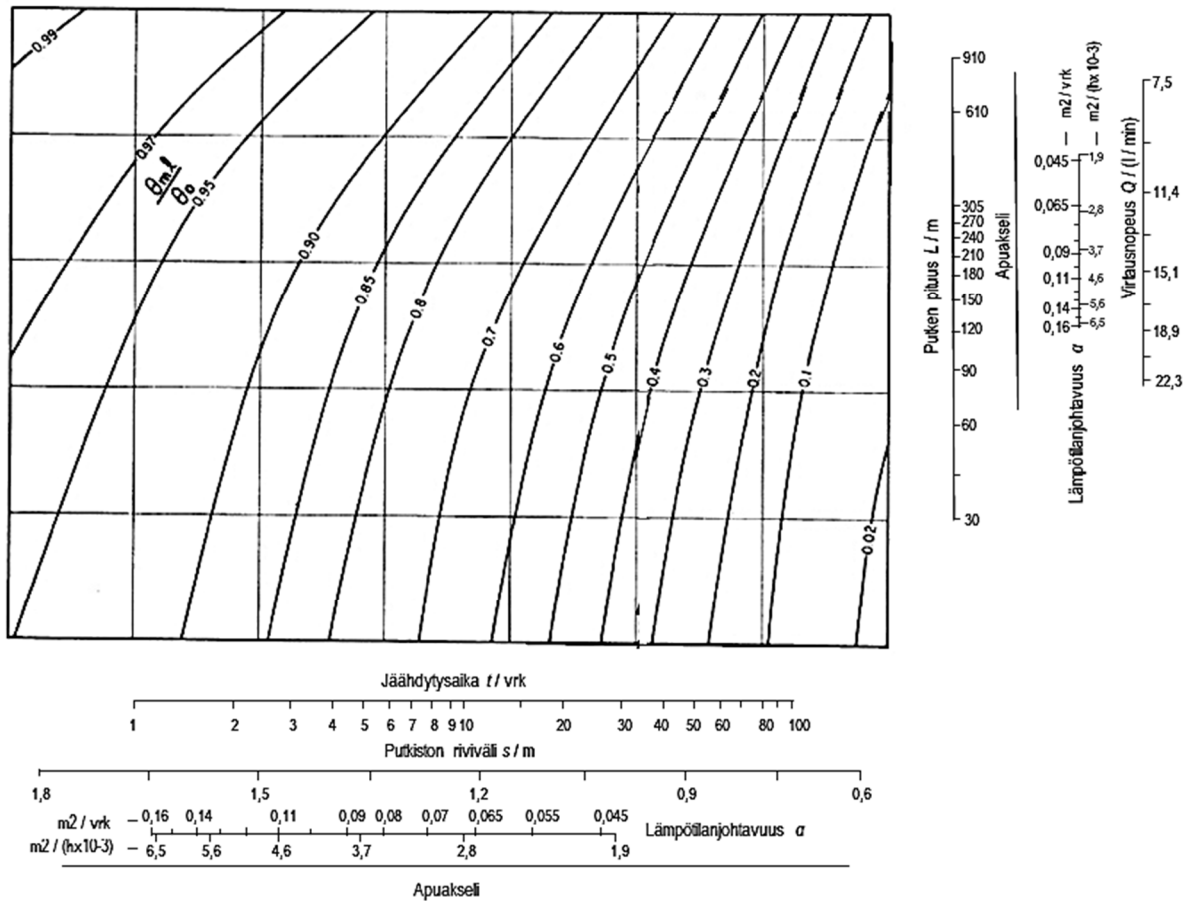
$$T_{c.2} = \frac{\theta_m}{\theta_o} (T_{c.1} - T_{w.1}) + T_{w.1}$$

Jäähdytysprosessin edetessä betonin loppulämpötila ajanhetkellä t muuttuu. Tulokset kootaan Excel-
taulukkoon, jossa esitetään taulukon 7 mukaiset arvot.

TAULUKKO 7. Betonin lopullisen lämpötilan tulosten koonti Excel-taulukkoon

Aika t / h	Betonin jäähdyttämätön lämpötila $T_{c.1} / ^\circ C$	Veden alkulämpötila $T_{w.1} / ^\circ C$	Betonin ja veden alkulämpötilaero $^\circ C$	Betonin lopullinen lämpötila $T_{c.2} / ^\circ C$
t_1	$T_{c.1}(t_1)$	$T_{w.1}(t_1)$	$T_{c.1}(t_1) - T_{w.1}(t_1)$	$T_{c.2}(t_1)$
$t_2 = t_1 + \Delta t$	$T_{c.1}(t_2)$	$T_{w.1}(t_2)$	$T_{c.1}(t_2) - T_{w.1}(t_2)$	$T_{c.2}(t_2)$
$t_n = t_{n-1} + \Delta t$	$T_{c.1}(t_n)$	$T_{w.1}(t_n)$	$T_{c.1}(t_n) - T_{w.1}(t_n)$	$T_{c.2}(t_n)$

Kuvassa 19 betonin lopullisen keskilämpötilan selvittäminen voidaan paikallistaa haluttuun jäädytysputken kohtaan. Kaaviota luetaan, kuten kuvan 18 kaaviota, mutta piirrettyjen viivojen leikkauspisteestä luetaan suhdeluku θ_{ml}/θ_o (kaava 8)



KUVA 19. Betonin keskimääräinen loppulämpötila halutussa putken kohdassa (27, s. 18)

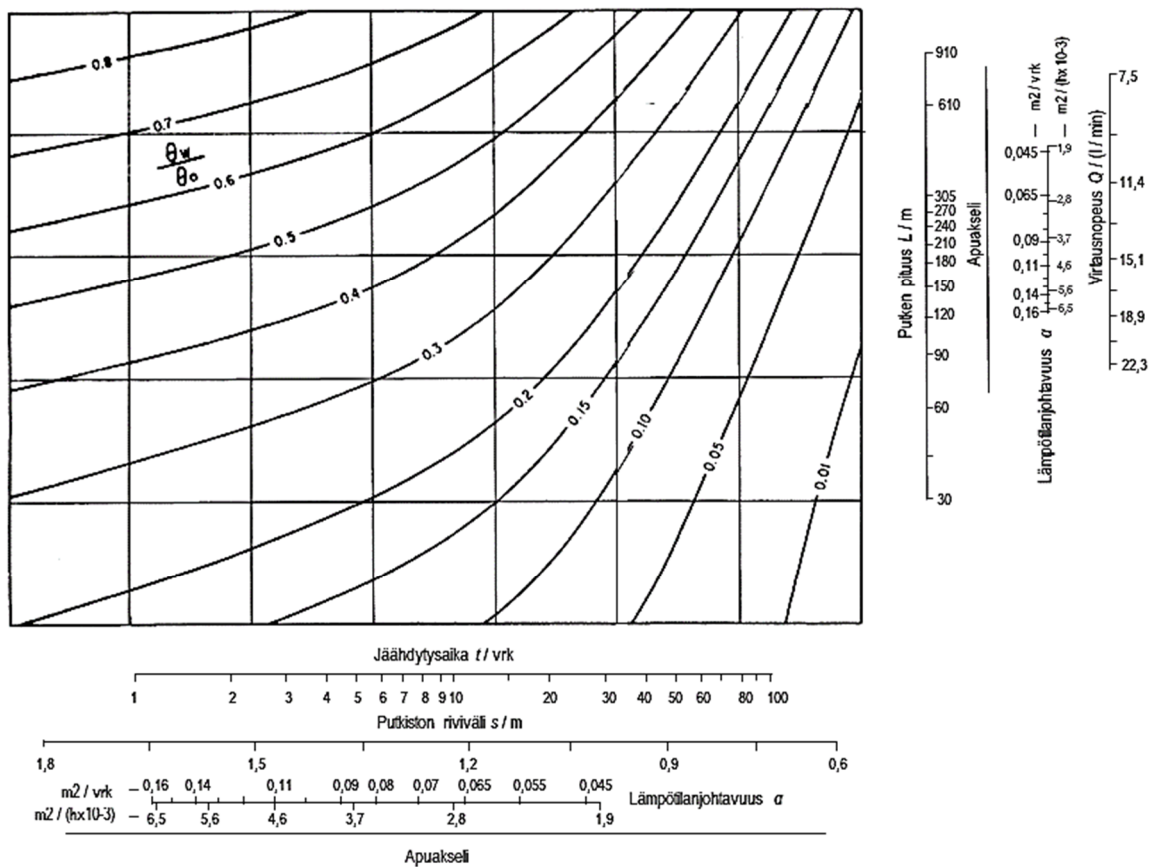
KAAVA 8. Suhdeluvun θ_{ml}/θ_o määritelmä (26, s. 18)

$$\frac{\theta_{ml}}{\theta_o} = \frac{T_{c.2.l} - T_{w.1}}{T_{c.1} - T_{w.1}}$$

$T_{c.2.l}$ = Betonin lämpötila putken kohdassa l (°C)

