

# Massiivisten betonivalujen lämmönkehityksen, putkistojäähdytyksen ja halkeilun laskennallinen mallintaminen



Aalto-yliopisto  
Aalto-universitetet  
Aalto University

Ohjaaja: Jouni Punkki

Valvoja: Jarkko Niiranen

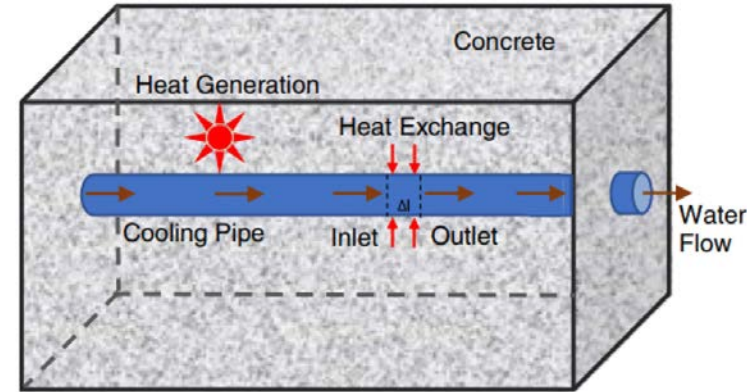
Henri Tähkänen

WSP Finland Oy

20.11.2024

# Työn tausta

- Sementin hydrataatiossa vapautuu lämpöä
  - Liikaa lämpöä → ongelmia lujuudessa ja kestävyudessa
  - Massiivibetonirakenteet
- Nesteputkijäähdytys ratkaisuna
- Tutkimusaiheet:
  - Nesteputkijäähdytyksen mallintaminen
  - Jäähdytysparametrien ja geometrian vaikutus betonin lämpötilajakaumaan
  - Jäähdytysputkiston alustava suunnittelu



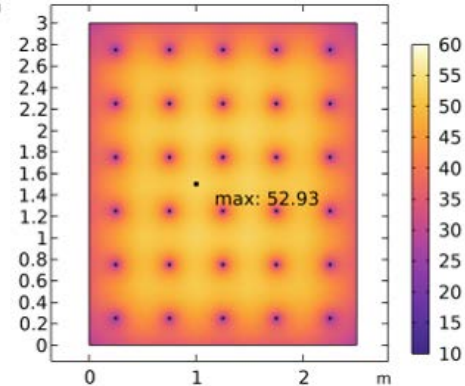
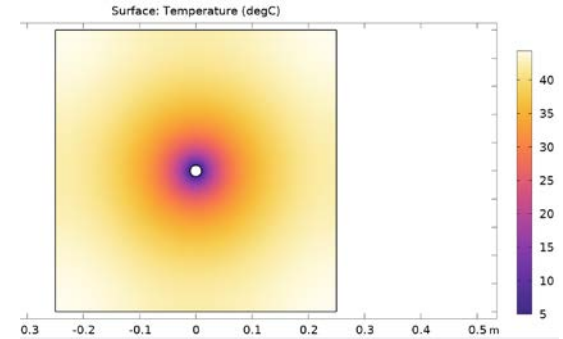
# Työn rakenne

- Fysikaalinen tausta
- Elementtimenetelmä
  - Kirjallisuudesta analyttisiä ja FEM-malleja
  - Suoran menetelmän johtaminen
- Betonin lämpötilamallinnuksia
  - 2d- ja 3d-laskentamallit
  - Parametritarkastelut
  - Geometria
- Betonin halkeilun arvioiminen
  - Mekaniikkamalli
  - Jännitykset ja vaurioituminen



# Tasomalli

- COMSOL Multiphysics
- Yhden putken jäähdyttämä alue = jäähdytyssolu
  - Ulkoreunat eristetty
  - Keskellä 20 mm muoviputki, sisäpinnalla veden lämpötila
- Lämmöntuoton mallinnus
  - Kypsyysikä ja hydrataatioaste
- Betonin ominaisuudet hydrataatioasteesta riippuvina<sup>m</sup>
  - $k(a) = k(\text{final}) * (1.33 - 0.33 * a/au)$
  - $C(a) = C(\text{final}) * (1.15 - 0.15 * a/au)$



# Lämmöntuoton parametrit

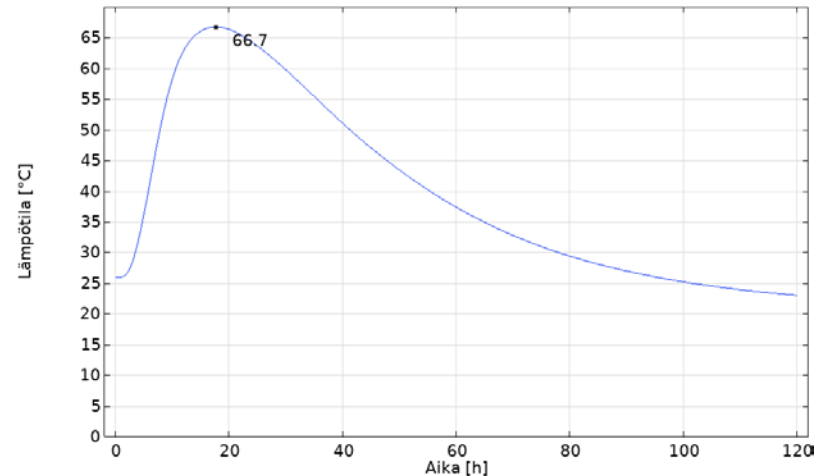
Taulukko 3: Betonien sementtimäärät ja suurimmat hydrataatioasteet

Betoni	Sementti	Sementti- määrä W [kg/m <sup>3</sup> ]	v/s -suhde	$\alpha_u$ [-]
C30/37 Po	CEM I	345	0,55	0,890
	CEM II / B			0,820
	CEM III / A			0,860
C30/37 P30	CEM I	380	0,50	0,880
	CEM II / B	400	0,48	0,800
	CEM III / A	440	0,44	0,790
C35/45 Po	CEM I	360	0,53	0,881
	CEM II / B			0,810
	CEM III / A			0,850
C35/45 P30	CEM I	380	0,50	0,880
	CEM II / B	400	0,48	0,800
	CEM III / A	440	0,41	0,790
C35/45 P50	CEM I	440	0,41	0,820
	CEM II / B	450	0,40	0,750
	CEM III / A	485	0,35	0,720
C45/55 P50	CEM I	460	0,39	0,790
	CEM II / B	470	0,38	0,730
	CEM III / A	500	0,34	0,700

Taulukko 2: Eri sementtien lämmöntuoton parametrit.

