



VTT

Betonin jäähdyttäminen työmaalla

Elina Pauku

BY-työmaaweбинаari 28.1.2025

VTT – beyond the obvious

Sisältö

- Betonin jäähdytystarve ja uusi julkaisu BY 78
- Riskirakenteet
- Miksi betonia täytyy jäähdyttää?
- Nykymääräykset lämpötilojen suhteen ja lämpötilojen mittaaminen
- Lämpötilojen arviointi erilaisissa betonikoostumuksissa
- Eri osapuolten toiminta
- Varautuminen jäähdytystarpeen hallintaan
- Jäähdytysputkistojen mitoitus ja asennus
- Kirjallisuutta

Betonin jäähdytystarve ja uusi julkaisu BY 78

- Tarve jäähdytykselle ja uudelle ohjeelle:
 - Lämmönlitystapauksia runsaasti viime vuosina
 - Voimassa olevat sallitut lämpötilaraja-arvot peräisin 60- ja 80-luvuilta, jolloin betonikoostumukset (ja erityisesti sementit) olivat hyvinkin erilaisia
 - Viime vuosien muutokset betonien koostumuksissa
 - Lujuustasot, säilyvyysvaatimukset => betonin lämmöntuoton kasvu
 - Betonien työmaavaatimukset
 - Käytännössä lähes kaikki betoni valetaan pumppaamalla
- Julkaisussa peruseriaatteet jäähdytystarpeen arvioimiselle
- Uusi julkaisu nyt aluksi vain sähköisenä, jota on tarkoitus päivittää kokemustiedon lisääntyessä



Riskirakenteet jäähdytystarpeen suhteen

“Betonirakenne katsotaan massiiviseksi, jos se on mitoiltaan niin suuri, että on tarpeen ryhtyä erityistoimenpiteisiin hydrataatiolämmön aiheuttamista lämpömuodonmuutoksista syntyvän halkeamisvaaran tai korkeasta kovettumislämpötilasta johtuvan lujuuskadon rajoittamiseksi”

Perustapauksessa:

Mikä tahansa rakenne tai rakenneosia, jonka pienin mitta on yksi metri

Erityistapauksissa myös rakenteet, joiden pienin mitta on vain esim. puoli metriä (0,5 m), voidaan käsittää massiiviseksi rakenteeksi:

- Sideaineen määrä
- Betonin lujuusluokka
- HUOM. Korkealujuusbetoni
- Säilyvyysvaatimukset
- Odotettavissa olevat ulkoiset lämpötilan vaihtelut
- Odotettavissa oleva valun maksimilämpötila T_{max}
- Lämpötilagradientit ΔT

- Huomattava osa ihan tavallisista siltarakenteista on betonitekniikan näkökulmasta erittäin massiivisia betonirakenteita!
- Teollisuus- ja voimalaitosrakenteissa erittäin paljon hyvin massiivisia rakenneosia
- Korkean rakentamisen rakenteet, myös jalusta-/vastapainorakenteet
- Ylipäätään lähes kaikki vesi- ja muut infrarakenteet
- HUOM. Korkealujuusbetonit ohuemmissakin rakenneosissa!

Miksi betonia täytyy jäähdyttää?

- **Liian korkea kovettumisen aikainen maksimilämpö T_{max} :**
 - Voi aiheuttaa betonin lujuuskatoa
 - Kantavuusongelmat?
 - Voi aiheuttaa myöhempiä säilyvyysongelmia (DEF eli delayed ettringite formation eli viivästynyt ettringiittireaktio)
 - DEF johtaa betonin rapautumiseen
 - Voi ilmetä vasta jopa kymmenien vuosien kuluttua
 - **Vaarallisinta piiloon jäävissä rakenneosissa!**
- **Liian suuri lämpötilagradientti ΔT :**
 - Rakenteen ulkopinnoilla näkyvä halkeilu
 - Rakenteen sisäistä säröilyä ja halkeilua visuaalisesti näkymättömissä
 - Halkeamat voiva olla hyvin suuria, jopa useita millimetrejä leveitä ja hyvin ennakoimattomissa kohdissa
 - Korjaustarpeita
 - Kustannusten kasvu
 - Aikatauluvaikutukset