Kolmas käyttökohte ACI-menetelmälle on selvittää putkistosta poistuvan veden lämpötila. Tämä tulee tarpeeseen, kun halutaan varmistaa koko rakenteen riittävä jäähtyminen. Vesi lämpenee putkiston matkalta betonin hydrataation vaikutuksesta. Jotta varmistutaan siitä, että betonin lämpötilaerot ja maksimilämpötila pysyvät sallituissa rajoissa (luku 2.1) tulee jäädytysveden lämpötila selvittää. (27, s.19.)

Putkistosta poistuvan veden lämpötila saadaan kuvassa 20 olevasta kaaviosta. Leikkauspisteeseen päädytään samalla tavalla, kuin kuvissa 18 ja 19.



KUVA 20. Poistuloveden lämpötila (27, s.19)

Leikkauspisteestä saatu suhdeluku θ_w/θ_o on määriteltä kaavassa 9.

KAAVA 9. Suhdeluku θ_w/θ_o (26, s.19)

$$\frac{\theta_w}{\theta_o} = \frac{T_{w.2} - T_{w.1}}{T_{c.1} - T_{w.1}}$$

$T_{w.2}$ = putkistosta poistuvan veden lämpötila (°C)

Kaavasta 9 voidaan ratkaista poistuvan veden lämpötilä. Poistuvan veden lämpötilän ratkaisu on esitetty kaavassa 10.

KAAVA 10. Poistuvan veden lämpötilä

$$T_{w.2} = \frac{\theta_w}{\theta_o} (T_{c.1} - T_{w.1}) + T_{w.1}$$

Jäähdytysprosessin kuluessa poistuloveden lämpötilä muuttuu. Tulokset kootaan taulukon 8 mukaiseen Excel-*taulukko*on.

TAULUKKO 8. Poistuloveden lämpötilän muutos

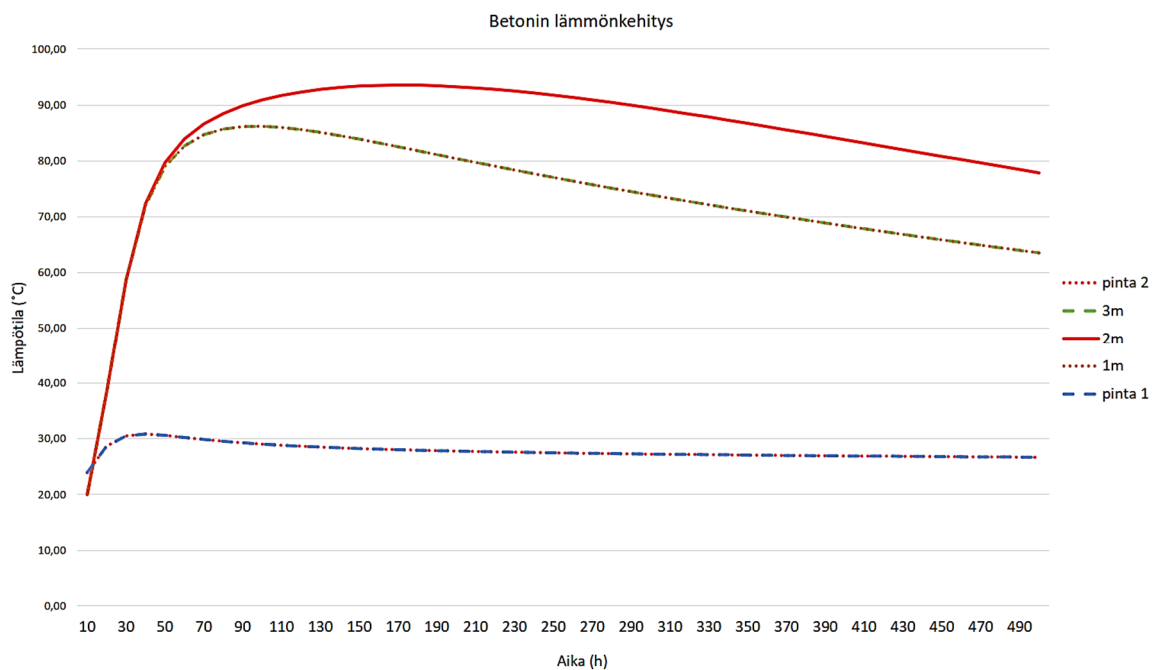
Aika t / h	Betonin alkulämpötilä $T_{c.1} / ^\circ C$	Veden alkulämpötilä $T_{w.1} / ^\circ C$	Betonin ja veden alkulämpötiläero $^\circ C$	Poistuloveden lämpötilä $T_{w.2} / ^\circ C$
t_1	$T_{c.1} (t_1)$	$T_{w.1} (t_1)$	$T_{c.1} (t_1) - T_{w.1} (t_1)$	$T_{w.2} (t_1)$
$t_2 = t_1 + \Delta t$	$T_{c.1} (t_2)$	$T_{w.1} (t_2)$	$T_{c.1} (t_2) - T_{w.1} (t_2)$	$T_{w.2} (t_2)$
$t_n = t_{n-1} + \Delta t$	$T_{c.1} (t_n)$	$T_{w.1} (t_n)$	$T_{c.1} (t_n) - T_{w.1} (t_n)$	$T_{w.2} (t_n)$

5 JÄÄHDYTYSPUTKISTON LASKENTA

Selvitetään ACI-menetelmän käyttöä esimerkkitapauksessa. Tapaus on kuvitteellinen 30 x 4 x 20 m kokoinen rakenne. Esimerkkitalauksen betonin ja valujan ominaisuudet ovat seuraavanlaiset:

- Sementin määrä 312 kg/m³
- Vesimäärä 165 kg/m³
- Ominaislämpökapasiteetti 750 J/(kgK)
- kuivatiheys ρ 2 200 kg/m³
- betonin lämmönjohtavuus λ 1,65 W/(mK)
- Valujan ulkolämpötila 20 °C.

Betonin lämpötilankehitys selvitettiin Lund yliopiston tarjoamalla Hacon 3-ohjelmalla (23). Rakenteen laskettu lämpötilankehitys ilman putkistojäähdytystä on esitetty kuvassa 21. Lämpötila on laskettu metrin välein kappaleen keskikohdassa.