Sementti	$E_a$ [kJ/mol]	H <sub>r</sub> [kJ/kg]	$t_{ref}$ [h]	$\beta$ [-]
CEM I	46,0	510	17	0,65
CEM II / B	45,12	470	16	0,58
CEM III / A	39,955	475	35	0,56

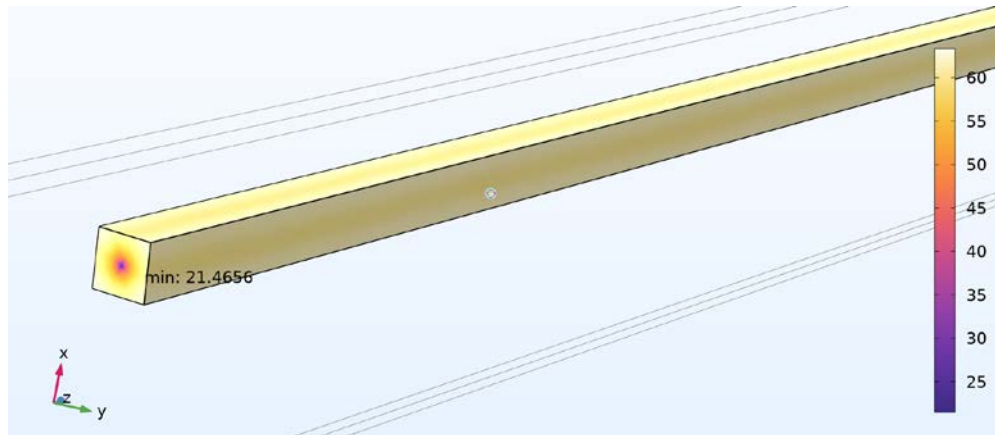
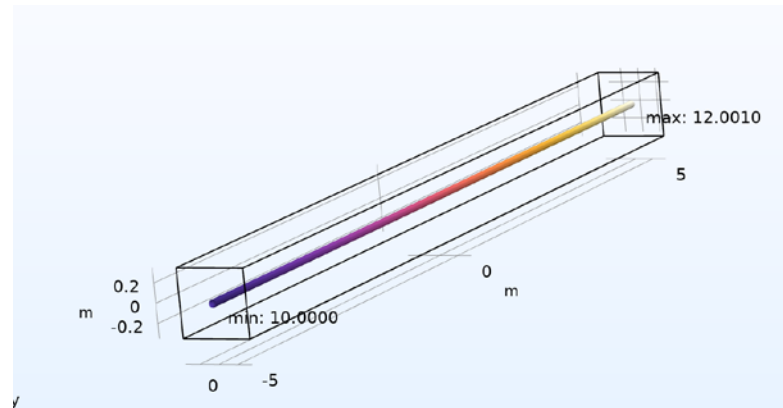
$$q(t) = Q_{\infty} * \alpha_u * e^{-\left(\frac{t_{ref}}{t_e}\right)^{\beta}} * \frac{\beta}{t_e} * \left(\frac{t_{ref}}{t_e}\right)^{\beta} * e^{\frac{E_a}{R} * \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c(t)}\right)}$$



$$t_e = \int_0^t e^{\frac{E_a}{R} * \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c(t)}\right)} dt,$$

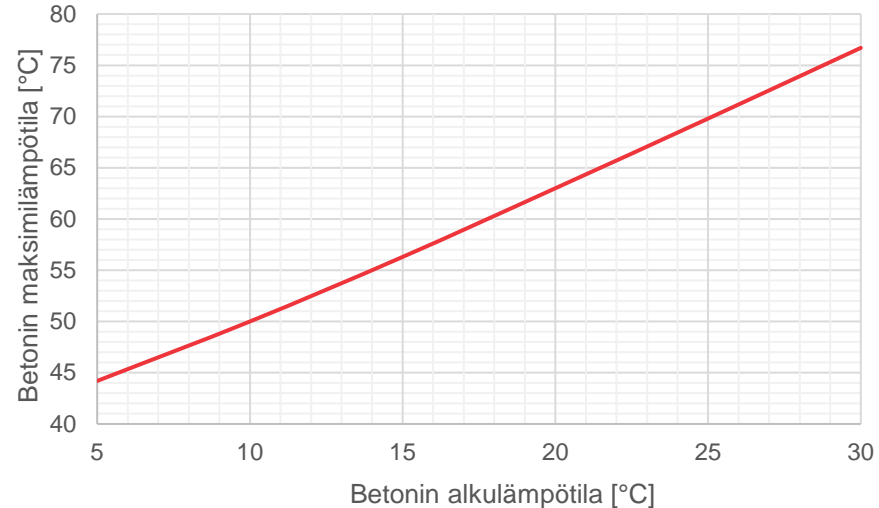
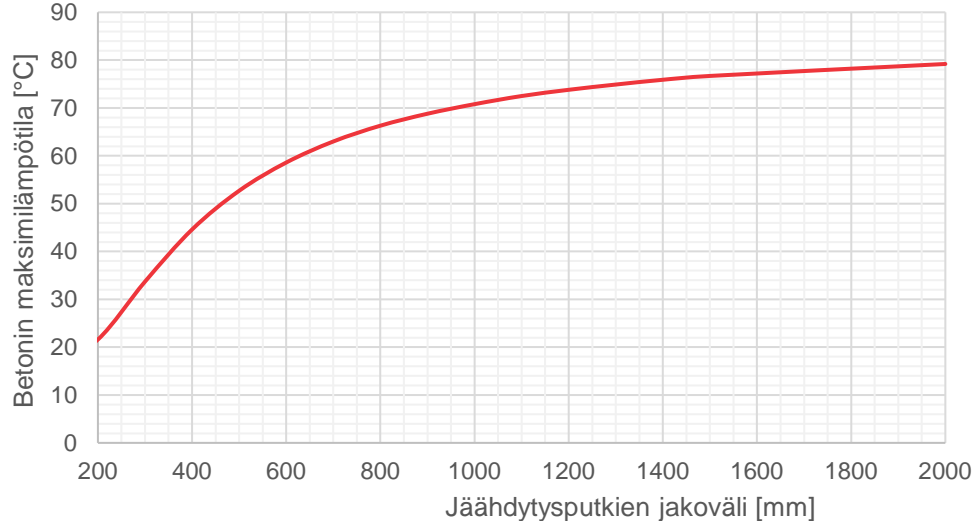
# Kolmiulotteinen malli

- Tasomallin ideat hyödynnetty
- Lisänä putkivirtausmoduuli
  - Viivaelementti
  - Materiaalina vesi
  - Asetetaan virtaus
  - Määritetään veden ympärille putken ominaisuudet
  - Ohjelma laskee konvektion
- Kytkee putken ja betonin lämpötilakentät



