
Betonin jäädyttäminen

Jäähdytystarpeen arviointi ja jäähdytys

Jouni Punkki
Professori, Betonitekniikka
Aalto-yliopisto

Sisältöä:

- Vaatimukset betonin lämpötilalle kovettumisen aikana
- Prosessi maksimilämpötilojen hallitsemiksi
- Maksimilämpötilojen alustavaa arviointia
- Jäähdytyksen mallintamista
 - Jäähdytysveden lämpötilan vaikutus
 - Betonin alkulämpötilan vaikutus
 - Jäähdytysputkien jakovälin vaikutus
- Yhteenvedo

Taustaa

Sementin reaktiot tuottavat runsaasti lämpöä (reaktiot ovat eksotermisiä)

- Seosaineet, esim. masuunikuona tuottavat alkuvaiheessa vain vähän lämpöä
- Kiviaines ei tuota lämpöä, sementti lämmittää kiviaineksen
- Olennaisinta on:
 - Sementtiklinkkerin määrä
 - Sementin laatu (kemiallinen koostumus, hienous)

Rakenteen massiivisuus vaikuttaa olennaisesti betonin lämpötilaan

- Lämpöä poistuu muottipinnan läheisyydestä, mutta syvällä rakenteen sisällä ulkoilma ei juurikaan vaikuta

Liian korkea lämpötila sekä myös lämpötilaerot aiheuttavat ongelmia

- Halkeilua
- Lujuuskatoa
- Säilyvyysriskejä (DEF = viivästynyt ettringiitin muodostuminen)

A!

Vaatimukset maksimilämpötilojen osalta

Toteutunut maksimilämpötila	Vaikutukset lujuusominaisuuksiin	Vaikutukset säilyvyysominaisuuksiin
$\leq +60^{\circ}\text{C}$	Ei vaadita toimenpiteitä	Ei vaadita toimenpiteitä
$+60...70^{\circ}\text{C}$	Lujuuskato voidaan arvioida laskennallisesti: $+60^{\circ}\text{C}$ ylittävä	Ei vaadita toimenpiteitä
$+70...80^{\circ}\text{C}$	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.
$>+80^{\circ}\text{C}$	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 .

A!

Miten maksimilämpötilat voidaan hallita

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, kun 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

A!

Maksimilämpötilojen alustavaa arviointia (by 78)

Huokostamattomat betonit

HUOKOSTAMATTOMAT		Sem	Vesi	v/s	Ilma	1 m rakenne		2 m rakenne	
						Kylmä	Lämmin	Kylmä	Lämmin
C25/30	CEM I	260	182	0,70	2 %				
	CEM II/B								
	CEM III/A								
	CEM I + 70% kuonaa								
C30/37	CEM I	300	180	0,60	2 %				
	CEM II/B								
	CEM III/A								
	CEM I + 70% kuonaa								
C35/45	CEM I	330	180	0,55	2 %				
	CEM II/B								
	CEM III/A								
	CEM I + 70% kuonaa								
C40/50	CEM I	360	180	0,50	2 %				
	CEM II/B								
	CEM III/A								
	CEM I + 70% kuonaa								
C45/55	CEM I	400	180	0,45	2 %				
	CEM II/B								
	CEM III/A								
	CEM I + 70% kuonaa								
C50/60	CEM I	450	180	0,40	2 %				
	CEM II/B								
	CEM III/A								
	CEM I + 70% kuonaa								

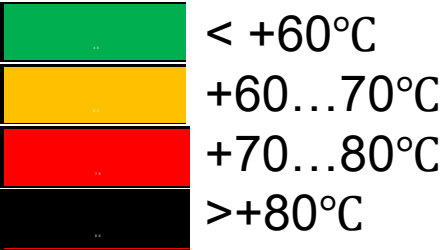
	< +60°C
	+60...70°C
	+70...80°C
	>+80°C

A!