KUVA 21. Betonirakenteen lämpötilankehitys kappaleen keskellä eri syvyyksillä (23)

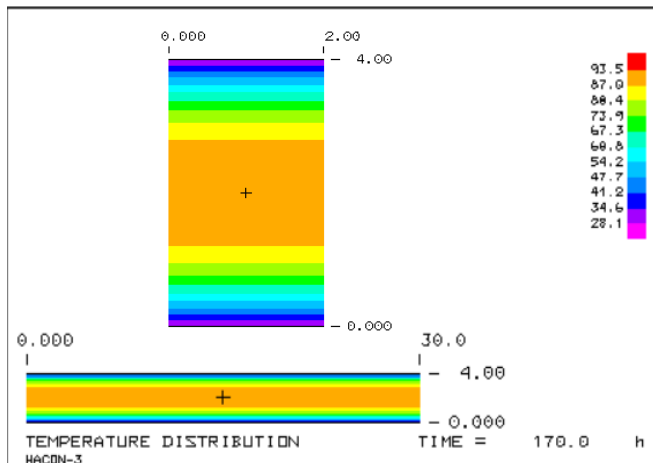
Rakenteen keskikohdassa, eri korkeuksilla lasketut lämpötilat on esitetty kokonaisuudessaan taulukossa 9.

TAULUKKO 9. Esimerkkitapauksen lämpötilat keskellä rakennetta eri korkeuksilla

Aika / h	alapinta / °C	1 m / °C	2 m / °C	3 m / °C	yläpinta / °C
10	23,94	20,02	20,00	20,02	23,94
20	28,69	38,43	38,48	38,43	28,69
30	30,54	58,67	58,71	58,67	30,54
40	30,87	72,02	72,35	72,02	30,87
50	30,63	79,00	79,70	79,00	30,63
60	30,25	82,68	83,91	82,68	30,25
70	29,88	84,66	86,60	84,66	29,88
80	29,56	85,69	88,48	85,69	29,56
90	29,29	86,13	89,85	86,13	29,29
100	29,05	86,18	90,90	86,18	29,05
110	28,85	85,97	91,70	85,97	28,85
120	28,68	85,59	92,32	85,59	28,68
130	28,52	85,09	92,79	85,09	28,52
140	28,38	84,51	93,13	84,51	28,38
150	28,26	83,87	93,36	83,87	28,26
160	28,15	83,20	93,49	83,20	28,15
170	28,05	82,51	93,54	82,51	28,05
180	27,96	81,81	93,51	81,81	27,96
190	27,88	81,11	93,42	81,11	27,88
200	27,80	80,41	93,26	80,41	27,80
210	27,73	79,71	93,05	79,71	27,73
220	27,67	79,02	92,79	79,02	27,67
230	27,60	78,35	92,48	78,35	27,60
240	27,55	77,68	92,14	77,68	27,55
250	27,49	77,02	91,75	77,02	27,49
260	27,44	76,37	91,34	76,37	27,44
270	27,40	75,73	90,90	75,73	27,40
280	27,35	75,11	90,44	75,11	27,35
290	27,31	74,49	89,95	74,49	27,31
300	27,27	73,89	89,44	73,89	27,27
310	27,23	73,29	88,92	73,29	27,23
320	27,19	72,71	88,38	72,71	27,19
330	27,15	72,13	87,83	72,13	27,15
340	27,12	71,57	87,28	71,57	27,12
350	27,09	71,01	86,71	71,01	27,09
360	27,06	70,46	86,13	70,46	27,06
370	27,02	69,92	85,55	69,92	27,02
380	26,99	69,39	84,96	69,39	26,99
390	26,97	68,86	84,37	68,86	26,97
400	26,94	68,34	83,78	68,34	26,94
410	26,91	67,83	83,18	67,83	26,91
420	26,88	67,33	82,59	67,33	26,88
430	26,86	66,83	81,99	66,83	26,86
440	26,83	66,33	81,39	66,33	26,83
450	26,81	65,85	80,80	65,85	26,81
460	26,79	65,37	80,20	65,37	26,79
470	26,76	64,90	79,61	64,90	26,76
480	26,74	64,43	79,02	64,43	26,74
490	26,72	63,97	78,43	63,97	26,72
500	26,69	63,51	77,85	63,51	26,69

Betonin lämpötila muotin keskipisteessä syvyydellä 2 m nousisi laskelmien mukaan maksimissaan arvoon 93,5 °C. Lämpötila pysyy yli 60 °C:ssa useita viikkoja. Lämpötilaero kappaleessa kohoaa myös yli 20 °C/m, jolloin rakenteessa on riski halkeamien syntymiselle. Kriittiset lämpötilat on listattu luvussa 2.1.

Kuvassa 22 esitetään betonirakenteen lämpötilan jakautuminen esimerkkikappaleessa ajanhetkellä 170 h. Kyseinen ajanhetki vastaa maksimilämpötilan esiintymishetkeä.



KUVA 22. Lämpötilojen esiintyminen kappaleessa. (23)

Suunnitellaan jäähdytysputkisto maksimilämpötilan mukaan, eli kappaleen keskipisteessä. Jäähdytysputkiston suunnittelu aloitetaan tarvittavien lähtötietojen määrittämisellä. Osa tiedoista voidaan arvioida ensimmäisellä laskentakierroksella ja tarkentaa saatujen tulosten mukaan. Tarvitavat tiedot on listattu luvussa 5.2. Putkisto suunnitellaan ACI 207.4R-raportin suosittelemalle putkelle, jonka sisähalkaisija on 25 mm. Jäähdytysneste virtaa putkessa virtausnopeudella 15 l/min.

Ensimmäinen laskentakierros

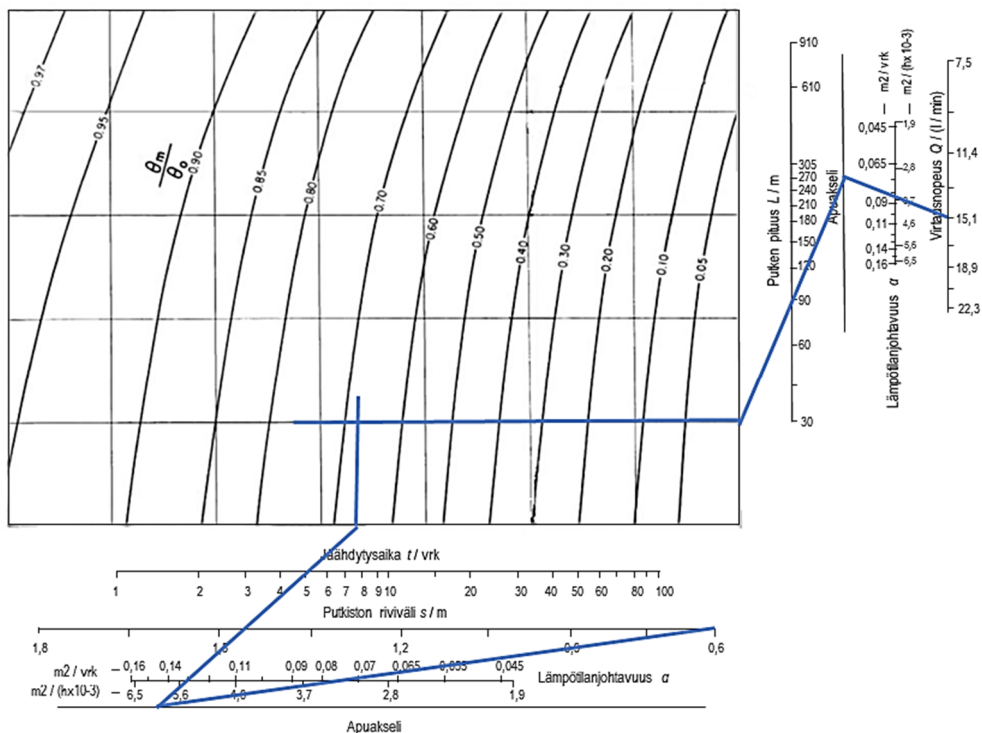
Aloitetaan ensimmäinen laskentakierros esimerkkitapaukselle seuraavilla arvoilla:

- veden virtausnopeus $Q = 15$ l/min
- putken pituus $L = 90$ m
- putkiston riviväli $S = 0,6$ m
- jäähdytystarpeen pituus $t = 5$ vrk
- veden alkulämpötila $T_{w,1} = 20$ °C.