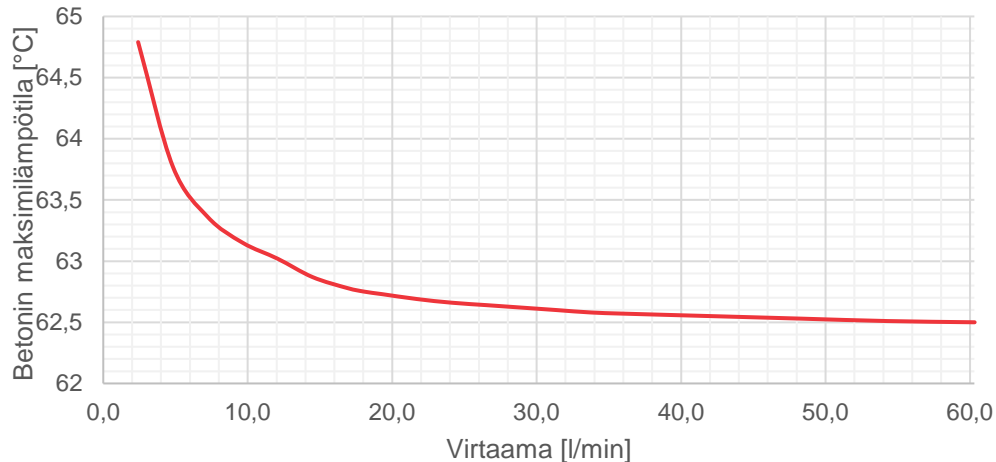
# Jäähdytysparametrien vaikutus

- Putkien jakovälin vaikutus suurin
- Myös betonin alkulämpötila keskeinen



# Jäähdytysparametrien vaikutus

- Virtausnopeudella kumulatiivinen vaikutus
- Muiden vaikutus vähäisempi
  - Veden lämpötila
  - Putken halkaisija ja materiaali

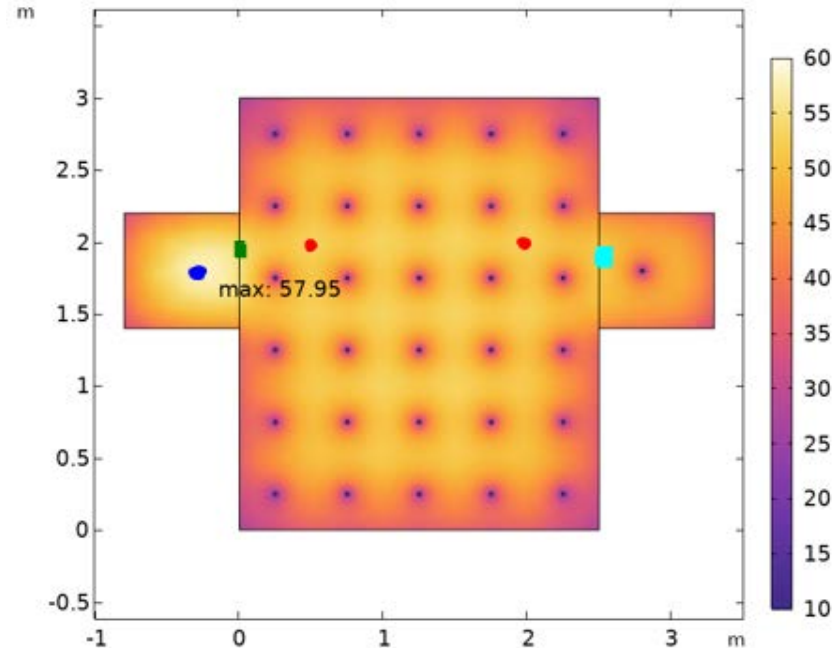
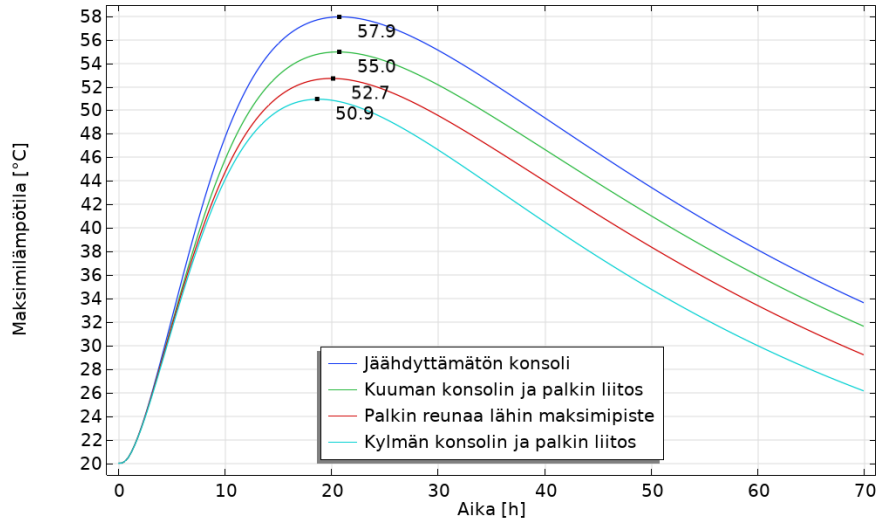


Parametri	Vaikutus betonin maksimilämpötilaan
Veden lämpötila (0–25 °C)	+0,3–0,6 [°C / °C]
Putken halkaisija (15–50 mm)	-0,2 [°C / mm]
Betonin alkulämpötila (5–30°C)	+1,3 [°C / °C]
Virtaama 2,4–10 [l/min] (50 m putki)	-0,71 [°C / (l/min)]
Virtaama 10–22 [l/min] (50 m putki)	-0,1 [°C / (l/min)]
Virtaama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