Maksimilämpötilojen alustavaa arviointia (by 78)

Huokostetut betonit

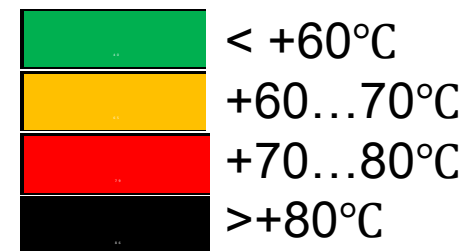
HUOKOSTETUT		Sem	Vesi	v/s	Ilma	1 m rakenne		2 m rakenne	
						Kylmä	Lämmin	Kylmä	Lämmin
C30/37	CEM I	330	180	0,55	5 %				
	CEM II/B								
	CEM III/A								
	CEM I + 70% kuonaa								
C35/45	CEM I	360	180	0,50	5 %				
	CEM II/B								
	CEM III/A								
	CEM I + 70% kuonaa								
C40/50	CEM I	400	180	0,45	5 %				
	CEM II/B								
	CEM III/A								
	CEM I + 70% kuonaa								
C45/55	CEM I	450	180	0,40	5 %				
	CEM II/B								
	CEM III/A								
	CEM I + 70% kuonaa								



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 %				
	CEM II/B								
	CEM III/A								
	CEM I + 70% kuonaa								
C35/45 P0	CEM I	360	190	0,53	2,0 %				
	CEM II/B								
	CEM III/A								
	CEM I + 70% kuonaa								
C30/37 P30	CEM I	380	190	0,50	5,0 %				
	CEM II/B	400	190	0,48					
	CEM III/A	440	180	0,44					
C35/45 P30	CEM I	380	190	0,50	5,0 %				
	CEM II/B	400	190	0,48					
	CEM III/A	440	180	0,41					
C35/45 P50	CEM I	440	180	0,41	5,5 %				
	CEM II/B	450	180	0,40					
	CEM III/A	485	170	0,35					
C45/55 P50	CEM I	460	180	0,39	4,5 %				
	CEM II/B	470	180	0,38					
	CEM III/A	500	170	0,34					



A!

Jäähdytyksen mallintamista

Diplomityö: Henri Tähkänen, 2024, Aalto-yliopisto

Nesteputkijäähdytteisen massiivivalubetonin fysikaalinen mallinnus

Tarkasteltu mm.:

- Jäähdytysputken materiaalin ja halkaisijan vaikutus
- Jäähdytysveden lämpötilan, virtausnopeuden ja putken pituuden vaikutus
- Jäähdytysputkien jakoväli
- Betonin alkulämpötila
- Raudoituksen vaikutus
- Rakenteen geometrian vaikutus
- Betonin halkeiluherkkyys eri tilanteissa

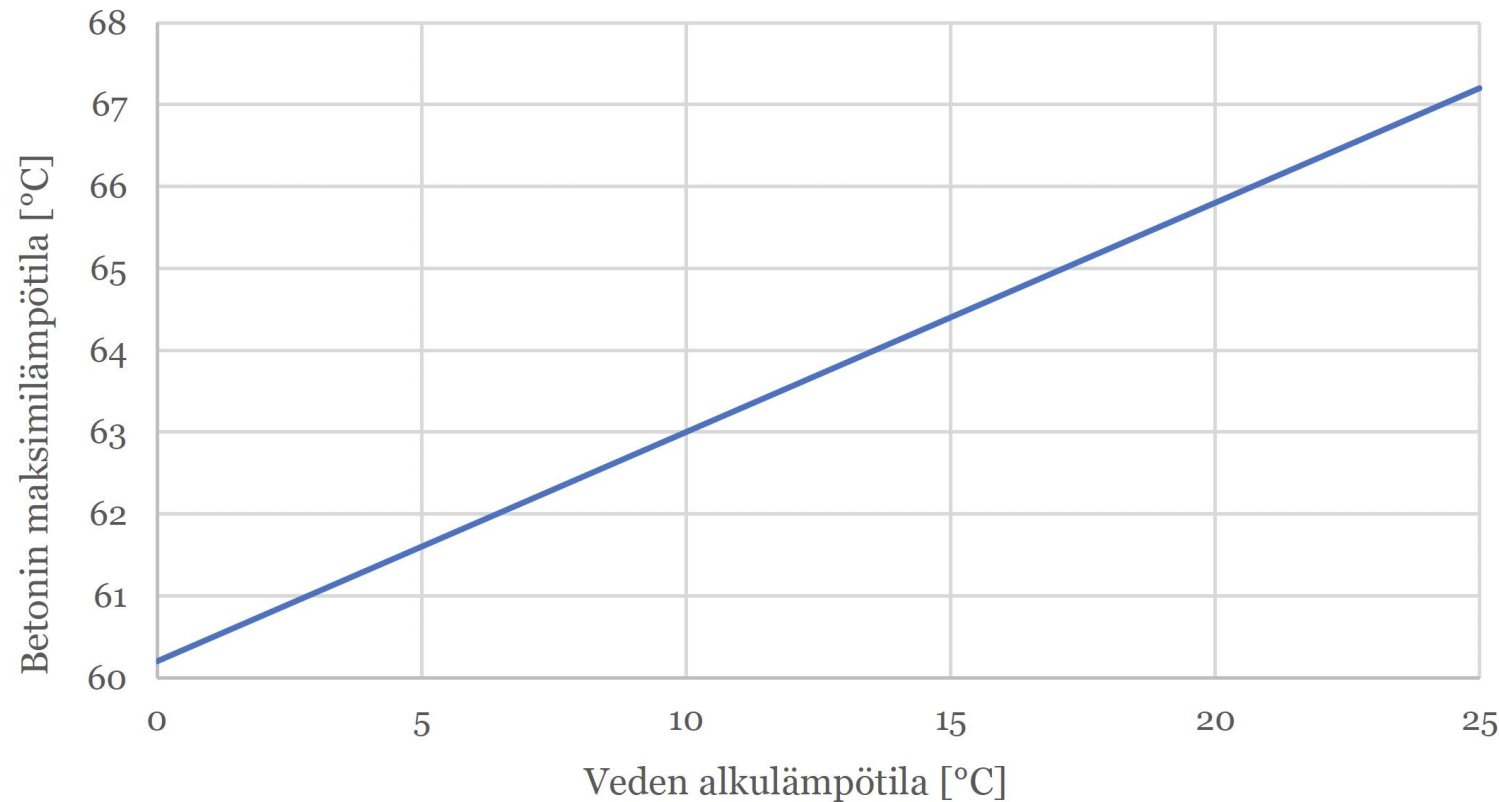
A!

