

# Massiivivalubetonin nesteputkijäähdytys

**Henri Tähkänen**, dipl.ins.  
siltasuunnittelija, Sweco Oy  
henri.tahkanen@sweco.fi

**Jouni Punkki**  
professori (PoP), Betoniteknikka  
Aalto-yliopisto  
jouni.punkki@aalto.fi

**Jarkko Niiranen**  
professori (Assoc. Prof.), Rakentamisen  
laskennallinen tekniikka Aalto-yliopisto  
jarkko.niiranen@aalto.fi

Betonirakenteiden valunaikaiset korkeat lämpötilat ovat nousseet esille erityisesti infrarakenteissa. Infrarakenteet ovat usein massiivisia ja lisäksi tiukat betonin koostumusvaatimukset (erityisesti P-luku) kasvattavat tarvittavan sementin määrää. Lisäksi betonin lämpötiloihin kiinnitetään nykyään ylipäänsä entistä enemmän huomioita. Onkin varsin tavallista, että massiivisia infrarakenteita joudutaan jäädyttämään, jotta maksimilämpötilat pysyvät sallituissa rajoissa. Betoniyhdistys ry on julkaissut uuden ohjeen liittyen betonirakenteiden jäädyttämiseen: by78 Betonin jäädytystarpeen arvioiminen.

Sementin reaktiot ovat eksotermisiä eli ne tuottavat lämpöä. Ohuemmissa rakenteissa lämmöntuotto ei yleensä aiheuta ongelmia, mutta kun rakenteen ohuin mitta alkaa olla metrin luokkaa, lämpötilat saattavat nousta liian korkeiksi. Joissakin tapauksissa jo metriä ohuemmatkin rakenteet ovat riskialttiita. Betonin maksimilämpötilaan vaikuttavat rakenteiden dimensioiden lisäksi betonin koostumus ja erityisesti sementtiklinkkerin määrä, betonin lähtölämpötila valettaessa sekä jossain määrin myös ulkoilman lämpötila. Betonin maksimilämpötilaa voidaan tehokkaasti rajoittaa masuunikuonan avulla, mutta P-luku rajoittaa masuunikuonan käyttömäärää infrarakenteissa.

Artikkelissa esitellyssä diplomityössä on käsitelty betonin jäädytystä kovettumisen aikana. Mikäli massiivibetonin lämpötila kovettumisen aikana nousee liian korkeaksi ( $> +60^{\circ}\text{C}$ ), voi betonin lujuus- sekä myös säilyvyyssominaisuudet heikentyä merkittävästi. Työssä simuloidaan nesteputkistolla jäädytetyn massiivibetonin lämpötilajakaumaa, lämpöjännityksiä sekä halkeilua. Työ tulee olemaan merkittävässä roolissa kehitettäessä kansallisia ohjeita massiivisten betonirakenteiden jäädytyksen suunnitteluun.

Sekä talon- että infrarakentamisen vaatimusten mukaan betonin maksimilämpötilan tulisi pysyä alle  $+60^{\circ}\text{C}$ . Kuitenkin vielä alle  $+70^{\circ}\text{C}$  lämpötilat voidaan hyväksyä, mutta tällöin betonille on tehtävä lujuuskatolaskelmat. Mikäli lämpötila nousee yli  $+70^{\circ}\text{C}$ , tulee vaikutukset betonin lujuus- ja säilyvyyssominaisuuksiin selvittää kokeellisesti. Korkeat lämpötilat alentavat betonin lujuusominaisuuksia ja voivat aiheuttaa kosteissa olosuhteissa myöhäissyntyisen ettringiitin muodostumisen (DEF = delayed ettringite formation). Myöhäissyntyinen ettringiitti voi vaurioittaa betonirakenteen kymmenien vuosien päästä. Maksimilämpötilojen lisäksi kriittisiä ovat lämpötilaerot rakenteen sisällä, sillä lämpötilaeron kasvaessa rakenteen halkeiluriski kasvaa. Lämpötilaeron tulisi pysyä alle  $20^{\circ}\text{C}$ , mutta talon- ja infrarakentamisessa tulkitaan vaatimusta hieman eri tavoin. Kyseinen  $20^{\circ}\text{C}$ :een vaatimus lämpötilaerolle on erittäin tiukka monissa käytännön rakenteissa ja voidaan usein saavuttaa vain käyttämällä jäädytystä.