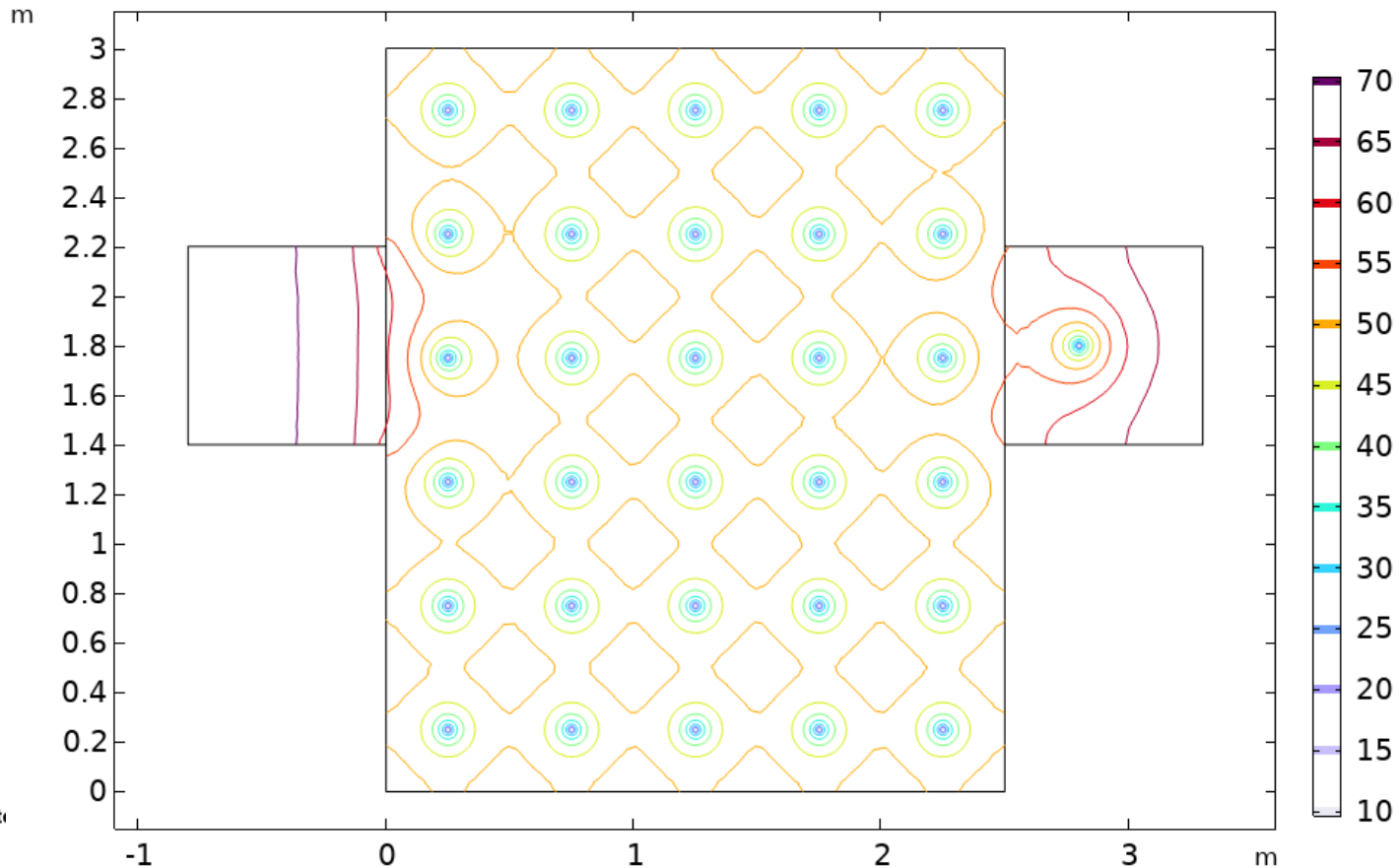


# Geometrian merkitys

- Lähinnä jäädytetyn ja jäädyttämättömän betonin liitospinnassa
- Vaikutus ei ulotu kovin syväälle

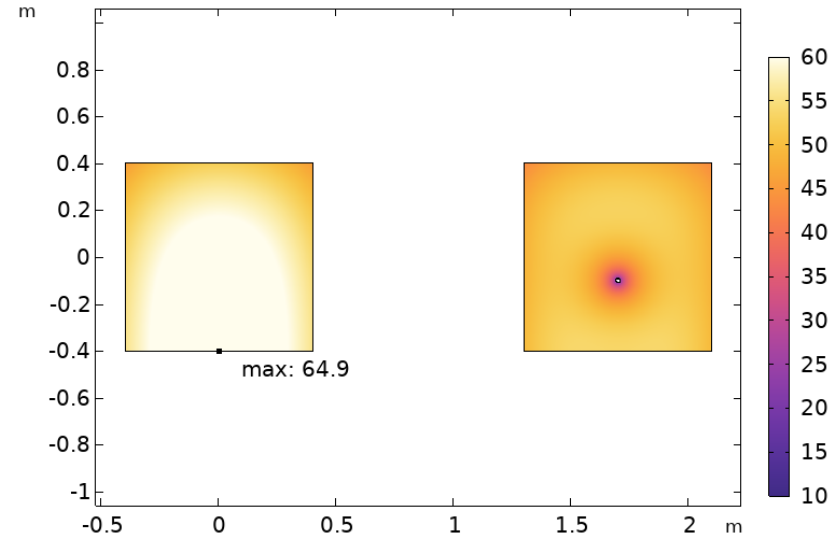


# Geometrian merkitys



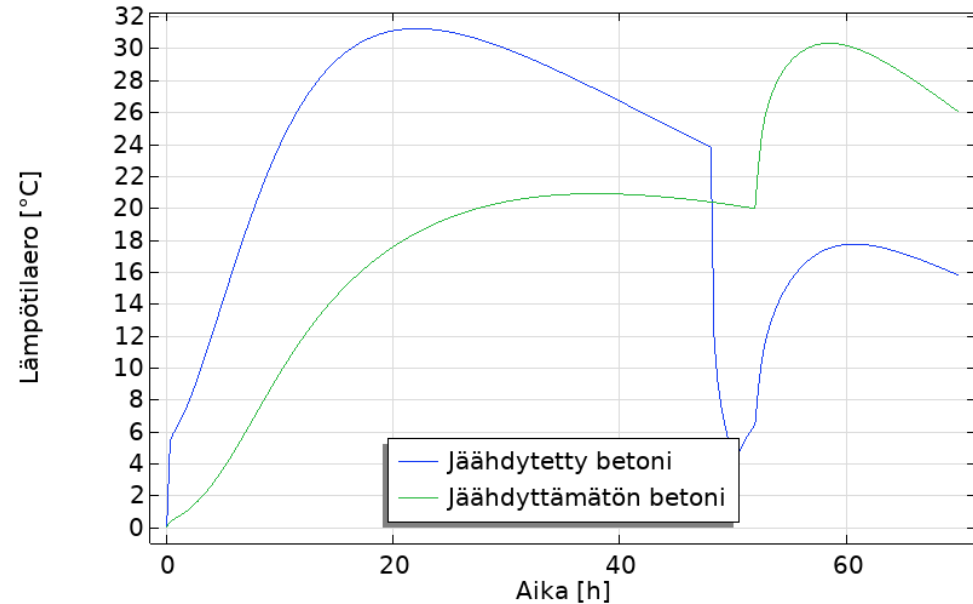
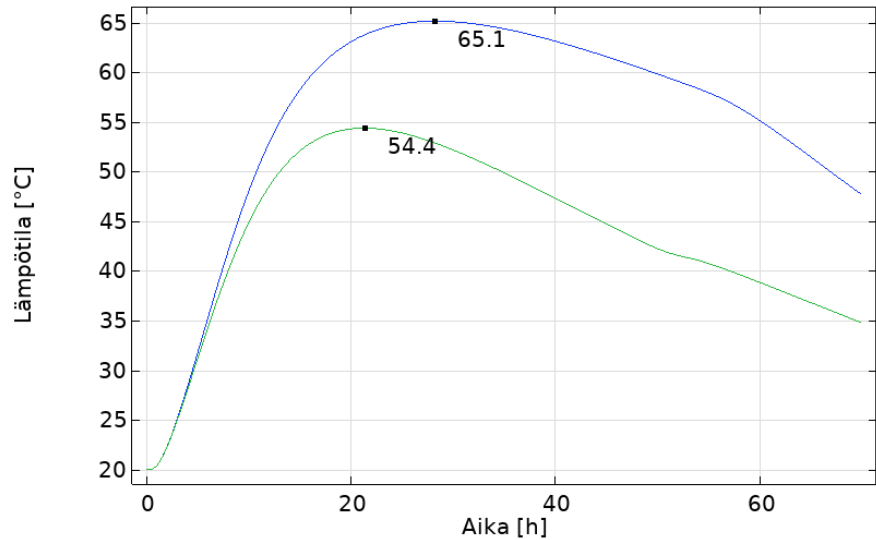
# Betonin mekaniikkamalli