Betonin ominaislämpökapasiteetti on 750 J/(kgK). Kun betonin kuivatiheys ρ on 2 200 kg/m³ betonin lämmönjohtavuus λ on 1,65 W/(mK). (28, s.151) Tällöin saadaan betonin termiseksi diffusiviteetiksi α (kaava 5)

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} = \frac{1,65 \left(\frac{W}{mK} \right)}{2200 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \times 750 \left(\frac{J}{kgK} \right)} = 1,0 \times 10^{-6} \left(\frac{m^2}{s} \right) = 3,6 \left(\frac{m^2}{h} 10^{-3} \right)$$

Betonin keskilämpötilan selvittämiseksi piirretään kuvassa 18 esitettyyn kuvioon vaaka- ja pystysuorat viivat. Tulos on esitetty kuvassa 23.



KUVA 23. Ensimmäisen laskentakierroksen kuvio

Leikkauspisteestä saadaan suhdeluvuksi $\frac{\theta_m}{\theta_o} = 0,68$, josta kaavan 7 mukaisesti voidaan johtaa betonin loppulämpötila:

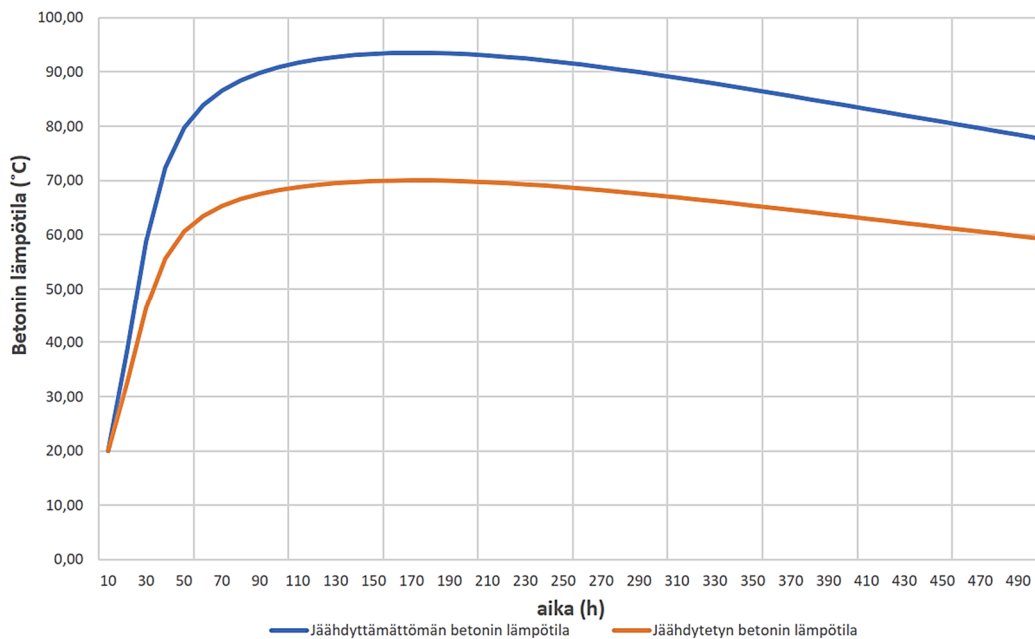
$$T_{c,2} = 0,68(T_{c,1} - T_{w,1}) + T_{w,1}$$

Laskentatulokset kirjataan taulukon 7 mukaisesti Excel-tiedostoon. Taulukko 10 esittää ensimmäisen laskentakierroksen taulukoidut tulokset.

TAULUKKO 10. Ensimmäisen laskentakierroksen taulukoidut tulokset

Aika / h	Betonin jäädyttämätön lämpötila $T_{c,1} / ^\circ\text{C}$	Veden alkulämpötila $T_{w,1} / ^\circ\text{C}$	Alkulämpötilaero $/ ^\circ\text{C}$	Betonin lopullinen lämpötila $T_{c,2} / ^\circ\text{C}$
10	20,00	20	0,00	20,00
20	38,48	20	18,48	32,57
30	58,71	20	38,71	46,32
40	72,35	20	52,35	55,60
50	79,70	20	59,70	60,60
60	83,91	20	63,91	63,46
70	86,60	20	66,60	65,29
80	88,48	20	68,48	66,56
90	89,85	20	69,85	67,50
100	90,90	20	70,90	68,21
110	91,70	20	71,70	68,76
120	92,32	20	72,32	69,18
130	92,79	20	72,79	69,50
140	93,13	20	73,13	69,73
150	93,36	20	73,36	69,88
160	93,49	20	73,49	69,98
170	93,54	20	73,54	70,01
180	93,51	20	73,51	69,99
190	93,42	20	73,42	69,93
200	93,26	20	73,26	69,82
210	93,05	20	73,05	69,67
220	92,79	20	72,79	69,50
230	92,48	20	72,48	69,29
240	92,14	20	72,14	69,05
250	91,75	20	71,75	68,79
260	91,34	20	71,34	68,51
270	90,90	20	70,90	68,21
280	90,44	20	70,44	67,90
290	89,95	20	69,95	67,57
300	89,44	20	69,44	67,22
310	88,92	20	68,92	66,87
320	88,38	20	68,38	66,50
330	87,83	20	67,83	66,13
340	87,28	20	67,28	65,75
350	86,71	20	66,71	65,36
360	86,13	20	66,13	64,97
370	85,55	20	65,55	64,57
380	84,96	20	64,96	64,17
390	84,37	20	64,37	63,77
400	83,78	20	63,78	63,37
410	83,18	20	63,18	62,97
420	82,59	20	62,59	62,56
430	81,99	20	61,99	62,15
440	81,39	20	61,39	61,75
450	80,80	20	60,80	61,34
460	80,20	20	60,20	60,94
470	79,61	20	59,61	60,54
480	79,02	20	59,02	60,13
490	78,43	20	58,43	59,73
500	77,85	20	57,85	59,34

Kuva 24 esittää betonin lämmönkehityksen muotin keskipisteessä ensimmäisen laskentakierroksen mukaisella jäähdytysputkistolla sekä ilman jäähdytystä. Taulukosta 10 ja kuvasta 24 on helppo huomata, että betonin maksimilämpötilaa saatiin putkistojäähdytyksellä laskettua 93,5 °C:sta 70 °C:een. Vaikka maksimilämpötilaa ei saatu alennettua alle 60 °C:een on jäähdytysteho silti huomattava.



KUVA 24. Betonin keskimääräinen lämpötilankehitys ilman jäähdytystä ja putkistojäähdytyksellä ensimmäisen laskentakierroksen tuloksilla

Betonin lämpötila pysyi yli 60 °C:ssa kuitenkin useamman vuorokauden. Seuraavalla kierroksella pyritään lyhentämään korkean lämpötilan ajanjaksoa ja edelleen madaltamaan maksimilämpötilaa.