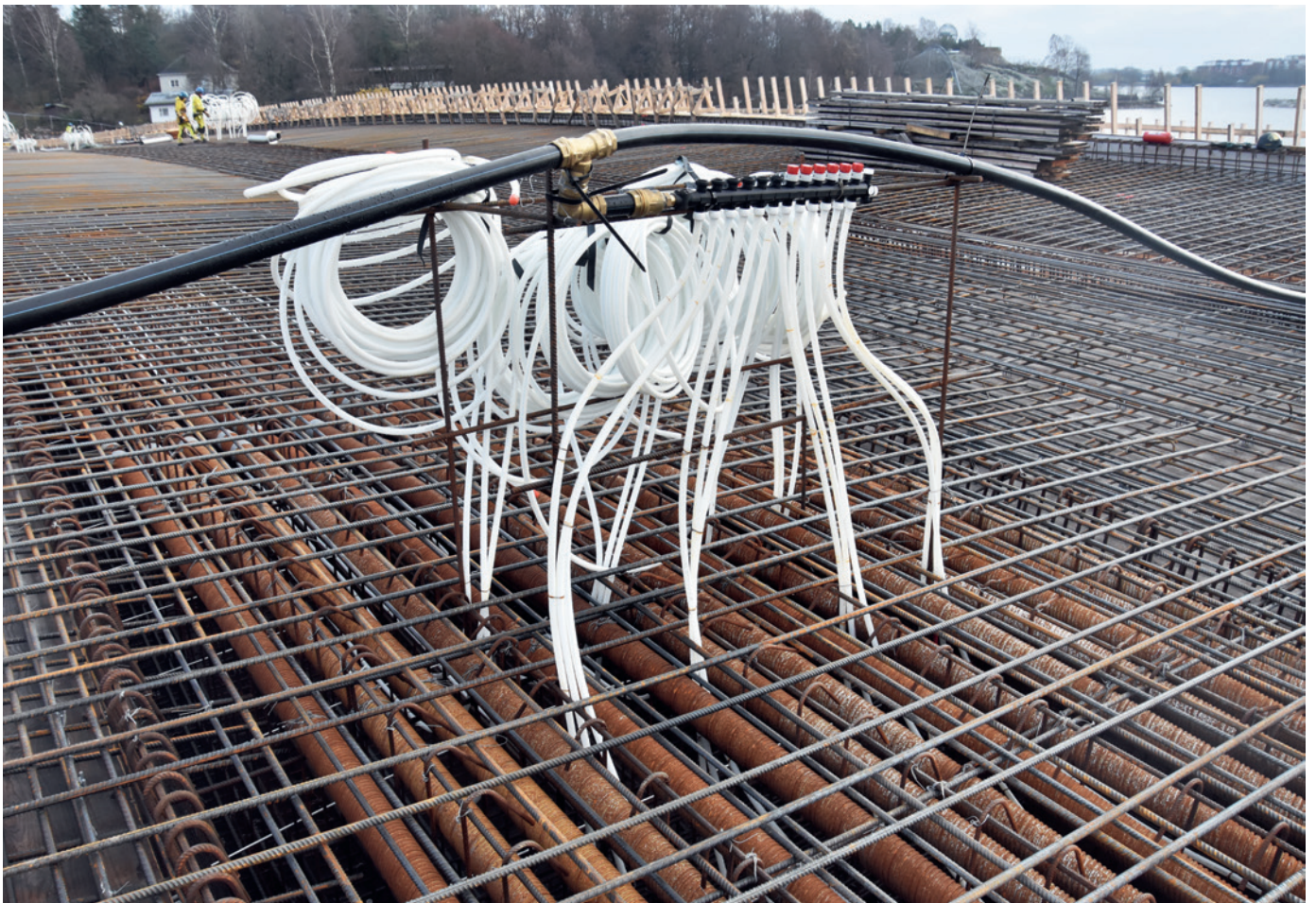
Suomessa on otettu betonin jäädyttäminen käyttöön erityisesti massiivisten infrarakenteiden osalta. Kuitenkaan varsinaisia mitoitusperusteita ei ole käytettävissä. Henri Tähkäsen diplomityössä tarkastellaan betonirakenteiden lämpötilan hallintaa nestejäähdytysputkiston avulla. Työn tavoitteena oli

**1, 2** Suomessa on otettu betonin jäädyttäminen käyttöön erityisesti massiivisten infrarakenteiden osalta.



1

2



Taulukko 1

## Jäähdytysparametrien vaihteluvälit

Parametri	Putken halkaisija [mm]	Putkien jakoväli [mm]	Virtaama [l/min]	Veden lämpötila [°C]	Betonin alkulämpötila [°C]
Vaihteluväli	15–35	200–2000	2,4–60	0–25	5–30

tuottaa perustietoa vesiputkijäähdytteisten massiivibetonirakenteiden fysiikasta ja mallintamisesta sekä antaa perustiedot vesiputkijäähdytysjärjestelmän mitoittamiseen. Työssä tarkastellaan nesteputkijäähdytteisen betonin lämpötilajakaumaa, jännityksiä ja halkeilua kaksi- ja kolmiulotteisten laskentamallien avulla. Näin pystytään arvioimaan eri jäähdytysparametrien ja rakenteen geometrian vaikutusta betonin lämpötilajakaumaan. Työ keskittyy ilmiön fysikaalisen ja matemaattisen perustan tarkasteluun sekä jäähdytysjärjestelmän mitoituksen osalta putkiston teoreettiseen ja laskennalliseen mitoittamiseen.

## Fysikaalinen tausta

Fysiikan näkökulmasta massiivibetonin vesiputkijäähdytys on ajasta ( $t$ ) riippuvan lämpöyhtälön (1) mukainen lämmönjohtumistehtävä, joka kuitenkin kovettuvan betonin tapauksessa on epälineaarinen, sillä sementin hydrataatioreaktio (yhtälössä  $f$ ) sekä betonin lämmönjohtavuus ( $k$ ) ja ominaislämpökapasiteetti ( $C_c$ ) ovat riippuvaisia valun lämpötilasta ( $T$ ). Tällöin betonin lämpötilajakaumaa on hyvin vaikeaa ratkaista analyyttisesti, ja ratkaisuun tarvitaankin numeerisia menetelmiä, esimerkiksi elementtimenetelmää. Yhtälö (2) on esimerkki menetelmän tuottamasta yhtälöryhmästä, jossa lämpötila-arvot muodostavat vektorin  $\mathbf{d}$  (ks. [A]). Hydrataatioon, lämmönjohtavuuteen ja ominaislämpökapasiteettiin vaikuttavat myös muut seikat, kuten betonin kosteus, mutta työssä keskityttiin lämpötilariippuvuuteen. Lämmönjohtavuutta ja ominaislämpökapasiteettia mallinnettiin hydrataatioasteesta riippuvina siten, että ne olivat valun alussa hieman suuremmat ja laskivat hydrataation edetessä kovettuneelle betonille mitattuihin arvoihin.