- Mekaniikan kytkevä laskentamalli
  - Viruma Norton-Bailey –mallilla
  - Vaurioituminen (phase field)
  - Lämpöjännitykset mukana
- Alareuna rullatuilla, muut vapaat
- Ulkoreunoilla konvektiota
  - 52h konvektio kasvaa
- Jäähdytyksen kesto 48 h
- Jäähdytetty ja jäähdyttämätön

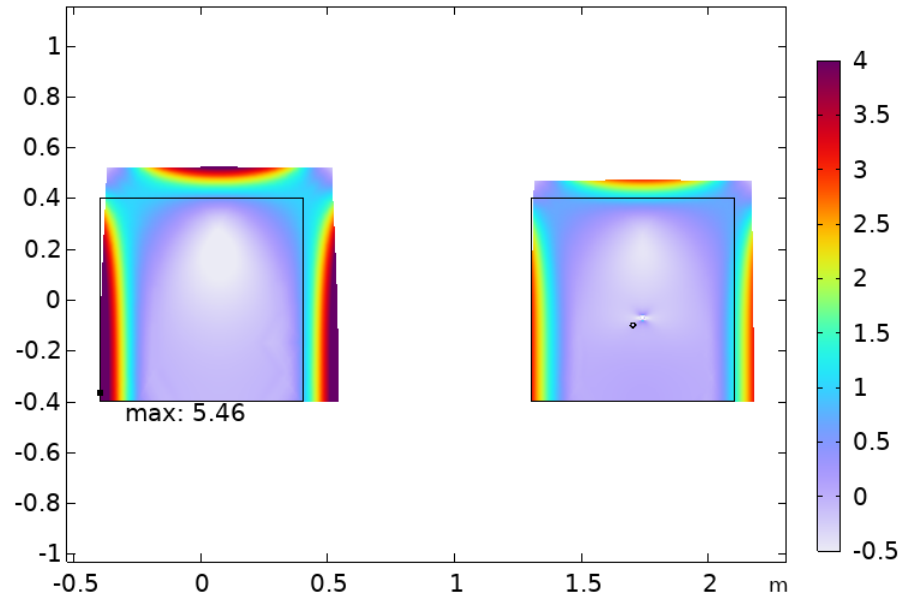
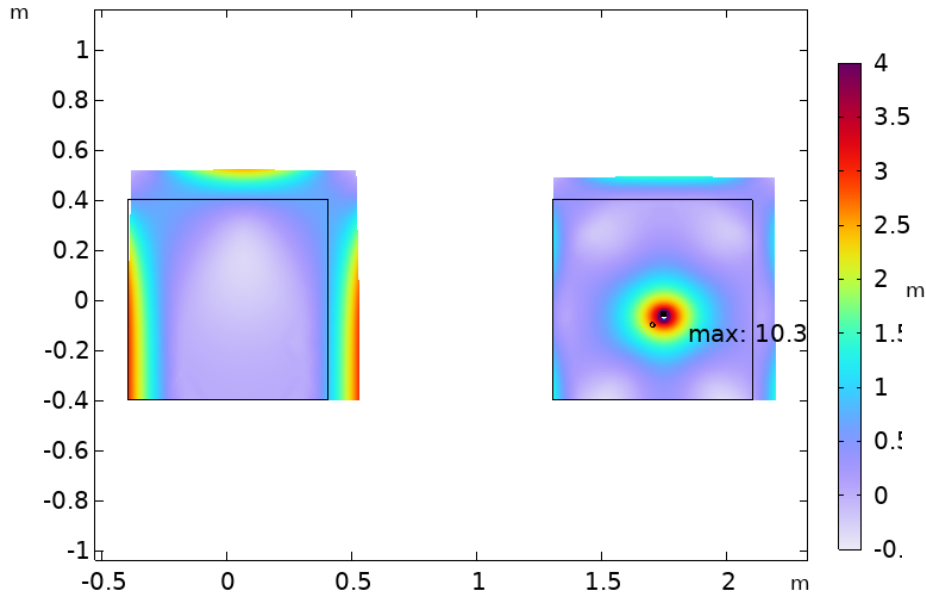