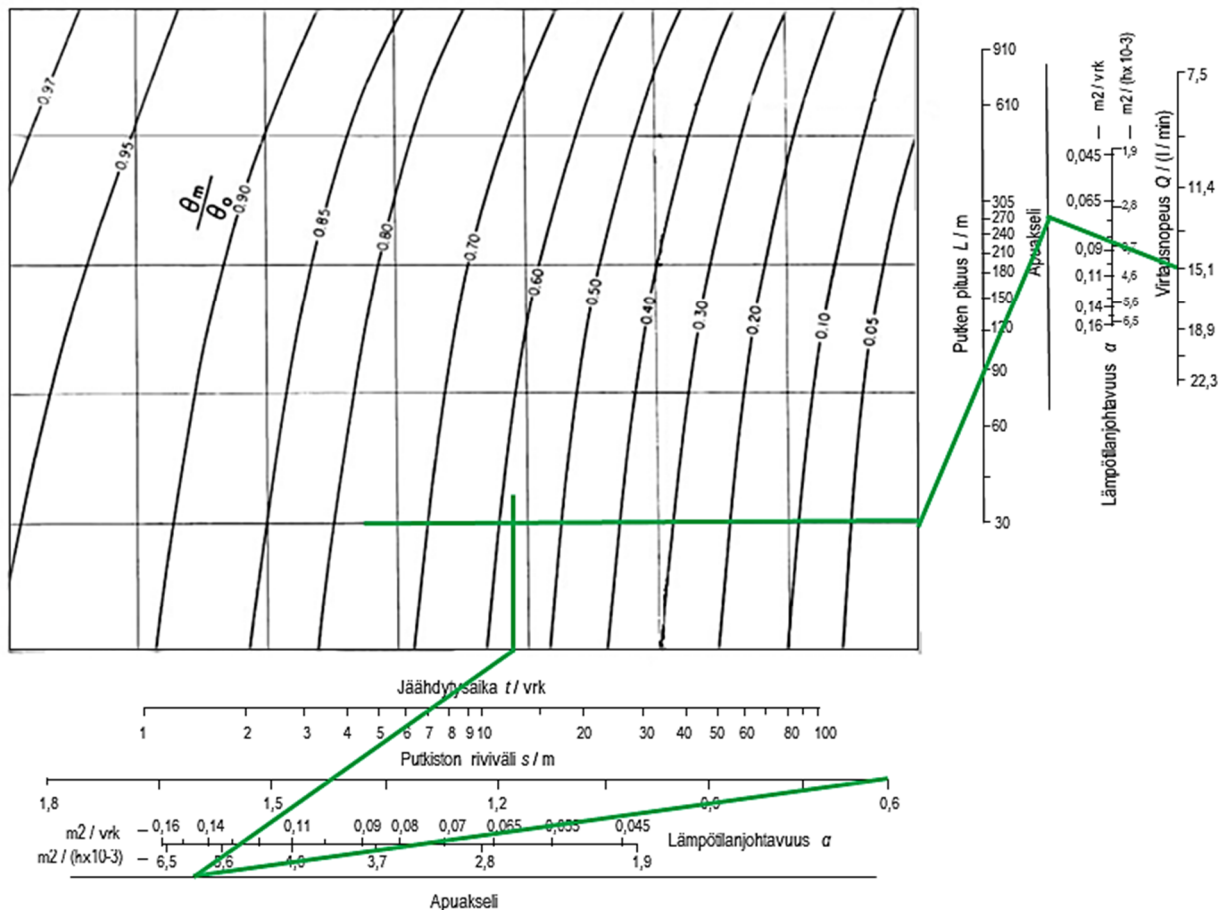
Toinen laskentakierros

Jäähdytyksen tehoa koitetaan parantaa muutamaa lähtötietoa muuttamalla. Lisätään jäähdytyksen pituutta 7 vuorokauteen ja lasketaan veden lämpötilaa 10 °C:een. Veden lämpötilaa voidaan työmaalla laskea esimerkiksi nestemäisen tynen avulla. Lasketaan betonin loppulämpötila jäähdytysputkistolla seuraavilla lähtötiedoilla:

- veden virtausnopeus $Q = 15 \text{ l/min}$
- putken pituus $L = 90 \text{ m}$

- putkiston riviväli $S = 0,6$ m
- betonin terminen diffusiviteetti $\alpha = 3,6$ m²/h \cdot 10⁻³
- jäädytystarpeen pituus $t = 7$ vrk
- veden alkulämpötila $T_{w,1} = 15$ °C.

Piirretään lähtötietojen mukaan kuvan 18 mukaiseen kaavioon vaaka- ja pystysuorat viivat. Tulos on esitetty kuvassa 25.



KUVA 25. Toisen laskentakierroksen kuvio

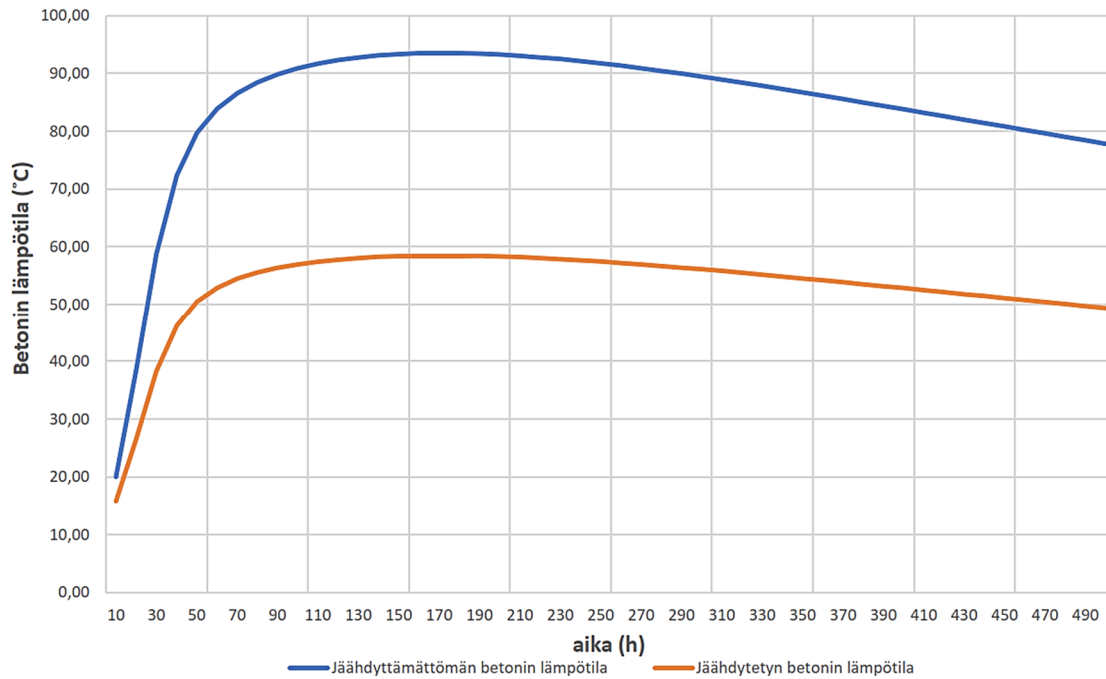
Leikkauspisteestä saadaan suhdeluvuksi $\frac{\theta_m}{\theta_0} = 0,58$, josta kaavan 7 mukaisesti voidaan johtaa betonin loppulämpötila:

$$T_{c,2} = 0,58(T_{c,1} - T_{w,1}) + T_{w,1}$$

Toisen laskentakierroksen taulukointi antaa lupaavia tuloksia. Maksimilämpötila pysyy alle 60 °C:ssa. Tulokset on esitetty taulukossa 11 ja kuvassa 26.