$$\rho_c C_c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = f \quad (1)$$

$$\mathbf{M}(\mathbf{d})\mathbf{d} + \mathbf{K}(\mathbf{d})\mathbf{d} = \mathbf{f}(\mathbf{d}) \quad (2)$$

Taulukko 2

## Lämpöominaisuudet

Lämpöominaisuus	Arvo
Betonin lämmönjohtavuus $k$	1,87 [W/(m.K)]
Betonin ominaislämpökapasiteetti $C_c$	900 [J/(kg.K)]
Betonin tiheys $\rho_c$	2500 [kg/m <sup>3</sup> ]
Teräsputken lämmönjohtavuus $k_{p,s}$	44,5 [W/(m.K)]
Muoviputken (PE) lämmönjohtavuus $k_{p,p}$	0,38 [W/(m.K)]
Muoviputken (PE) tiheys $\rho_p$	930 [kg/m <sup>3</sup> ]
Muoviputken ominaislämpökapasiteetti $C_p$	1900 [J/(kg.K)]

Taulukko 3

## Eri sementtien lämmöntuoton parametrit

Sementti	$E_a$ [kJ/mol]	$H_f$ [kJ/kg]	$t_{ref}$ [h]	$\beta$ [-]
CEM I	46,0	510	17	0,65
CEM II / B	45,1	470	16	0,58
CEM III / A	40,0	475	35	0,56

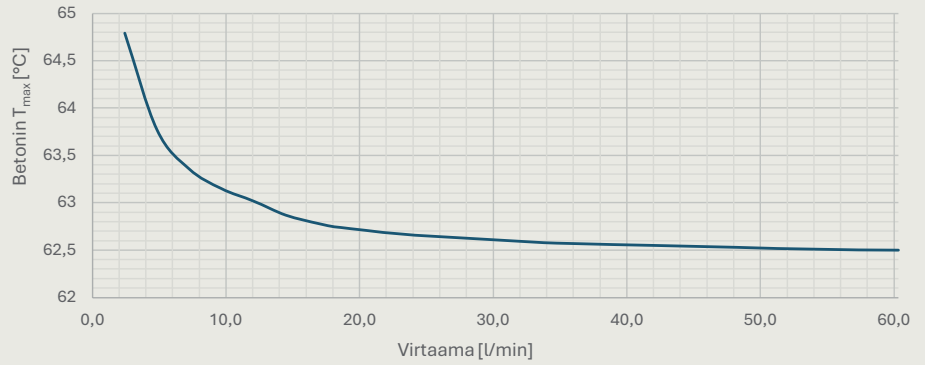
Betonin jännitysten ja halkeilun arvioimiseksi lämpötehtävään täytyy kytkeä myös mekaniikka. Kovettuvassa massiivibetonissa keskeisimmät muodonmuutokset ovat lämpövenymä ja viruma, jota voidaan arvioida Norton-Bailey-virumamallilla. Venymien avulla voidaan puolestaan laskea jännitykset. Kun samalla mallinnetaan betonin vaurioitumista faasikenttämallilla, voidaan vaurioituneen betonin nimellislämpökapasiteettiä arvioida yhteydellä  $\sigma = (1-D)\bar{\sigma}$ , jossa parametri  $D$  kuvaa vaurioitumisastetta ja  $\bar{\sigma}$  betonin tehollista jännitystä. Mekaniikan lisäksi lämpötehtävään voitaisiin kytkeä myös kosteus.

## Jäähdytysjärjestelmän parametrit ja mallinnusten lähtötiedot

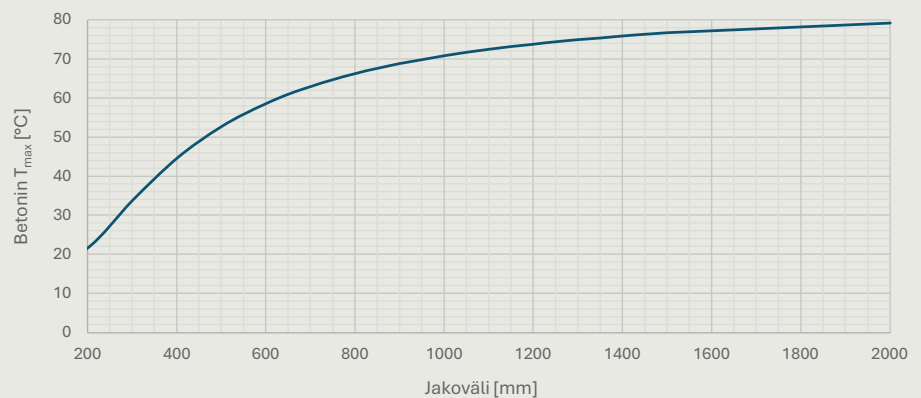
Massiivibetonin lämpötilaan voidaan vaikuttaa säätämällä vesiputkijäähdytysjärjestel-