# Betonin lämpötilat

## Jäähdytetty ja jäähdyttämätön betonikappale

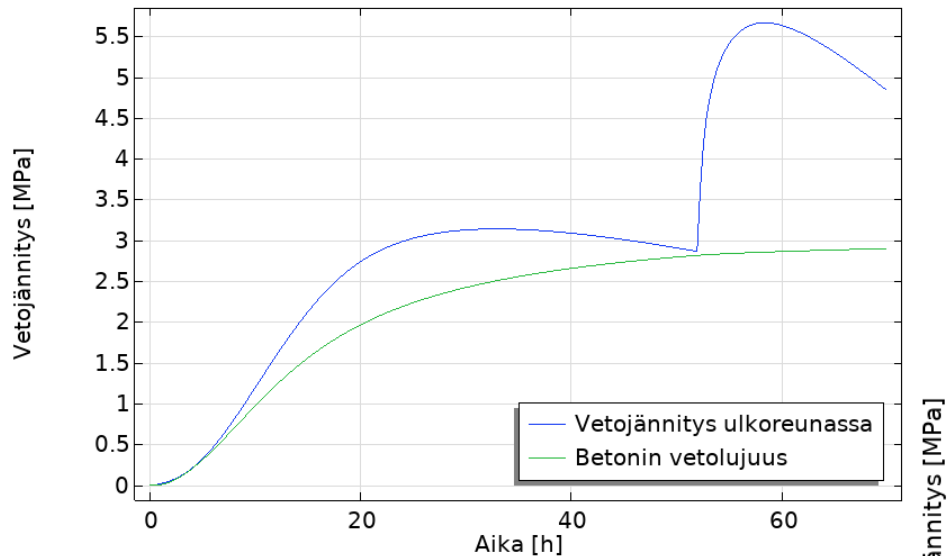


# Betonin jännitysjaakauma

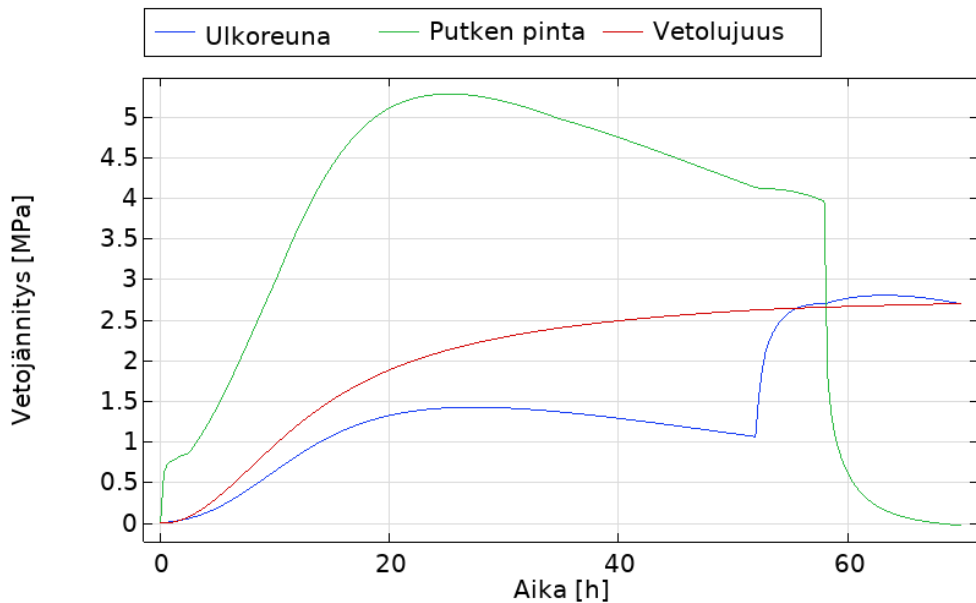


# Betonin jännitykset

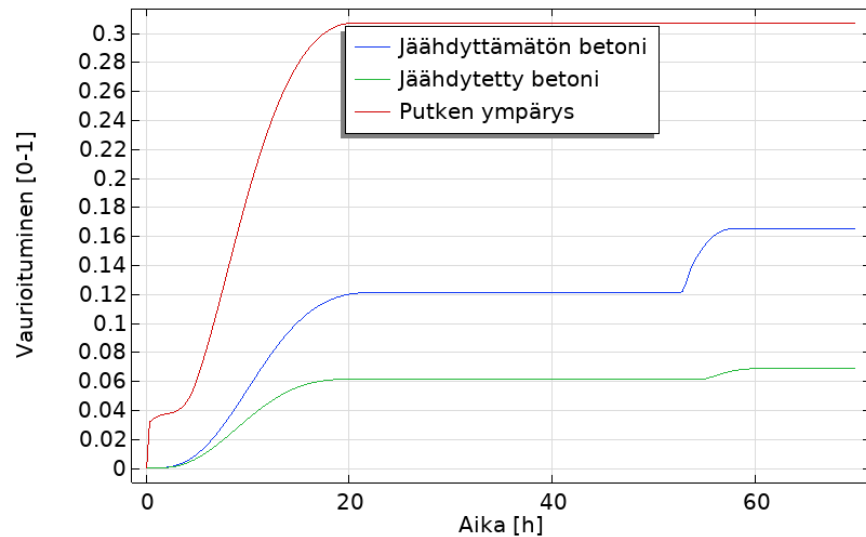
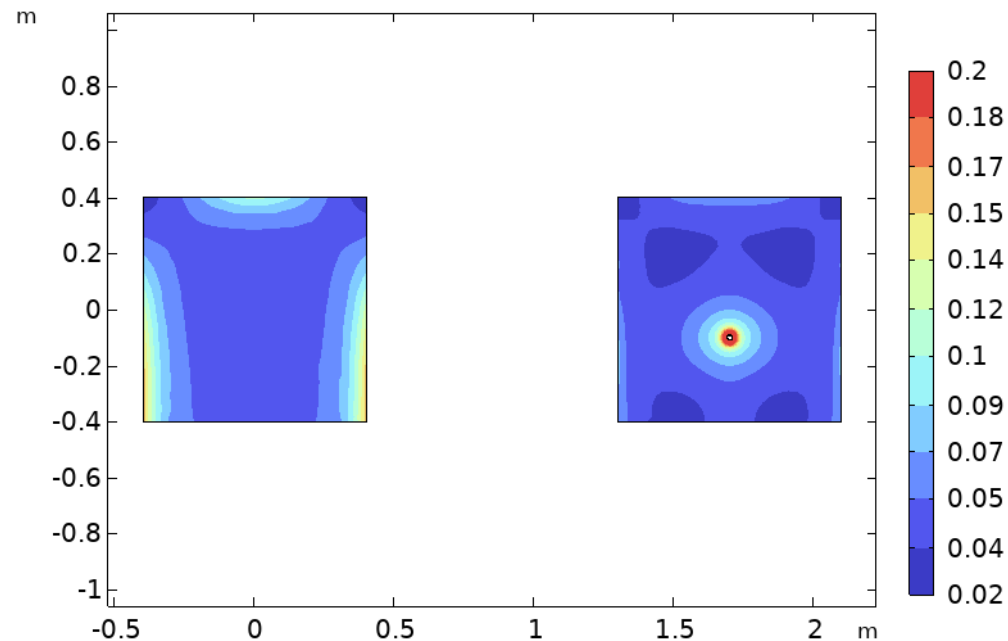
## Jäähdyttämätön



## Jäähdytetty



# Betonin vaurioituminen

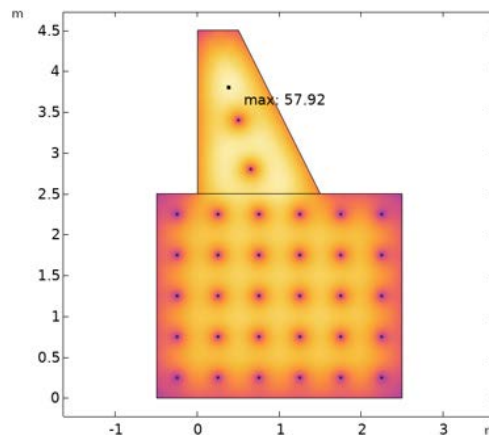


# Tulokset

- Mitoitusohjeistusta
  - Taulukot
    - Putkien jakoväleille
    - Yksinkertaiset tilanteet
  - 2d-malli
    - Konvektion korostuessa
    - Liitospintojen tarkastus
  - 3d-malli
    - Epäsäännöllinen geometria
    - Liitospinnat
- Parametrien vaikutukset

Taulukko 7: Jäähdytysputkien jakovälit sementille CEM II / B.