Artikkeli Betoni-lehdessä 04/24:

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

Jäähdytyksen mallintamista

Jäähdytysveden lämpötilan vaikutus, H.Tähkänen

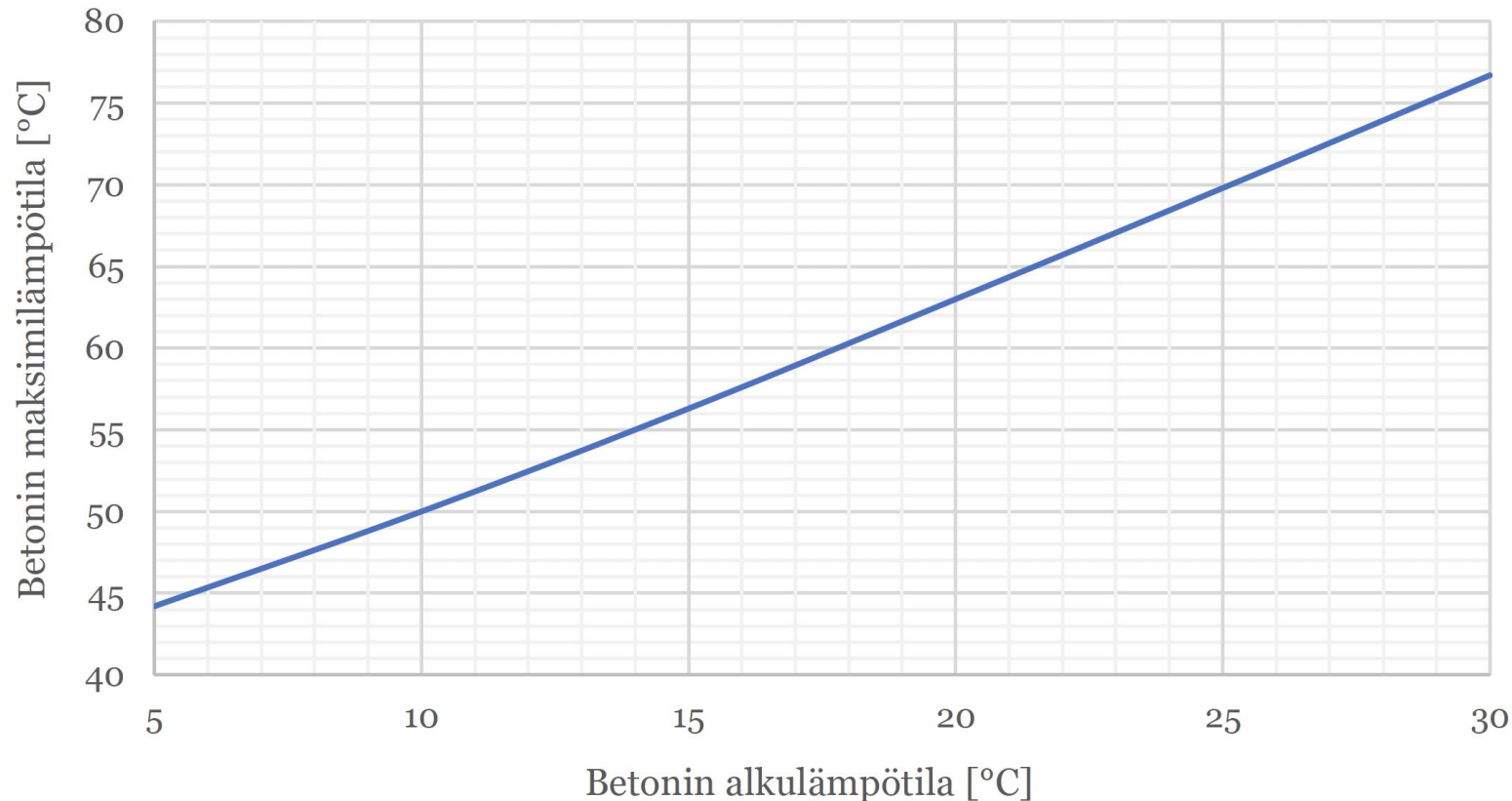


Kuva 21: Jäähdytysveden lämpötilan vaikutus betonin maksimilämpötilaan, kun $T_0 = 20$ °C ja käytössä CEM II / B.

A!

Jäähdytyksen mallintamista

Betonin alkulämpötilan vaikutus, H.Tähkänen



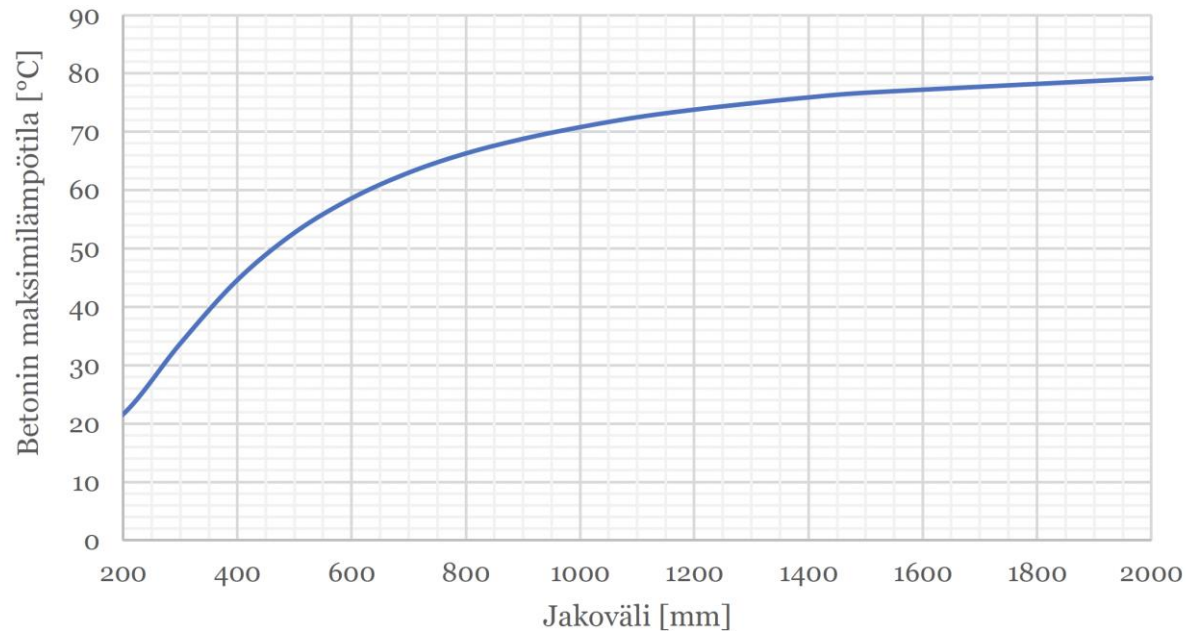
1 °C muutos betonin
alkulämpötilassa
->
n. 1,3 °C muutos
betonin
maksimilämpötilaan

Kuva 30: Betonin alkulämpötilan vaikutus betonivalun maksimilämpötilaan.

A!

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 massiivisissa rakenteissa. Massiiviset infrarakenteet, erityisesti P50-betonit, edellyttävät usein jäähdytystä.

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



**Todellinen näkymä betonin
jäähdyttämisestä**

A!

—

Kiitos
aalto.fi