män parametrejä, joita ovat jäähdytysputken materiaali, putkien pituus ja halkaisija, jäähdytysveden lämpötila ja virtausnopeus sekä putkien etäisyys toisistaan eli jakoväli. Osa parametreista, kuten putkien halkaisija ja jakoväli, täytyy valita jo ennen putkien asennusta, kun taas virtausnopeutta ja veden lämpötilaa voidaan säädellä vielä valun aikanaikin. Yleisimmät putkimateriaalit ovat teräs ja muovi, joista muovia käytetään nykyisin yleisemmin sen joustavuuden, muotoiltavuuden ja suhteellisen edullisuuden vuoksi. Putkien pituuden määrää kohde, mutta pidemmässä putkessa vesi ehtii lämmitä enemmän kuin lyhyessä, jolloin jäähdytys putken loppupäässä heikkenee. Työssä käytettiin taulukon 1 mukaisia jäähdytysparametrien vaihteluvälejä. Mallinuksissa lähtötilanteessa käytettiin halkaisijaltaan 20 mm muovista jäähdytysputkea, putkien jako-

**Kuva 1** Jäähdytysveden virtaaman vaikutus C35/45 P50-betonin maksimilämpötilaan käytettäessä 450 kg/m<sup>3</sup> CEM II / B-tyyppin sementtiä.



**Kuva 2** Jäähdytysputkien jakovälin vaikutus C35/45 P50-betonin maksimilämpötilaan käytettäessä 450 kg/m<sup>3</sup> CEM II / B-tyyppin sementtiä.



väliä 700 mm, jäähdytysveden alkulämpötilaa 10 °C ja betonin alkulämpötilaa 20 °C. Betonina toimi C35/45 P50, joka sisälsi 450 kg/m<sup>3</sup> CEM II / B-tyyppin sementtiä.

Lämpötilan ja jännitysten mallintamiseen käytettäväksi ohjelmistoksi valittiin Comsol Multiphysics, sillä se soveltuu hyvin monifysikaalisten ilmiöiden mallintamiseen ja on kaupallisena ohjelmistona helposti saatavilla. Lisäksi ohjelmisto on hyvin dokumentoitu [B]. Ohjelmisto käyttää lämpötehtävän ratkaisemiseen elementtimenetelmää. Koska lämpötehtävä on epälineaarinen, ohjelmisto hyödyntää ratkaisemisessa iteratiivista Newton-Raphson-menetelmää. Jotta betonin lämpötilajakaumaa ja jännityksiä voitiin mallintaa, valittiin sementille, betonille ja jäähdytysjärjestelmälle taulukoiden 2 ja 3 mukaiset ominaisuudet. Betonin lämpötilajakaumien tarkastelemiseksi muodostettiin kaksi- ja kolmiulotteiset laskentamallit, jotka perustuvat yhden putken jäähdyttämän betonialueen eli jäähdytysputken tarkasteluun. Mallit validoitiin vertailemalla niiden antamia lämpötiloja kirjallisuudessa esitettyihin arvoihin sekä analyttiseen ratkaisuun.

### Jäähdytysparametrien ja geometrian vaikutus

Vesiputkijäähdytteisen massiivibetonin lämpötilamallinnusten avulla pystyttiin arvioimaan eri jäähdytysparametrien vaikutusta betonin maksimilämpötilaan ja lämpötilaeroihin. Putken materiaalin osalta havaittiin, että teräsputki jäähdyttää muoviputkea tehokkaammin, mutta samalla betonin sisäinen lämpötilaero kasvaa. Jäähdytysputken halkaisijan kasvattaminen puolestaan tehostaa jäähdytystä lineaarisesti siten, että vaikutus jäähdytysputken maksimilämpötilaan on noin 7 astetta, kun siirrytään 15 mm putkesta 50 mm putkeen. Putken halkaisijan kasvaessa kasvavat kuitenkin sekä jännitykset putken ympärillä että jäähdytysputkiston hinta. Myös jäähdytysveden lämpötilan vaikutus on varsin lineaarinen: kun veden lämpötilaa kasvatetaan 0 asteesta 25 asteeseen, kasvaa betonin maksimilämpötila keskimäärin 8 astetta. Vaikutus riippuu kuitenkin myös muista tekijöistä, kuten betonin alkulämpötilasta. Veden lämpötilan laskiessa betonin sisäiset lämpötilaerot ja niiden myötä sisäinen halkeiluriski kuitenkin kasvavat. Betonissa mahdollisesti oleva raudoi-

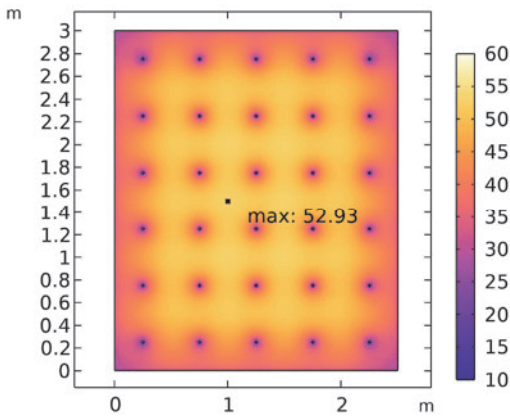
tus tasaa betonin lämpötilajakaumaa ja siten yleensä laskee maksimilämpötilaa.

