

Betonin jäähdytystarpeen arvioiminen

Siltapäivät 2025

Jouni Punkki,
Betoniviidakko Oy, Aalto-yliopisto

4.2.2025



Taustaa

- Sementin reaktiot tuottavat runsaasti lämpöä
 - Seosaineet, esim. masuunikuona tuottaa alkuvaiheessa hyvin vähän lämpöä
 - Kiviaines ei tuota lämpöä, sementti lämmittää kiviaineksen
 - Olennaista
 - Sementtiklinkkerin määrä
 - Sementin laatu (kemiallinen koostumus, hienous)
- Rakenteen massiivisuus vaikuttaa olennaisesti
 - Lämpöä poistuu muottipinnan läheisyydestä, mutta syvällä rakenteen sisällä ulkoilma ei juurikaan vaikuta
- Liian korkea lämpötila aiheuttaa ongelmia
 - Lujuuskatoa
 - Säilyvyysriskejä (Viivästynyt ettringiitin muodostuminen)

Vaatimukset lämpötilojen osalta

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

InfraRYL (42020.3.5):

Betonoitavan rakenneosan minkään poikkileikkauksen eri osien välillä (esim. lämpötilaero pilarin tietyssä poikkileikkauksessa sisäosan ja pinnan välillä) ei saa olla suurempi kuin 20 °C.

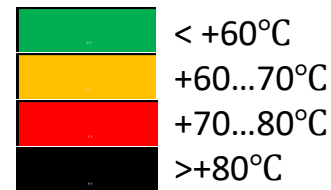
Prosessi lämpötilojen hallintaan (tavoite)

1. Suunnittelija arvioi rakenteen, lujuusluokan ja P-luvun avulla alustavasti jäähdytystarvetta (esim. by 78)
2. Mikäli jäähdytys todennäköisesti tarvitaan, suunnittelija miettii jäähdytysputkien sijoittelua ja tekee niille varaukset
3. Kun urakoitsija ja betonin toimittaja on valittu, tarkistetaan jäähdytystarve uudelleen
 - Yleensä betonin valmistaja tekee laskelmat, betonilaatu ja olosuhteet tiedetään
4. Mikäli jäähdytys tarvitaan, suunnittelija suunnittelee jäähdytysputkistot yhteistyössä urakoitsijan kanssa
5. Urakoitsija vastaa jäähdytyksestä
6. Lämpötiloja mitataan valujen aikana ja jäähdytystehoa korjataan tarvittaessa

Maksimilämpötilojen alustavaa arviointia (by 78)

P-lukubetonit

P-LUKUBETONIT		Sem	Vesi	v/s	Ilma	1 m rakenne		2 m rakenne	
						Kylmä	Lämmin	Kylmä	Lämmin
C30/37 P0	CEM I	345	190	0,55	2,0 %	Yellow	Red	Red	Black
	CEM II/B					Green	Yellow	Yellow	Red
	CEM III/A					Green	Green	Yellow	Yellow
	CEM I + 70% kuonaa					Green	Green	Green	Green
C35/45 P0	CEM I	360	190	0,53	2,0 %	Red	Red	Black	Black
	CEM II/B					Green	Yellow	Yellow	Red
	CEM III/A					Green	Green	Yellow	Yellow
	CEM I + 70% kuonaa					Green	Green	Green	Green
C30/37 P30	CEM I	380	190	0,50	5,0 %	Red	Black	Black	Black
	CEM II/B	400	190	0,48		Yellow	Red	Red	Red
	CEM III/A	440	180	0,44		Green	Yellow	Red	Red
C35/45 P30	CEM I	380	190	0,50	5,0 %	Red	Black	Black	Black
	CEM II/B	400	190	0,48		Yellow	Red	Red	Red
	CEM III/A	440	180	0,41		Green	Yellow	Red	Red
C35/45 P50	CEM I	440	180	0,41	5,5 %	Black	Black	Black	Black
	CEM II/B	450	180	0,40		Yellow	Red	Red	Black
	CEM III/A	485	170	0,35		Green	Yellow	Red	Red
C45/55 P50	CEM I	460	180	0,39	4,5 %	Black	Black	Black	Black
	CEM II/B	470	180	0,38		Yellow	Red	Red	Black
	CEM III/A	500	170	0,34		Green	Yellow	Red	Red