TAULUKKO 11. Toisen laskentakierroksen taulukoidut tulokset

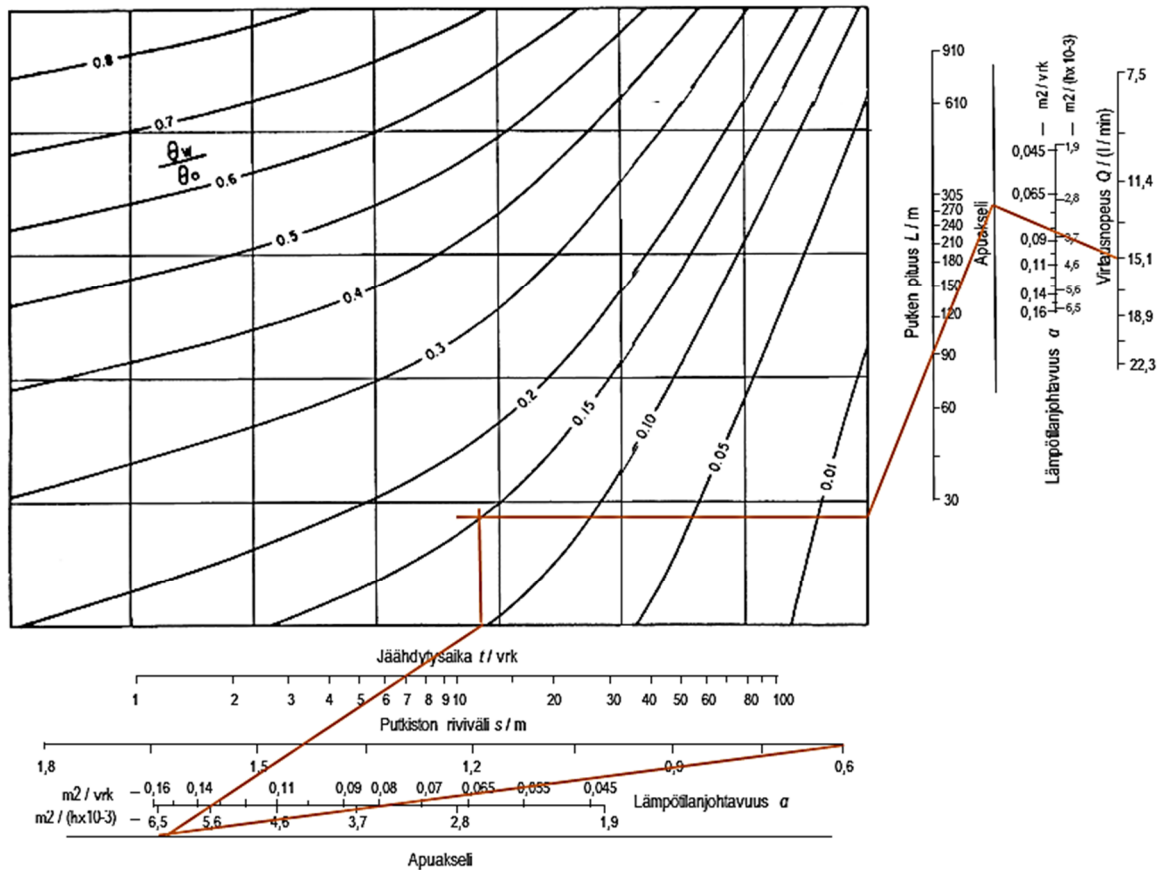
Aika / h	Betonin jäädyttämätön lämpötila $T_{c,1} / ^\circ\text{C}$	Veden alkulämpötila $T_{w,1} / ^\circ\text{C}$	Alkulämpötilaero $/ ^\circ\text{C}$	Betonin lopullinen lämpötila $T_{c,2} / ^\circ\text{C}$
10	20,00	10	10,00	15,80
20	38,48	10	28,48	26,52
30	58,71	10	48,71	38,25
40	72,35	10	62,35	46,16
50	79,70	10	69,70	50,43
60	83,91	10	73,91	52,87
70	86,60	10	76,60	54,43
80	88,48	10	78,48	55,52
90	89,85	10	79,85	56,32
100	90,90	10	80,90	56,92
110	91,70	10	81,70	57,39
120	92,32	10	82,32	57,75
130	92,79	10	82,79	58,02
140	93,13	10	83,13	58,21
150	93,36	10	83,36	58,35
160	93,49	10	83,49	58,43
170	93,54	10	83,54	58,45
180	93,51	10	83,51	58,44
190	93,42	10	83,42	58,38
200	93,26	10	83,26	58,29
210	93,05	10	83,05	58,17
220	92,79	10	82,79	58,02
230	92,48	10	82,48	57,84
240	92,14	10	82,14	57,64
250	91,75	10	81,75	57,42
260	91,34	10	81,34	57,18
270	90,90	10	80,90	56,92
280	90,44	10	80,44	56,65
290	89,95	10	79,95	56,37
300	89,44	10	79,44	56,08
310	88,92	10	78,92	55,77
320	88,38	10	78,38	55,46
330	87,83	10	77,83	55,14
340	87,28	10	77,28	54,82
350	86,71	10	76,71	54,49
360	86,13	10	76,13	54,16
370	85,55	10	75,55	53,82
380	84,96	10	74,96	53,48
390	84,37	10	74,37	53,14
400	83,78	10	73,78	52,79
410	83,18	10	73,18	52,45
420	82,59	10	72,59	52,10
430	81,99	10	71,99	51,75
440	81,39	10	71,39	51,41
450	80,80	10	70,80	51,06
460	80,20	10	70,20	50,72
470	79,61	10	69,61	50,37
480	79,02	10	69,02	50,03
490	78,43	10	68,43	49,69
500	77,85	10	67,85	49,35



KUVA 26. Betonin keskimääräinen lämpötilankehitys ilman jäähdytystä ja putkistojäähdytyksellä toisen laskentakierroksen tuloksilla

Laskentakierroksen 2 mukainen jäähdytysputkisto olisi siis tarpeeksi tehokas laskemaan betonin maksimilämpötilan sallittuihin rajoihin. Betonin lämpötila kohoaisi maksimissaan lämpötilaan 58,4 °C. Tuloksia voitaisiin tehostaa entisestään lyhentämällä putken pituutta, lisäämällä virtausnopeutta, laskemalla veden lämpötilaa tai tiivistämällä putkien riviväliä.

Seuraavaksi lasketaan jäähdytysveden lämpötilaero jäähdytyskierroksen alussa ja lopussa. Tähän käytetään kuvan 20 mukaista kaaviota. Tulos on esitetty kuvassa 27.



KUVA 27. Poistuloveden lämpötilan suhdeluku

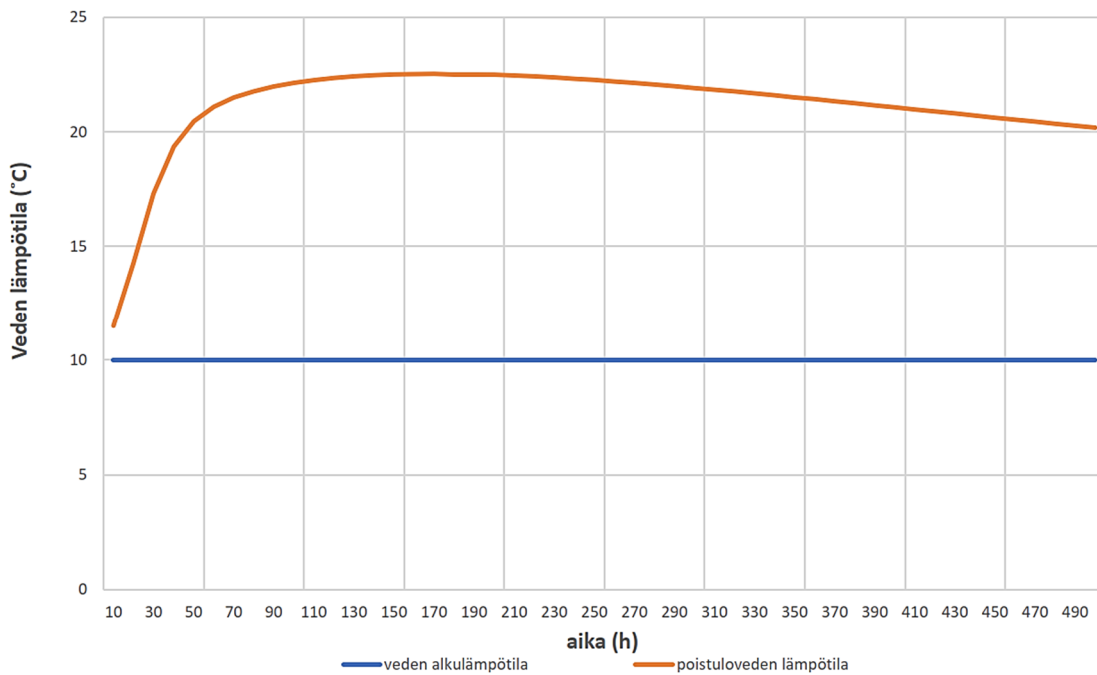
Leikkauspisteestä saadaan suhdeluku $\frac{\theta_w}{\theta_o} = 0,15$. Kaavan 10 mukaan lasketaan poistuvan veden lämpötila.

$$T_{w,2} = 0,15(T_{c,1} - T_{w,1}) + T_{w,1}$$

Tulokset kootaan taulukon 8 mukaiseen Excel-taulukkoon. Tulokset on esitetty taulukossa 12 ja kuvassa 28.