Tärkeää muistaa ja erottaa toisistaan:

Betonituotteiden lämpökäsittelyä ($T =$ yli $+40\text{ °C}$, yleensä noin $+60\text{ °C}$) ja betonin hydrataation aikaista (liiallista) lämmönkehitystä ($T_{\max} > +60\text{ °C}$) ei milloinkaan tule rinnastaa tai sekoittaa toisiinsa

Lämpökäsittely = täysin suunniteltu, hallittu ja täysin kontrolloitu betonituotteen kovettumisen aikainen lämpötilan nosto ja jäähdytys lujuudenkehityksen ja muottikierron nopeuttamiseksi

Hydrataation aikainen (liiallinen) lämmön nousu = aina ennakoimaton ja usein totaalisen ei-hallittu rakenteen lämmön nousu ja jäähtyminen

Nykymääräykset lämpötilojen suhteen ja lämpötilojen mittaaminen

■ Maksimilämpö:

Taulukko 3.1. Tarvittavat toimenpiteet betonin kovettumisvaiheen maksimilämpötilan mukaan (InfraRYL /4/ ja BY65 /7/).

Toteutunut maksimilämpötila	Vaikutukset lujuusominaisuuksiin	Vaikutukset säilyvyysominaisuuksiin
$\leq +60^{\circ}\text{C}$	Ei vaadita toimenpiteitä	Ei vaadita toimenpiteitä
$+60\dots70^{\circ}\text{C}$	Lujuuskato voidaan arvioida laskennallisesti valetuista koekappaleista:	Ei vaadita toimenpiteitä
$+70\dots80^{\circ}\text{C}$	$+60^{\circ}\text{C}$ ylittävä Celsius-aste vastaa 1% lujuusalenemaa (esim. $+70^{\circ}\text{C}$ \rightarrow 10% alenema tunnistustestausten lujuuteen).	Lämpötilan vaikutus säilyvyyteen tutkitaan tapauskohtaisesti rakenteesta irrotetuista näytteistä tilaajan hyväksymän koeohjelman mukaisesti. Ei koske rasisitusluokkia X0 ja XC1.
$>+80^{\circ}\text{C}$	Vaikutukset puristuslujuuteen selvitetävä tapauskohtaisesti poranäytteillä korkeimpien lämpötilojen kohdalta.	Lämpötilan vaikutus säilyvyyteen tutkitaan tapauskohtaisesti rakenteesta irrotetuista näytteistä tilaajan hyväksymän koeohjelman mukaisesti.

■ Lämpötilagradientti:

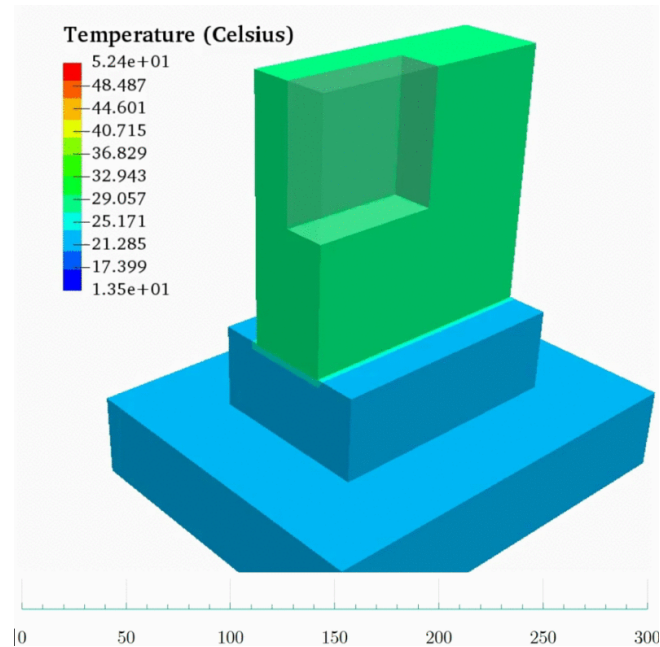
- InfraRYL / ΔT enintään 20°C
- BY65 / ΔT enintään 20°C tai 20°C/m