Jäähdytyksen mallintamista

Diplomityö: Henri Tähkänen, 2024, Aalto-yliopisto

Nesteputkijäähdytteisen massiivivalubetonin fysikaalinen mallinnus

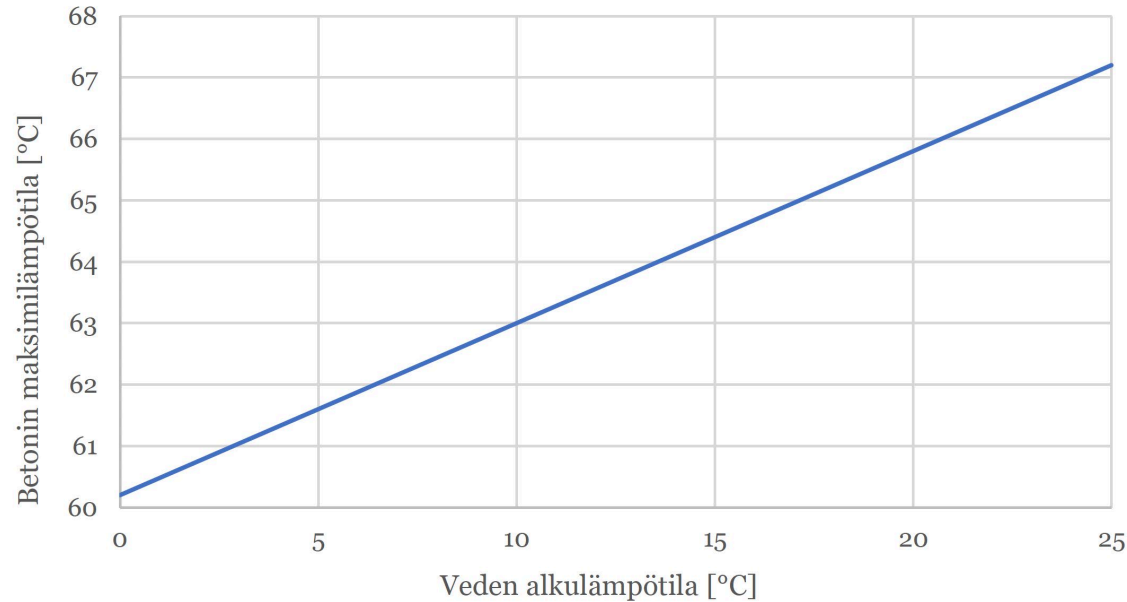
- Tarkasteltu mm.:
 - Jäähdytysputken materiaalin vaikutus
 - Jäähdytysputken halkaisijan vaikutus
 - Jäähdytysveden lämpötilan vaikutus
 - Jäähdytysveden virtausnopeus ja putken pituus
 - Jäähdytysputkien jakoväli
 - Betonin alkulämpötila
 - Raudoituksen vaikutus
 - Rakenteen geometrian vaikutus
 - Betonin halkeiluerkkyys eri tilanteissa

Artikkeli Betoni-lehdessä 04/24:

https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2024/12/BET_2404_68-75.pdf