Edellä mainittuja parametrejä voimakkaammin betonin maksimilämpötilaan vaikuttavat kuitenkin betonin alkulämpötila, jäähdytysveden virtaama ja etenkin jäähdytysputkien jakoväli. Betonin alkulämpötilan vaikutus on lineaarinen siten, että valun alkulämpötila kasvaessa 5 astetta nousee betonin maksimilämpötila keskimäärin 6,5 astetta. Virtaaman ja jäähdytysputkien jakovälin vaikutus betonin maksimilämpötilaan on esitetty vastaavasti kuvissa 1 ja 2. Virtaaman osalta vaikutus on suurin välillä 2,4–18 l/min, kun virtaus muuttuu laminaarista turbulentiksi. Putkien jakovälin kasvaessa betonin maksimilämpötila kohoaa.

Betonirakenteen poikkileikkauksen geometrian vaikutustarkasteluissa lähtötilanteena käytettiin suorakaidepoikkileikkausta (3 m × 2,5 m), jossa jäähdytysputket olivat 500 mm välein. Kutakin poikkileikkausta tarkasteltiin kahdella eri reunaehtovaihtoehdolla. Eristetyllä reunalla lämpövuoto reunan yli oletetaan mitättömän pieneksi (ns. Neumann-reunaehto). Konvektioreunalla lämpövuoto reunan yli on verrannollinen alueen

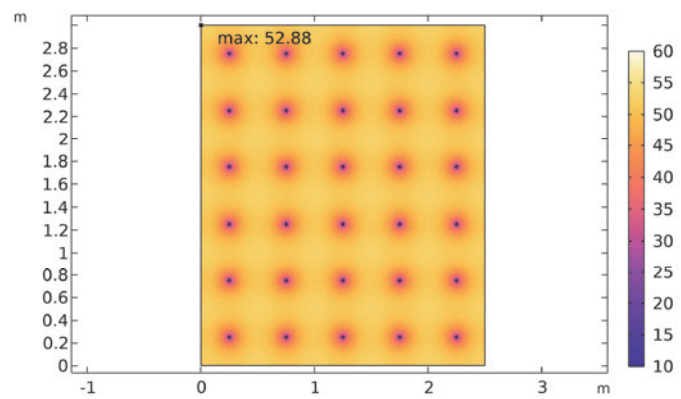
Kuva 3

### Konvektiollinen vertailupoikkileikkaus



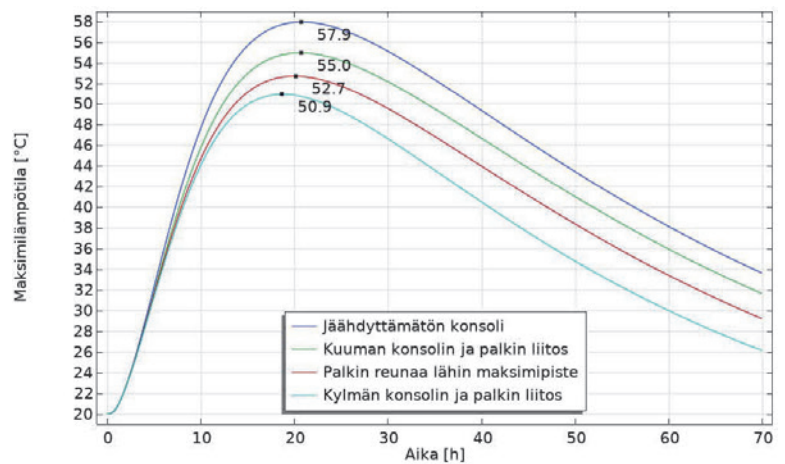
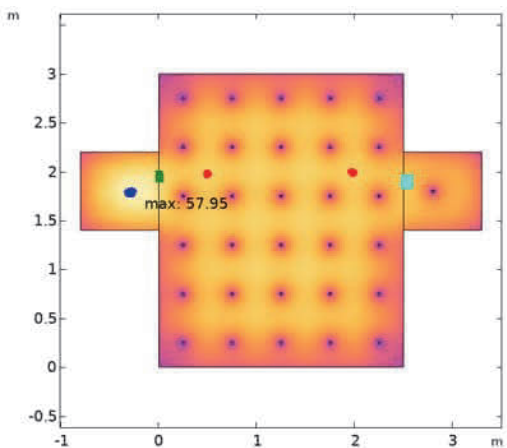
Kuva 4

### Eristetty vertailupoikkileikkaus



Kuva 5

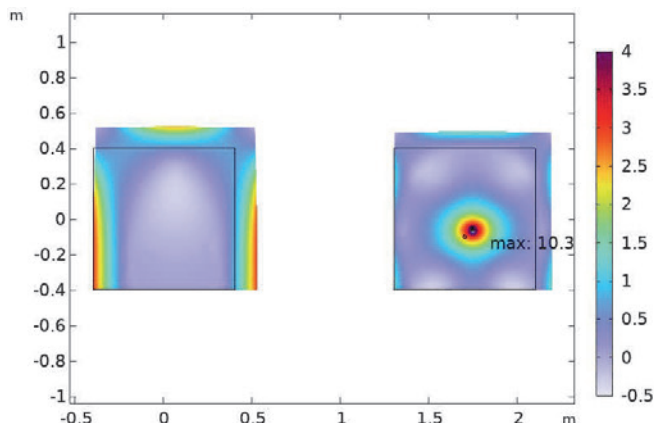
### Konsolillisen, konvektiollisen tilanteen lämpötilajakauma ja -käyrät