- ## ■ Lämpötilojen mittaaminen:
- Ei erityistä virallista ohjeistusta esim. mittauspisteiden sijoitteluun eikä mittaustaajuuteen

Lämpötilojen arviointi erilaisissa betonikoostumuksissa

- Betonimassan lämmöntuoton arviointi aina *reseptikohtaista*
- *Ennakkolaskelmat lämmönkehityksestä* huomioiden käytettävät muottimateriaalit ja valuajankohdan lämpötila- ja tuuliolosuhteet
- Julkaisussa BY78 esitetty lämmönkehitysarviointeja yleisimmin käytetyille sementtilaaduille, betonin lujuusluokille ja betonikoostumuksille, huomioiden erikseen huokostetut ja huokostamattomat betonit
 - Eri valmistajien sementeissä voi olla merkittäviä eroja lämmöntuoton suhteen, vaikka standardin mukainen sementtityyppi on sama
- Eri sementtityyppi- ja lujuusluokkakombinaatioiden lämmön nousun riskejä arvioitu (julkaisussa BY78) värikoodeilla rakennepaksuus huomioiden

Miksi lämmönkehityksen arviointi on tärkeää? Esimerkki lämpötilan vaihtelusta tunneittain massiivivalussa, jossa rakennepaksuus noin 1 x 3 x 4 m



Video: © Suraj
Rana Bat / Sweco

Eri osapuolten toiminta – Suunnittelijat:

- **Suunnittelijan, urakoitsijan ja betonin toimittajan riittävän aikainen yhteistyö välttämätöntä kaikissa vaativissa hankkeissa**
- Suunnittelijalla paljon toimenpidemahdollisuuksia rakenteen lämmön nousun hillitsemiseksi:
 - *Liian suuren lujuusluokan välttäminen*
 - Rakenteen liikemahdollisuuksien huomioiminen
 - Rakenteen jakaminen valusiihiin
 - Valuaukkojen suunnittelu muotteihin ja raudoitteisiin
 - Työsaumojen ja valujärjestyksen suunnittelu työnaikaiset kuormitukset ja muodonmuutokset huomioiden
 - Muiden kuin termisten halkeamien halkeamaleveyksien rajoittaminen
 - Putkistojen materiaalin valinta, asennustapa ja sijoittelu rakenteeseen
 - => Putkimateriaali vaikuttaa lämmönjohtavuuteen
 - Jäähdytysvaikutusten laskenta ja putkistojen mitoitus
 - => Jäähdytyksen aikaansaamat lämpötilagradientit

Eri osapuolten toiminta – Urakoitsijat:

■ Urakoitsija vastaa käytännön varautumistoimenpiteistä rakenteen jäähdyttämisen suhteen

- Jäähdytys käytännössä (putkien asennustyöt)
- Lämpötilamallinnukset etukäteen, niin talvi- kuin kesävaluissa
- *Lämpötilojen mittaaminen valun kovettumisen aikana*
 - *Rakenteen jäähdyttäminen ei poista lämpötilojen mittaamisen tarvetta eikä tärkeyttä*
- **Gradienttien hallinta**
 - ***Rakenteen jäähdyttäminen voi muodostaa uusia gradienttivaikutuksia***
=> Tiivis yhteistyö putkistosuunnittelijan/-mitoittajan kanssa
- Riittävän pitkä jälkihoito
- Rakenteen riittävä ja tehokas suojaaminen
 - Hydrataation maksimilämpö ei pienene/vähene suojauksia vähentämällä
 - Suojausten poistaminen kasvattaa gradienttia
 - Sallittujen jäähtymisnopeuksien huomioiminen rakenteen paksuuden mukaan
- Mahdollisimman myöhäinen muottien purku