TAULUKKO 12. Veden lämpötilaero putkessa

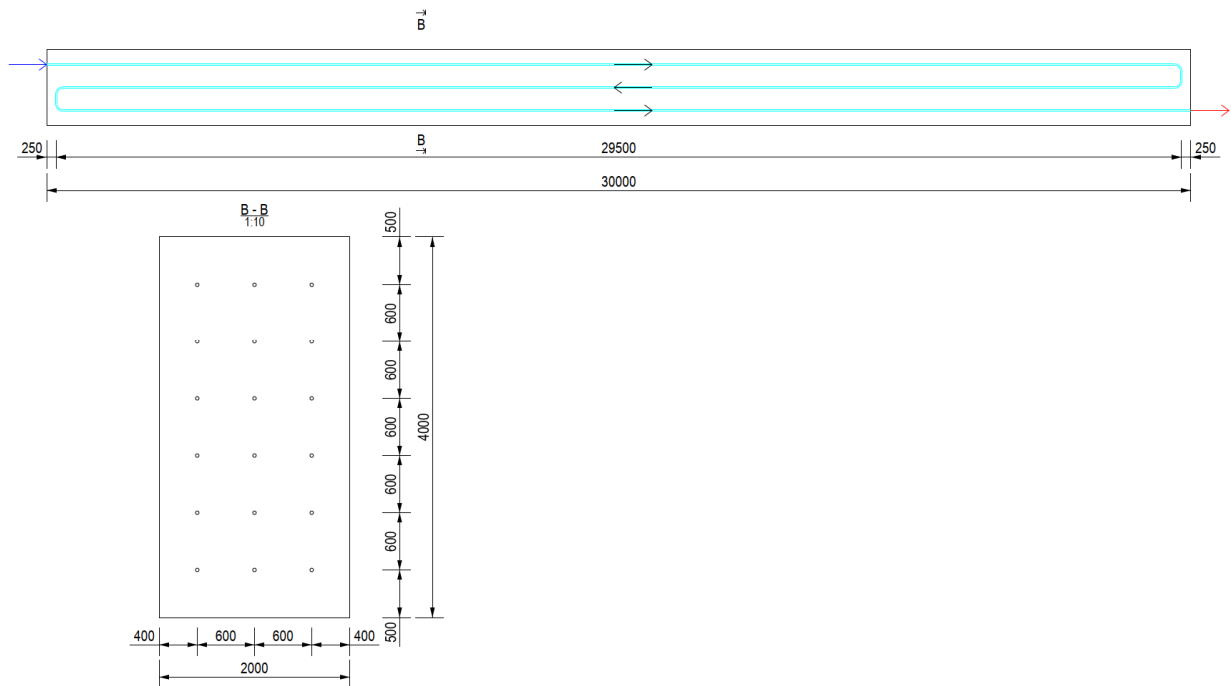
Aika / h	Betonin jäädyttämätön lämpötila $T_{c,1} / ^\circ\text{C}$	Veden alkulämpötila $T_{w,1} / ^\circ\text{C}$	Alkulämpötilaero $/ ^\circ\text{C}$	Poistuloveden lämpötila $T_{w,2} / ^\circ\text{C}$
10	20,00	10	10,00	11,5
20	38,48	10	28,48	14,3
30	58,71	10	48,71	17,3
40	72,35	10	62,35	19,4
50	79,70	10	69,70	20,5
60	83,91	10	73,91	21,1
70	86,60	10	76,60	21,5
80	88,48	10	78,48	21,8
90	89,85	10	79,85	22,0
100	90,90	10	80,90	22,1
110	91,70	10	81,70	22,3
120	92,32	10	82,32	22,3
130	92,79	10	82,79	22,4
140	93,13	10	83,13	22,5
150	93,36	10	83,36	22,5
160	93,49	10	83,49	22,5
170	93,54	10	83,54	22,5
180	93,51	10	83,51	22,5
190	93,42	10	83,42	22,5
200	93,26	10	83,26	22,5
210	93,05	10	83,05	22,5
220	92,79	10	82,79	22,4
230	92,48	10	82,48	22,4
240	92,14	10	82,14	22,3
250	91,75	10	81,75	22,3
260	91,34	10	81,34	22,2
270	90,90	10	80,90	22,1
280	90,44	10	80,44	22,1
290	89,95	10	79,95	22,0
300	89,44	10	79,44	21,9
310	88,92	10	78,92	21,8
320	88,38	10	78,38	21,8
330	87,83	10	77,83	21,7
340	87,28	10	77,28	21,6
350	86,71	10	76,71	21,5
360	86,13	10	76,13	21,4
370	85,55	10	75,55	21,3
380	84,96	10	74,96	21,2
390	84,37	10	74,37	21,2
400	83,78	10	73,78	21,1
410	83,18	10	73,18	21,0
420	82,59	10	72,59	20,9
430	81,99	10	71,99	20,8
440	81,39	10	71,39	20,7
450	80,80	10	70,80	20,6
460	80,20	10	70,20	20,5
470	79,61	10	69,61	20,4
480	79,02	10	69,02	20,4
490	78,43	10	68,43	20,3
500	77,85	10	67,85	20,2



KUVA 28. Jäähdytysputkessa virtaavan veden lämpötilaero sisään- ja ulosvirtauspäissä

Veden lämpötilanmuutoksen voidaan huomata seuraavan betonin lämpötilanmuutosta. Betonin maksimilämpötilan kohdalla, noin ajanhetkellä 150 ... 190 h voidaan todeta myös ulostuloveden olevan lämpimimmillään. Vesi yltää maksimissaan lämpötilaan 22,5 °C putken lopussa betonin lämpötilan ollessa 58,4 °C.

Putkien rivivälin ollessa 600 mm saadaan esimerkkirakenteeseen järkevä putkisto siten, että asennetaan jokaiseen putkistokerrokseen kolme putkea. Jäähdytysputki kerroksia asennetaan yhteensä kuusi. Putkien asettele rakenteeseen voidaan suunnitella monella tapaa. Kuvassa 29 on esitetty yksi vaihtoehto.



KUVA 29. Jäähdytysputkiston asennus rakenteeseen

Koska jäähdytysteho laskettiin 90 m pitkällä putkella, tulee se kiertämään rakenteessa edestakaisin. Hacon 3-ohjelmalla on mahdollista mallintaa kappaleen lämpötilankehitys jäähdytysputkilla, kunhan putki kulkee suorana poikkileikkauksen läpi. ACI-menetelmällä lyhyempien, kuin 60 m pitkien putkien jäähdytystehon laskenta ei onnistu, sillä putken pituuden alittaessa 60 m syntyisi vaaka- ja pystysuorienviivojen leikkauspiste kaavion ulkopuolelle. Hacon 3-ohjelmalla putken pituus voidaan määrittää niin lyhyeksi, kuin tarpeen.