Jäähdytyksen mallintamista

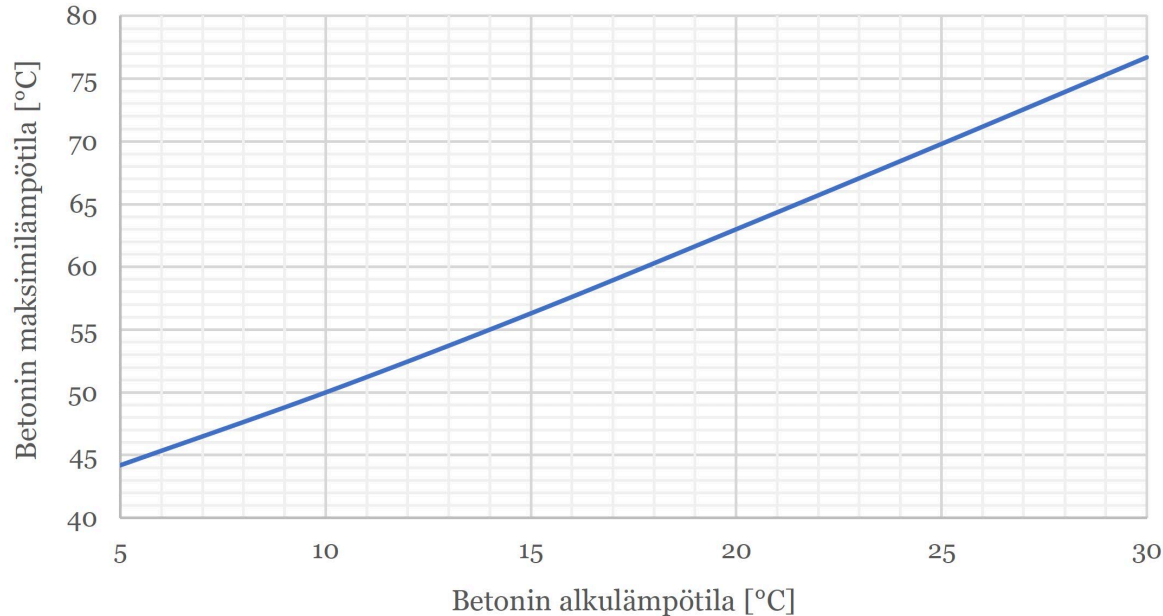
Jäähdytysveden lämpötila, H.Tähkänen



Kuva 21: Jäähdytysveden lämpötilan vaikutus betonin maksimilämpötilaan, kun $T_0 = 20$ °C ja käytössä CEM II / B.

Jäähdytyksen mallintamista

Betonin alkulämpötilan vaikutus, H.Tähkänen

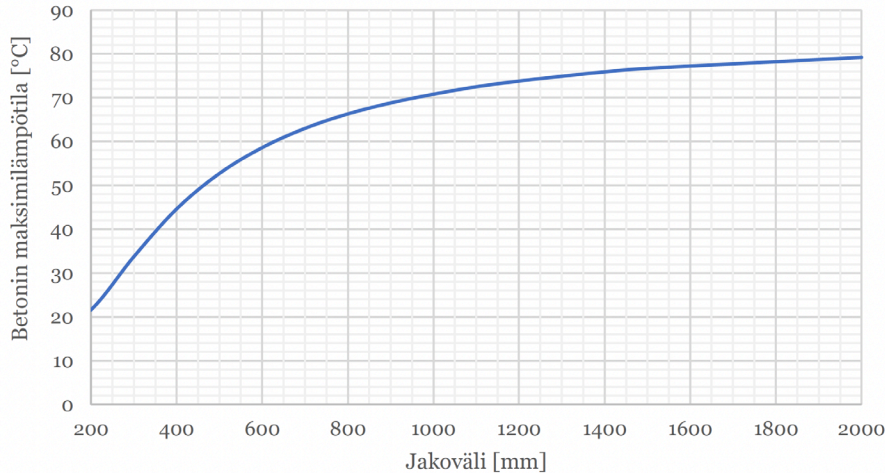


1 °C muutos betonin alkulämpötilassa
->
n. 1,3 °C muutos betonin maksimilämpötilaan

Kuva 30: Betonin alkulämpötilan vaikutus betonivalun maksimilämpötilaan.

Jäähdytyksen mallintamista

Jäähdytysputkien jakoväli, H.Tähkänen



Kuva 29: Jäähdytysputkien jakovälin vaikutus betonin maksimilämpötilaan, CEM II / B -sementtiä 450 kg/m³.

Taulukko 7: Jäähdytysputkien jakovälit sementille CEM II / B.

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

Jakoväli kun:

- 20 mm muoviputki
- Virtausnopeus: 1,5 m/s
- Veden lämpötila: +10 °C
- Putken pituus: 100 m
- Betonin alkulämpötila: +20 °C

Yhteenveto

Jäähdytystä tarvitaan entistä useammin infrarakenteissa, erityisesti P50-betonit ja usein myös P30-betonit

1. Suunnittelija arvioi alustavasti jäähdytystarpeen
 - Tarvittaessa suunnitelmiin varaukset putkistoille
2. Urakoitsija tekee päätöksen jäähdytyksen käytöstä
 - Perustuu yleensä betonin valmistajan tekemiin mallinnuksiin
3. Tarvitaan yhteistyötä suunnittelijan, urakoitsijan ja betonin valmistajan kesken