Eri osapuolten toiminta – Betonin valmistajat:

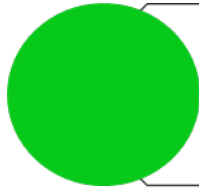
- **Betonin toimittajalla käytännössä vähiten toimenpidevaihtoehtoja, jotka kuitenkin ovat ehkä ne tärkeimmät**
 - Oikean betonikoostumuksen valinta annettuun rakenteeseen (rasitusluokkavaatimukset huomioiden)
 - Tarvittaessa erilliset ennakkokokeet lämmönkehityksen suhteen
 - Sopiva betonin lähtölämpötila
 - Betonin lähtölämpötilalla on vaikutusta muodostuvaan maksimilämpöön



Varautuminen jäähdytstarpeen hallintaan

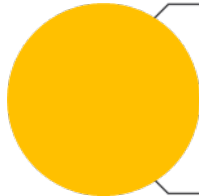
- Uudessa julkaisussa BY78 myös ohjeita lämpötilojen mittaamiseen sekä alustavia, suuntaa-antavia ohjeita jäähdytysputkistojen sijoitteluun esim. palkkirakenteessa
- Jäähdytystarve kohdentuu alueille, joissa lämpö tulee nousemaan korkeimmalle => lämpötilojen ennakkolaskelmien tärkeys
 - HUOM. Rakenteen geometriasta riippuen maksimilämpötila-alueita voi samassa rakenteessa olla useampia!
- Putkistoista tulee lisäkustannuksia, joten varautumistarve olisi syytä esittää jo tarjouskilpailun asiakirjoissa
 - Ovatko kaikki eri tilaajatahot ajan tasalla tältä osin?

Varautuminen jäähtytystarpeen hallintaan: Lämpötilaraja-arvoja massiiviselle rakenteelle



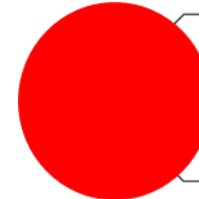
TODENNÄKÖISESTI TURVALLISELLA ALUEELLA OLLAAN, KUN

- Betonimassan lähtölämpötila asemalla (kesällä) $+10 < x < +15$ °C
- Betonimassan alkulämpötila muottiin pumpatessa $\leq +18$ °C
- Betonin kovettumisen aikainen maksimilämpötila $< +50 \dots +55$ °C
- Suurin lämpötilagradientti kovettumisen aikana ≤ 20 °C



TYÖMAALLA OLTAVA "VALMIUSTILASSA" JÄÄHDYTTÄMÄÄN:

- Betonimassan lähtölämpötila asemalla $\geq +18 \dots +20$ °C
- Betonimassan alkulämpötila muottiin pumpatessa $\geq +18 \dots +20$ °C
- Betonin kovettumisen aikainen maksimilämpötila $+58$ °C ja noususuunta
- Suurin lämpötilagradientti kovettumisen aikana 20 °C (ja noususuunta)



HÄLYTYS!!!

- Betonimassan lähtölämpötila asemalla $\geq +22$ °C
- Betonimassan alkulämpötila muottiin pumpatessa $> +22$ °C
- Betonin kovettumisen aikainen maksimilämpötila $\geq +68 \dots +70$ °C
- Suurin lämpötilagradientti kovettumisen aikana > 25 °C