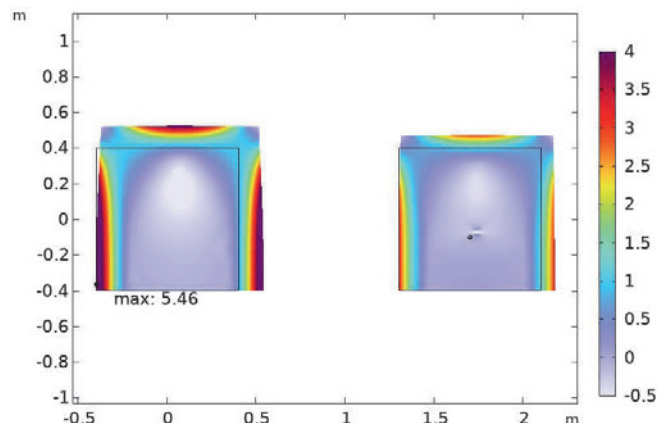
ulkopinnan läheisyydessä vaikuttavan konvektiovirtauksen aiheuttamaan, Newtonin jäähtymislain mukaiseen lämpötileroon (ns. Robin-reunaehto). Tyypillisesti betonirakenteen ulkopinnan läheisyydessä vaikuttaa jäähdyttävä ilmavirta, vedenalaisessa rakenteessa rakennetta jäähdyttää ympäröivä vesi. Kuva 3 esittää konvektiollisen ja kuva 4 eristetyn betonipoikkileikkauksen lämpötilajakauman. Kyseiset lämpötilajakaumat toimivat vertailukohtana, kun tarkasteltiin ulokkeellisten betonikappaleiden lämpötilajakaumia. Kun konvektiolliseen vertailupoikkileikkaukseen lisätään jäähdyttämätön konsoli vasemmalle puolelle ja jäähdytetty konsoli oikealle, havaitaan, että jäähdyttämätön konsoli kasvattaa konsolin ja jäähdytetyn betonin rajapinnan lämpötilaa, sillä verrattuna konsolittomaan tilanteeseen rajapinta muuttuu konvektiopinasta lämmönlähteeksi. Tämä ilmenee kuvasta

5. Jäähdyttämättömän konsolin vaikutus ulottuu maksimissaan noin 500 mm syvyydelle jäähdytettyyn betoniin. Jäähdytetyn konsolin vaikutus on vieläkin vähäisempi. Jäähdytyksen vaikutus ei myöskään juuri yllä jäädyttämättömään ulokkeeseen. Samansuuntaisia havaintoja tehtiin myös muiden tarkasteltujen ulokkeiden, kuten laattojen, seinien ja tukimuurin, osalta. Eristetyssä tilanteessa ulokkeiden vaikutus on hyvin samankaltainen kuin konvektiollisessakin, suuruus vain hieman eroaa. Ulukkeiden vaikutus riippuu myös jäähdytysputkien jakovälistä ja sementin määrästä: mitä suurempia jakovälejä ja mitä enemmän sementtiä käytetään, sitä enemmän ulokkeet vaikuttavat jäähdytetyn betonin lämpötilajakaumaan.

Kuva 6

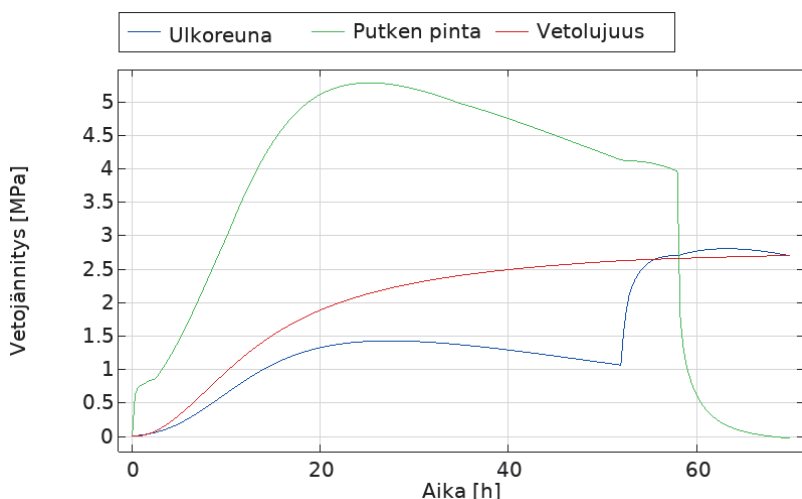
Jännitykset hetkellä  $t = 25$  h, MPa

Kuva 7

Jännitykset hetkellä  $t = 55$  h, MPa

Kuva 8

Jäähdytetyn betonin eri pisteiden vetojännitykset ja -lujuus



### Betonin jännitykset ja halkeilu

Vesiputkijäähdytetyn betonin jännityksiä ja halkeiluriskiä tarkasteltiin rullatuilla olevan neliöpoikkileikkauksen (700 mm × 700 mm) avulla. Kappaleen alareuna oletettiin eristetyksi ja muut reunat konvektiollisiksi. Reunojen konvektio oli aluksi pieni ja kasvoi 52 tunnin kuluttua muottien poistamisen seurauksena. Jäähdytyksen kesto oli 48 tuntia. Lämpötilamallinnuksen perusteella jäähdytysputkisto alentaa kyseisen betonikappaleen maksimilämpötilaa noin 10 asteella.