6 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tehdä kooste betonin hydrataatiolämpöön vaikuttavista tekijöistä. Lisäksi tavoitteena oli kirjata erilaisia mahdollisuuksia alentaa betonin maksimilämpötilaa ja betonirakenteen lämpötilaeroja.

Hienojakoinen sementti, korkea vesi-sementtiisuhde ja valulämpötila sekä suuri määrä nopeasti reagoivia aliitti ja aluminaatti klinkkereitä sementissä nostavat betonin hydrataatiolämpöä. Lämpölaajenemisesta johtuva halkeilu on massiivibetonirakenteille yleinen ongelma. Lämpötilaerot tulee pitää alle 20 °C/m, eikä betonin lämpötilan tulisi kohota yli 60 °C:een. Tätä korkeammilla lämpötiloilla on heikentävä vaikutus betonin lujuuteen ja säilyvyyteen.

Betonin seosaineista masuunikuonajauhe on hyvä lisä betonireseptiin massiivibetonikohteissa. Karkean kiviaineksen määrän kasvattaminen ja kiviaineksen viilentäminen ennen betonin sekoitusta ovat lisäkeinoja alentaa betonin maksimilämpötilaa. Myös betoniin tulevaa vettä voidaan viilentää lähelle jäätymispistettä. Osa vedestä voidaan myös korvata jäällä. Valmista betoniseosta on mahdollista jäähdyttää ennen valua esimerkiksi nestemäisen typen avulla.

Betonin valunaikana asennettava jäähdytysputkisto alentaa betonin maksimilämpötilaa tehokkaasti. Ongelmaksi muodostuu ACI-menetelmän epätarkkuus erityisesti, jos menetelmää tarkastellaan arvioitujen betonin lämpötilojen pohjalta. Lisäksi manuaalinen kaavioiden tulkitseminen aiheuttaa lopputulokseen virhettä. Menetelmällä voidaan laskea jäähdytysputkisto, jonka yhden putken pituus ylittää 60 m. Tätä lyhyemmille putkille tulee käyttää jotakin muuta menetelmää, esimerkiksi Hacon 3-laskentaohjelmaa.

Jäähdytysputkisto voidaan toteuttaa myös ilmakiertoisena. Kyseinen menetelmä voisi toimia hyvin kohteissa, joissa veden saaminen työmaalle on haastavaa ja vettä pitäisi jäähdyttää voimakkaasti aina jäähdytyskerrosten välissä. Ilmakiertoisen jäähdytysputkiston teho ei ole niin voimakas, kuin vesikiertoisen järjestelmän ja sen vaatimat paksummat putket eivät sovi joka kohteeseen. Menetelmä tarjoaa kuitenkin mahdollisuuksia jäähdytyskustannusten minimointiin ja on siksi jatkotutkimusten arvoinen.

LÄHTEET

1. Suomen Betoniyhdistys ry 2018. By 201 Betonitekniiikan oppikirja 2018. Helsinki: Suomen betoniyhdistys ry.
2. Raivio, Paula & Virola, Heli 2000. Portlandsementin hydrataatio. VTT Tiedote, Valtion teknillinen tutkimuskeskus.
3. Kettunen, Teemu 2018. Betonin kemikaalikestävyys ja suojaaminen kemikaaleilta teollisuusrakentamisessa. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö. Hakupäivä 10.11.2022.
<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/26095/Kettunen.pdf?sequence=4&isAllowed=y>.
4. Suomen Betoniyhdistys ry 2021. By 65 Betoninormit 2021. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.
5. Suomen Betoniyhdistys ry 2016. By 68 Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu - opas suunnittelijoille 2016. Helsinki: Suomen betoniyhdistys ry.
6. Suomen Betoniyhdistys ry 1987. By 23 Seosaineiden käyttö betonirakenteissa 1987. Vaasa: Suomen Betoniyhdistys ry.
7. Suomen standardisoimisliitto 2021, SFS-EN 450-1 Betoniin käytettävä lentotuhka. Osa 1: määritelmät, laatuvaatimukset ja vaatimuksenmukaisuus, Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
8. American Concrete Institute. 2002. ACI 232.2R-96 Use of Fly Ash in Concrete. Michigan, United States: American Concrete Institute.
9. Iso-Mustajärvi, Pertti 2016. RAK-32200 Betonitekniiikka. Luentomoniste, Tampereen Teknillinen Yliopisto, Tampere.
10. Nguyen, Nghia 2021. Design of pipe cooling system in massive concrete structures. Aalto University. Master's Thesis.

11. Alharthy, Samiha & Mostafa, Mostafa 2020. Mechanical and thermal characteristics of self-compacting concrete produced with blast furnace slag and fly ash. *HBRC Journal*, 16 (1), 283–298.
12. Pauku, Elina 2016. Massiivisten betonirakenteiden perusvaatimuksia. *Betoni-lehti* 86 (4), 92–99.
13. Lahtinen, Jani 2017. Massiivinen betonirakenne. Kajaanin ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Hakupäivä 20.11.2022. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/126164/Lahtinen_Jani.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
14. Bingley, Lem 2020. Valokuva. Artikkelissa Hinkley sets new concrete record despite coronavirus crisis. *Construction news*. Hakupäivä 17.04.2023. <https://www.constructionnews.co.uk/contractors/in-pictures-hinkley-sets-new-concrete-record-despite-coronavirus-crisis-01-06-2020/>.
15. Suomen Betoniyhdistys ry 2016. By 67 Betonin kutistuman ja halkeilun hallinta 2016. Helsinki: Suomen betoniyhdistys ry.
16. Suomen standardisoimisliitto 2019, SFS 5975:2019 Betonirakenteiden toteutus. Standardin SFS-EN 13670 käyttö Suomessa, Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
17. HOTCON Research Group 2014. Valokuva. Blogista Thermal Stresses, Strength, and Temperature Development in Concrete. Hakupäivä 02.05.2023. <https://blogs.qub.ac.uk/hotcon/research-significance/>.
18. American Concrete Institute 2005. ACI 207.4R-05 Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete. Michigan, United States: American Concrete Institute.
19. American Concrete Institute 2020. ACI 305R-20 Guide to Hot Weather Concreting. Michigan, United States: American Concrete Institute.
20. Sacyr 2022. Valokuva. Blogista We cool down concrete with nitrogen for the first time. Hakupäivä 11.04.2023. <https://www.sacyr.com/en/-/enfriamos-hormigon-con-nitrogeno-por-primera-vez>.

21. Kim, Soo Geun 2010. Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement. Iowa State University. Master's Thesis. Hakupäivä 12.11.2022.
<https://dr.lib.iastate.edu/hadle/20.500.12876/25881>.
22. Finnsementti Oy. Betometri. Hakupäivä 19.12.2022. <https://finnsementti.fi/betometri/>.
23. Lund University 2015. HACON – A Program for Simulation of Hardening Concrete. Hakupäivä 28.04.2023. <https://www.byggmek.lth.se/english/resources/software/hacon-a-program-for-simulation-of-hardening-concrete/>.
24. Fairbairn, Eduardo & Azenha, Miguel 2019. Thermal Cracking of Massive Concrete Structures, RILEM State-of-art Reports. Cham, Switzerland: Springer
25. Graham Construction 2019. Valokuva. Twitter kirjoituksesta 20.08.2019. Hakupäivä 17.04.2023.
<https://pbs.twimg.com/media/ECbwhDxU8AAKF0Z?format=jpg&name=large>.
26. Jalonen, Juha 2013. Levennettävän betonisillan pakkovoimien hallinta. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö. Hakupäivä 10.11.2022.
<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/21908/jalonen.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.
27. American Concrete Institute 2007. ACI 207.2R-07 Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete. Michigan, United States: American Concrete Institute.
28. RIL ry. 2023. RIL 225-2023 Rakennusosien lämmönläpäisykertoimien laskenta, Rakentamismääräyskokoelma, Helsinki: RIL ry.