Jäähdytysputkistojen mitoitus ja asennus

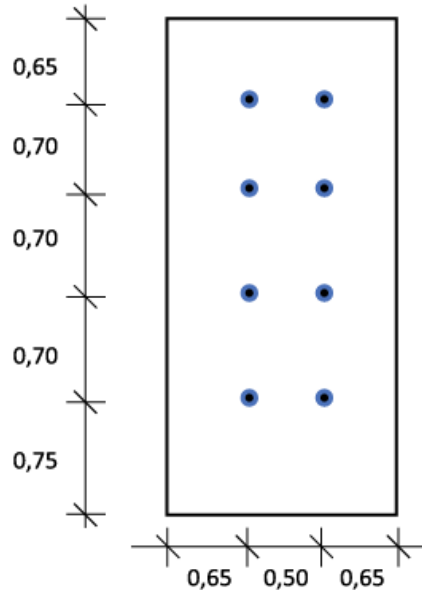
■ Putkistojen mitoitus nyt:

- Ei kotimaisia mitoitusohjeita vielä
- Amerikkalaiset ohjeet (ACI), myös muita ulkomaisia ohjeita jonkin verran
- Mitoituksessa käytettävät ohjelmistot FEM-laskentapohjaisia eli elementtimenetelmiin perustuvia
- Varsin vaativaa numeerista laskentaa
- Rakennesuunnittelijoilla ja rakennusfysiikkasuunnittelijoilla sopivat työkalut jo käytössä

■ Putkistojen asennus:

- Putkistot asennettava jo samaan aikaan raudoituksen etenemisen kanssa
 - Riittävän varhainen suunnittelu tarpeen
- Putkistojen riittävä tuenta niillä kohdin, joissa raudoitteita ei paljoa ole?
 - Putkistojen jakoväli rakenteen eri suunnissa
- Putkistojen liitoskohtien tiiviys erittäin tärkeää – vettä tai muuta jäähdytysainetta ei saa vuotaa betoniin

Jäähdytysputkistojen mitoitus ja asennus



- Vasemmalla esimerkki jäähdytysputkistojen sijoituksesta massiivisessa palkkirakenteessa
 - Putkien tarkat sijoituskohdat määrittyvät mitoituslaskennan kautta – rakenteen mitoista, arvioidusta maksimilämmöstä ja halutusta jäähdytysvaikutuksesta riippuen
 - Putkien pituus, halkaisijamitta, materiaali ja materiaalivahvuus määritetään mitoituslaskennassa

Jäähdytysputkistojen mitoitus ja asennus

■ Muuta pohdittavaa:

- Valun tiivistystyön onnistumisen varmistaminen
- Mistä jäähdytysvesi ja kuinka paljon (l/min.) sitä tarvitaan?
- Entä jokin muu jäähdytysaine?
- Jäähdyttävän aineen alkulämpötila ja kuinka paljon se lämpenee?
- Sopiva putkimateriaali, sen halkaisija ja materiaalivahvuus?
 - Muovin ja metallin välillä eroja lämmönjohtavuudessa eli eroa myös jäähdytysvaikutuksessa ja putkien asennusväleissä
- Putkiston pituus – yksi pitkä linja vai useampi lyhyempi?
 - Jäähdytysvaikutusten ja jäähdyttävän aineen lämpötilan nousun laskenta tärkeää
- Putkien täyttöinjektointi valun jälkeen – miten toteutetaan?
 - Tärkeää kondenssiveden kertymisen estämiseksi putkistoihin
- **Koerakenteet ja –valut sitä tärkeämpiä, mitä vaativammasta ja/tai kriittisemmästä rakenteesta kyse**



Kirjallisuutta:

- BY78 - Betonin jäähdytystarpeen arvioiminen 2024, Suomen Betoniyhdistys ry. Toistaiseksi saatavana vain e-kirjana.
- Henri Tähkänen: Nesteputkijäähdytteisen massiivivalubetonin fysikaalinen mallinnus. Diplomityö, Aalto yliopisto, 2024.

bey⁰nd

the obvious

Thank you!

Elina Paukku
VTT / Structural Materials
Group

elina.paukku@vtt.fi
Puh. 050 – 328 6929
vttresearch.com