Kuvat 6 ja 7 esittävät betonin jännityksiä vastaavasti ajanhetkillä  $t = 25$  h ja  $t = 55$  h. Kuvissa vasemmanpuoleinen betonikappale on jäähdyttämätön ja oikeanpuoleinen jäähdytetty. Kuvien perusteella jäähdyttämättömässä betonissa vetojännityksiä alkaa muodostua kappaleen ulkoreunoille, kun taas jäähdytetyssä kappaleessa suurimmat vetojännitykset

keskittyvät jäähdytysputken ympärille. Jäähdytyksen loputtua kummankin kappaleen pinnalla on vetojännitystä, mutta jäähdytetyssä kappaleessa vetojännitykset ovat pienempiä. Jäähdyttämättömän betonin keskiosat ovat koko ajan puristuksessa, kun taas jäähdytetyn betonin keskiosiin puristus muodostuu vasta jäähdytyksen loputtua.

Kuva 8 puolestaan esittää vetojännitykset betonikappaleen ulkopinnalla ja jäähdytysputken pinnalla sekä betonin vetolujuuden kehittymisen, kun jäähdytys kestää 58 tuntia. Tällöin vetojännitys jäähdytetyn betonin ulkopinnalla pysyy koko ajan pääosin pienempänä kuin betonin vetolujuus. Jäähdytysputken pinnalla vetojännitykset kuitenkin kohoavat selkeästi betonin vetolujuutta suuremmiksi, jolloin siis jäähdytetyllä betonilla halkeilua esiintyy todennäköisimmin jäähdytysput-

ken ympärillä, kun taas jäähdyttämättömällä betonilla halkeiluriski on suurin ulkopinnoilla.

### Johtopäätökset

Työn perusteella vesijäähdytysputkistolla voidaan varsin tehokkaasti alentaa massiivi-betonin valunaikaista maksimilämpötilaa ja hallita muodostuvia lämpötilaeroja. Toisekseen jäähdytysputket pienentävät huomattavasti jännityksiä betonikappaleen ulkopinnoilla, jolloin ulkopintojen halkeiluriski pienenee oleellisesti. Tämä parantaa betonin säilyvyyttä. Jäähdytysputket aiheuttavat kuitenkin betoniin mahdollista sisäistä halkeilua putkien ympärille, mutta tällaiset betonirakenteen keskiosassa olevat halkeamat eivät aiheuta säilyvyysriskejä. Myöskään rakenteen toiminnan kannalta ne eivät normaalisti ole kriittisiä.

Jäähdytykseen tarvittavaa putkien jakoväliä voidaan arvioida CEM II / B-tyyppin semen-

**Taulukko 4** Jäähdytysputkien jakovälit sementille CEM II / B, kun käytössä 100 m muovinen jäähdytysputki, veden lämpötila 10 °C ja betonin alkulämpötila 20 °C.

Sementin määrä [kg/m <sup>3</sup> ]	Jakoväli min. [mm]	Jakoväli max. [mm]
345	600	900
360	450	800
400	450	650
450	400	600
470	350	550

**Taulukko 5** Jäähdytysparametrien laskennallinen vaikutus C35/45 P50 -betonin maksimilämpötilaan käytettäessä 450 kg/m<sup>3</sup> CEM II / B-tyyppin sementtiä.

Parametri	Veden lämpötila (0–25 °C)	Putken halkaisija (15–50 mm)	Betonin alkulämpötila (5–30 °C)	Virtaama 2,4–10 [l/min] (50 m putki)	Virtaama 10–22 [l/min] (50 m putki)	Virtaama > 22 [l/min] (50 m putki)
Vaikutus betonin maksimilämpötilaan	+0,3–0,6 [°C / °C]	-0,2 [°C / mm]	+1,3 [°C / °C]	-0,71 [°C / (l/min)]	-0,1 [°C / (l/min)]	-0,02 [°C / (l/min)]

tistä valmistetulle betonille luonteeltaan suuntaa antavan taulukon 4 avulla, kun käytetään 100 m jäähdytysputkea ja aiemmin esitettyä lähtötilannetta. Taulukko soveltuu parhaiten putkien mitoittamiseen betonin keskiosissa, jos massiivibetonin poikkileikkaus on suorakulmainen ja pysyy rakenteen läpi kutakuinkin samana. Vastaavat taulukot on esitetty diplomityössä myös sementille CEM I ja CEM III. Muiden jäähdytysparametrien keskimääräistä vaikutusta CEM II / B-tyyppin sementistä valmistetun C35/45 P50-betonin maksimilämpötilaan voidaan arvioida taulukon 5 avulla. Vaikutuksen etumerkki määräytyy sen mukaan, suureneeko (+) vai pieneneekö (-) betonin maksimilämpötila kasvatettaessa tietyn jäähdytysparametrin arvoa. Jos betonirakenne on niin kapea, että betonin ulkoreunojen konvektio korostuu, tai jos rakenteen poikkileikkaus ei pysy vakiona, tarvitaan jäähdytysputkien mitoittamiseen kuitenkin tasomallia tai kolmiulotteista laskentamallia.