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



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





Aalto-yliopisto  
Aalto-universitetet  
Aalto University

# Kiitos!



[aalto.fi](https://aalto.fi)

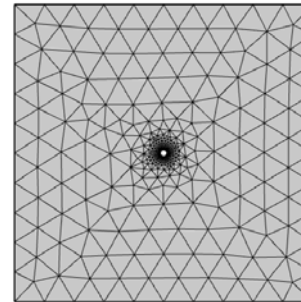
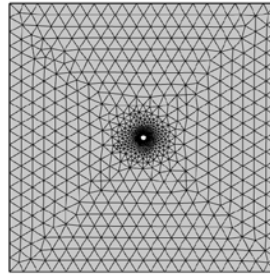
# Lisämateriaalia

# Jatkotutkimusideoita

- Betonin mallintaminen monesta aineesta koostuvana
  - Kontinuumin sijaan
  - Halkeilun yms. arviointi tarkemmin
- Betonin lämpötilaerojen yleinen hallinta
  - Esim. ulkoreunojen mahdollinen lämmitys talvella
- Tarkempi putkistosuunnittelu
- Jäähdytysvaikutusten riippuvuus sementistä

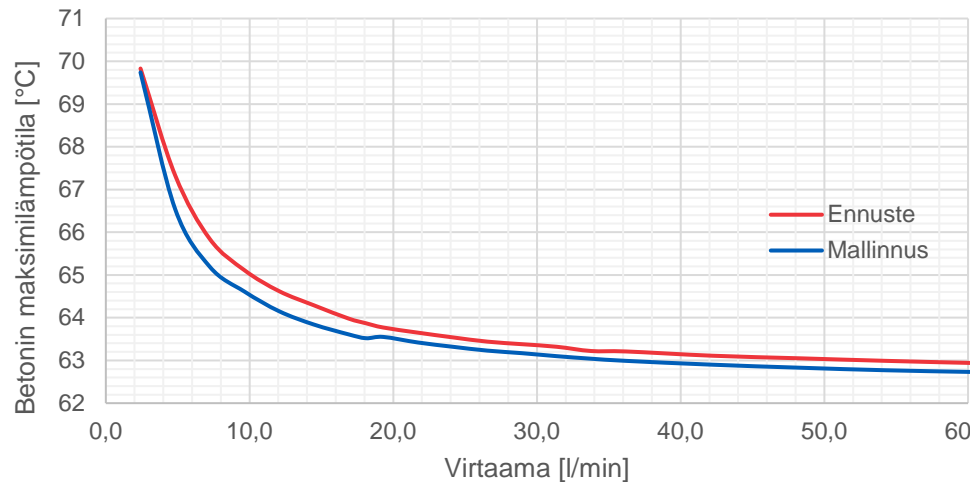
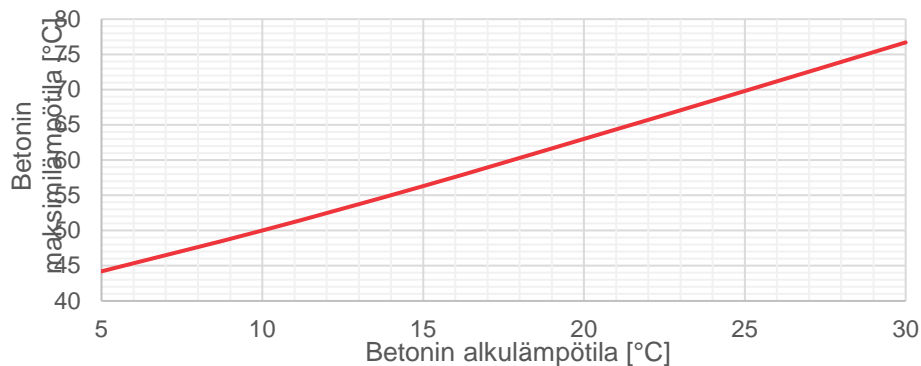
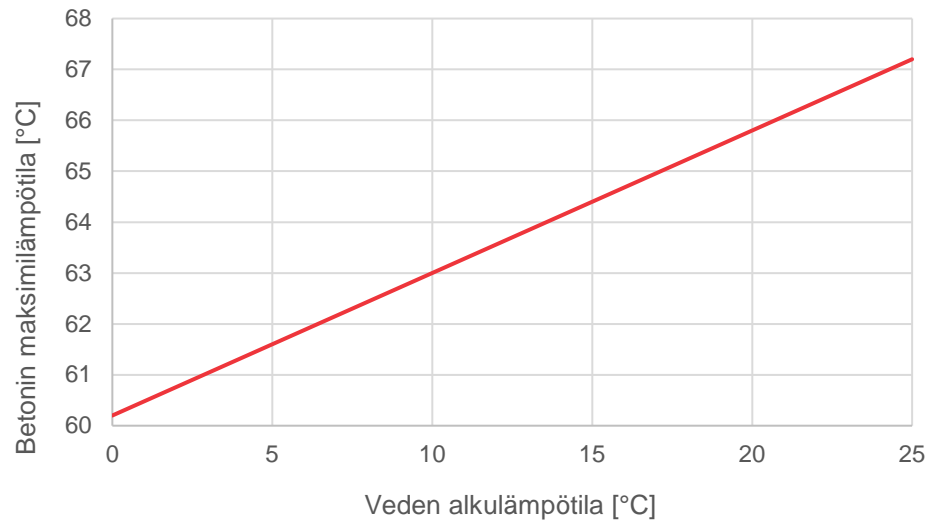
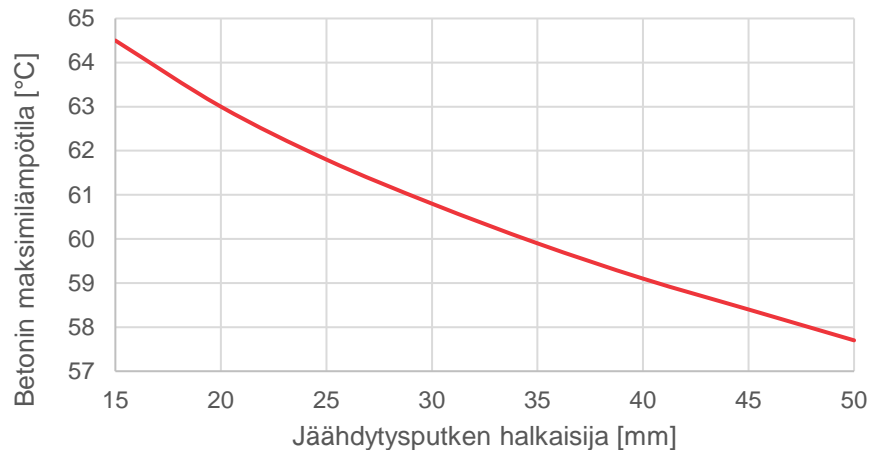
# Mallien virheen arviointi

- Lähtötietojen oikeellisuus ja tarkkuus
  - Lämmöntuoton parametrit!
  - Viruma- ja vaurioparametrit
- Lähtöoletukset (kontinuumi, lineaariselastisuus, isotrooppisuus)
  - Reunaehtojen oikeellisuus / kuvaavuus
- Elementtien koko yms.
- Aika-askeleen pituus
- Kuvaavat funktiot (aste)

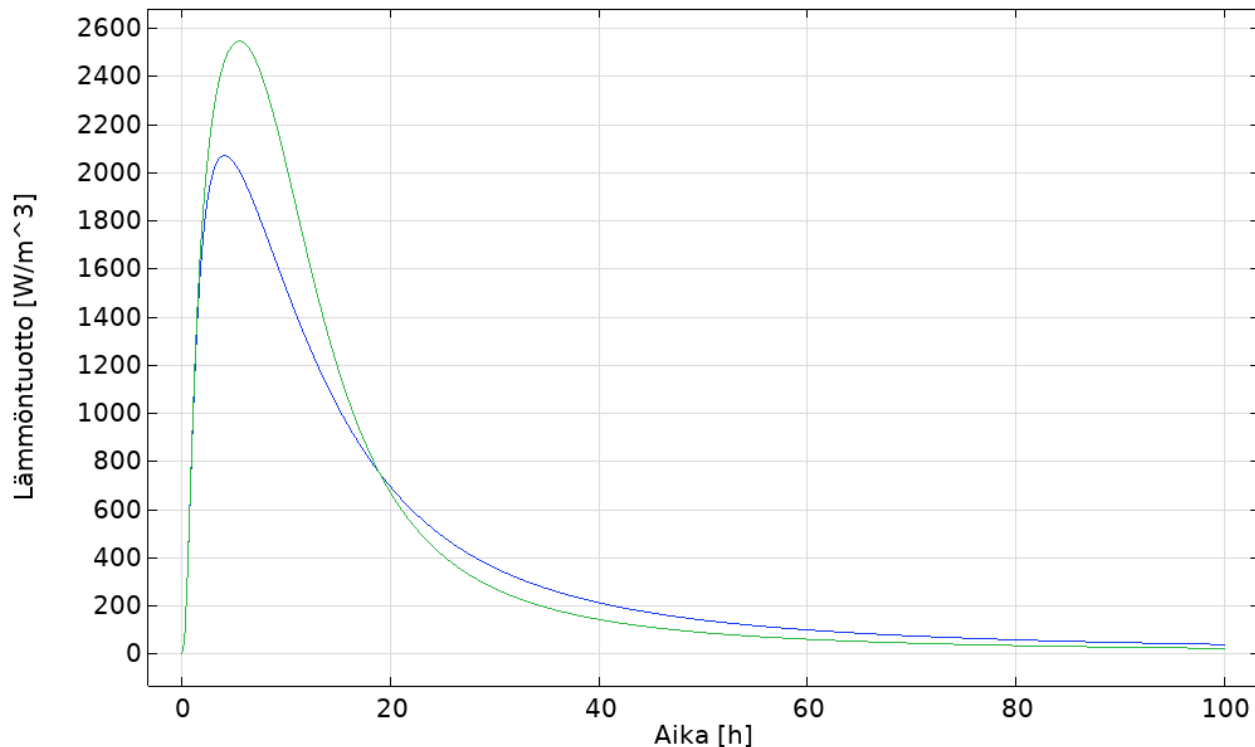


Parameters		
Name	Expression	Value
Ea	45120[J/mol]	45120 J/mol
R	8.314 [J/(mol*K)]	8.314 J/(mol*K)
beta	0.58	0.58
Hr	470[kJ/kg]	4.7E5 J/kg
p	450[kg/m^3]	450 kg/m^3
Tref	293.15[K]	293.15 K
au	0.75	0.75
tref	16[h]	57600 s
k_ref	1.87[W/(m*K)]	1.87 W/(m*K)
C_ref	900[J/(kg*K)]	900 J/(kg*K)
rho_b	2500[kg/m^3]	2500 kg/m^3
p2	300[kg/m^3]	300 kg/m^3

# Vaikutuskäyrät



# Lämmöntuotto



$$t_e = \int_0^t e^{\frac{E_a}{R} * (\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c(t)})} dt,$$

$$\alpha(t_e) = \alpha_u * e^{-\left(\frac{t_{ref}}{t_e}\right)^\beta},$$

$$q(t) = \frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{dt_e} \frac{dt_e}{dt} = Q_\infty \frac{d\alpha(t_e)}{dt_e} \frac{dt_e}{dt}$$

$$q(t) = Q_\infty * \alpha_u * e^{-\left(\frac{t_{ref}}{t_e}\right)^\beta} * \frac{\beta}{t_e} * \left(\frac{t_{ref}}{t_e}\right)^\beta * e^{\frac{E_a}{R} * (\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c(t)})}$$

# Norton-Bailey -virumamalli

- Huomioi virumahistorian:
  - Eri  $T$  ja  $\sigma \rightarrow$  erilainen viruma eri ajanhetkinä
  - Lämpötilan vaikutus mukana

$$\dot{\epsilon}_{cr} = A * \left( \frac{\sigma_e}{\sigma_{ref}} \right)^n * e^{\frac{Q_{cr}}{R} * \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)} * m * \left( \frac{t + t_{shift}}{t_{ref,cr}} \right)^{m-1} * \frac{\partial \sigma_e}{\partial S}, \quad (2.26)$$

$\dot{\epsilon}_{cr}$  on viruman aikaderivaatta

$\sigma_e$  on ekvivalentti jännitystila, esimerkiksi von Mises [MPa]

$A, m, n$  ovat materiaalista ja lämpötilasta riippuvia vakioita

$\sigma_{ref}$  on vertailujännitys, sovitettava yhteen vakion  $A$  kanssa

$Q_{cr}$  on viruman aktivaatioenergia

$R$  on ideaalikaasuvakio

$T$  on betonin lämpötila [K]

$T_{ref}$  on viruman vertailulämpötila [K]

$t_{shift}$  on ajan siirtymä, COMSOL-parametri ratkaisun helpottamiseksi

$t_{ref,cr}$  on viruman vertailuaika [h]

$t$  on aika [h]

$S$  on betonin mikroesijännitys, kuvaa keskimääräisiä normaalijännityksiä betonin sisäisen veden rajapinnoilla [MPa] (Bazant, et al., 2004)

# Faasikenttä (phase field)

$$\frac{\partial d(\Phi)}{\partial t} H_d = \Phi - l_{int}^2 * \nabla^2 \Phi,$$

$d(\Phi)$  on vaurioitumista kuvaava funktio

$\Phi$  on vaurioitumisen faasikenttä [0–1]

$l_{int}$  on sisäinen pituus, seurausta elementtiverkosta [m]

$H_d$  on halkeilua ajavasta  $D_d$  voimasta riippuva tilasuure

$$D_d = \frac{l_{int}}{G_c - G_{c0}} * (W_{s0}^+ - \frac{G_{c0}}{l_{int}}), \quad d(\Phi) = 1 - (1 - \Phi)^m$$

$G_c$  on kriittinen energian luovutusnopeus [J/m<sup>2</sup>]

$G_{c0}$  on venymäenergian raja-arvo, keksitty muuttuja laskentamallien säätelyyn [J/m<sup>2</sup>]

$W_{s0}^+$  on vaurioitumattoman betonin elastisen vetovenymän energiatiheys [J/m<sup>3</sup>]