Geometrian vaikutuksen tarkastelu osoitti, että jäähdytetyt ja niihin liitetyt jäähdyttämättömiä betonikappaleita voidaan lähtökoh-

taisesti käsitellä lämpötilojen näkökulmasta erillisinä, eli kummallekin voidaan mitoittaa oma jäähdytysputkistonsa. Vaikutukset liityntäalueilla on kuitenkin tarkastettava, jotta lämpötila pysyy sallituissa rajoissa.

Nesteputkijäähdytyksellä voidaan siis tehokkaasti säädellä betonin lämpötilaa ja sitä kautta rajoittaa muodostuvia vetojännityksiä ja halkeilua. Putkisto siirtää halkeiluriskiä betonin pinnalta sisäosiin parantaen betonin säilyvyyttä, ja putkisto voidaan mitoittaa joko taulukoilla tai tarkemmilla FEM-malleilla. Jäähdytysputkistoon liittyen voisi tarkastella edelleen tarkemmin eri jäähdytysparametrien riippuvuuksia toisistaan, putkiston käytännön sijoittelua betonissa esimerkiksi raudoitukset huomioiden ja betonin sisäosien halkeilun vaikutusta betonin säilyvyyteen ja lujuuteen.

Henri Tähkänen suoritti kandidaatti- ja maisteriopintonsa Aalto-yliopistossa, Rakennustekniikan laitoksella. Opinnoissaan hän keskittyi rakennetekniikkaan. Hän valmistui diplomi-insinööriksi kesällä 2024. Nykyisin hän työskentelee siltasuunnittelijana. •

## Viitteet

- [A] Tähkänen, Henri. 2024. Nesteputkijäähdytteisen massiivivalubetonin fysikaalinen mallinnus. Aalto-yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Diplomityö. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-202408255719>
- [B] COMSOL. 2019. Heat Transfer Module: User's Guide. COMSOL Documentation. [https://doc.comsol.com/6.2/docserver/#!/com.comsol.help.heat/html\\_HeatTransferModuleManual.html](https://doc.comsol.com/6.2/docserver/#!/com.comsol.help.heat/html_HeatTransferModuleManual.html)



## Nesteputkijäähdytteen massiivivalubetonin fysikaalinen mallinnus

Henri Tähkänen,  
Aalto-yliopisto, diplomityö

"Henri Tähkäsen työ käsittelee betonin jäähdytystä kovettumisen aikana. Mikäli massiivibetonin lämpötila kovettumisen aikana nousee liian korkeaksi (> +60°C), voi betonin lujuus- sekä myös säilyvyysominaisuudet heikentyä merkittävästi. Aihe on maailmalla tunnettu jo pitkään ja on noussut Suomessakin ajankohtaiseksi viime vuosien aikana. Esimerkiksi nykyisellään massiivisia siltarakenteita jäähdytetään yleisesti vesiputkien avulla. Suomessa ei kuitenkaan ole mitoitushjeita jäähdytysputkistojen suunnitteluun. Henri Tähkäsen työssä simuloidaan nesteputkistolla jäähdytetyn massiivibetonin lämpötilajakaumaa, lämpöjännityksiä sekä halkeilua. Elementtimenetelmään perustuvan simuloinnin avulla tarkastellaan tilannetta erilaisissa massiivisissa betonirakenteissa kaksi- ja kolmeulotteisesti. Mallinnuksen avulla määritetään parametrit, joilla betonin jäähdytystä voidaan tehokkaimmin säädellä. Työ tulee olemaan merkittävässä roolissa kehitettäessä kansallisia ohjeita massiivisten betonirakenteiden jäähdytyksen suunnitteluun."

– Jouni Punkki, professori,  
Aalto-yliopisto

Tutustu Henri Tähkäsen diplomityöhön:  
<https://aaltodoc.aalto.fi/items/ecc08922-93b1-4b70-8290-3621c53b9a69>

### **Physical modelling of pipe-cooled massive concrete.**

High temperatures due to heat of hydration are a common phenomenon in early-age massive concrete structures. As too high maximum temperatures and temperature differences may cause strength and durability problems in concrete, the temperature of concrete during hardening must be limited according to by78 and other instructions. One method to control the temperature of early-age concrete is pipe-cooling which Henri Tähkänen from Aalto University considered in his master's thesis called Physical modelling of pipe-cooled massive concrete.

The purpose of the thesis was to simulate the temperature distribution, thermal stresses, and cracking of early-age massive concrete with waterpipe cooling system to make sure that the maximum temperatures and temperature differences stay between the limit values and that concrete does not crack excessively. The modelling was performed using two- and three-dimensional calculation models based on finite element method. The aim of the modelling was to evaluate the effects of different pipe-cooling parameters and concrete geometry on the temperature distribution, thermal stresses and cracking of concrete.

Results concluded that pipe-cooling can effectively control the maximum tempera-

ture and temperature differences of early-age concrete. It also reduces thermal stresses at the outer surface of concrete structure which improves the durability of concrete. The distance between cooling pipes, concrete initial temperature and the flow rate of cooling water were found to be the most effective parameters controlling the temperature of pipe-cooled concrete. The effects of geometry on the temperature distribution of concrete are mostly limited to areas which join cooled and non-cooled concrete. The required distance between cooling pipes and the effects of different cooling parameters on the maximum temperature of concrete can be evaluated utilizing simple tables or calculation models presented in the thesis.