

BetoCast – ohjelma

Työkalu betonin jäähtyksen ja lämmityksen arviointiin

Miten GWP-vaatimukset
muuttavat arvioinnin tarvetta.

Anna Kronlöf ja Klaus Kronlöf

Siltatekniikan päivät 2025



BetoCast
Uncracking concrete casts

Miksi BetoCast-ohjelma syntyi

BetoPlus

Lohja ja VTT
Anna Kronlöf jne



Betologi

Vesa Anttila:

”Voisitko sen aloittaa puhtaalta pöydältä?”

Anna Kronlöf ja Klaus Kronlöf



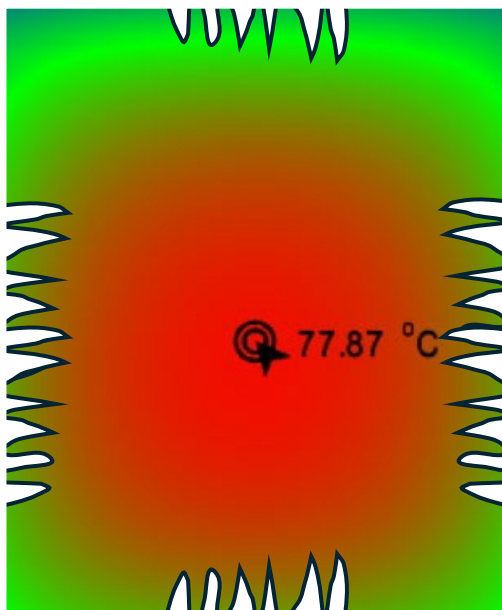
BetoCast

- Lisätty ominaisuuksia suunnittelijalle ja urakoitsijalle.
- Vihreän siirtymän helpottaminen

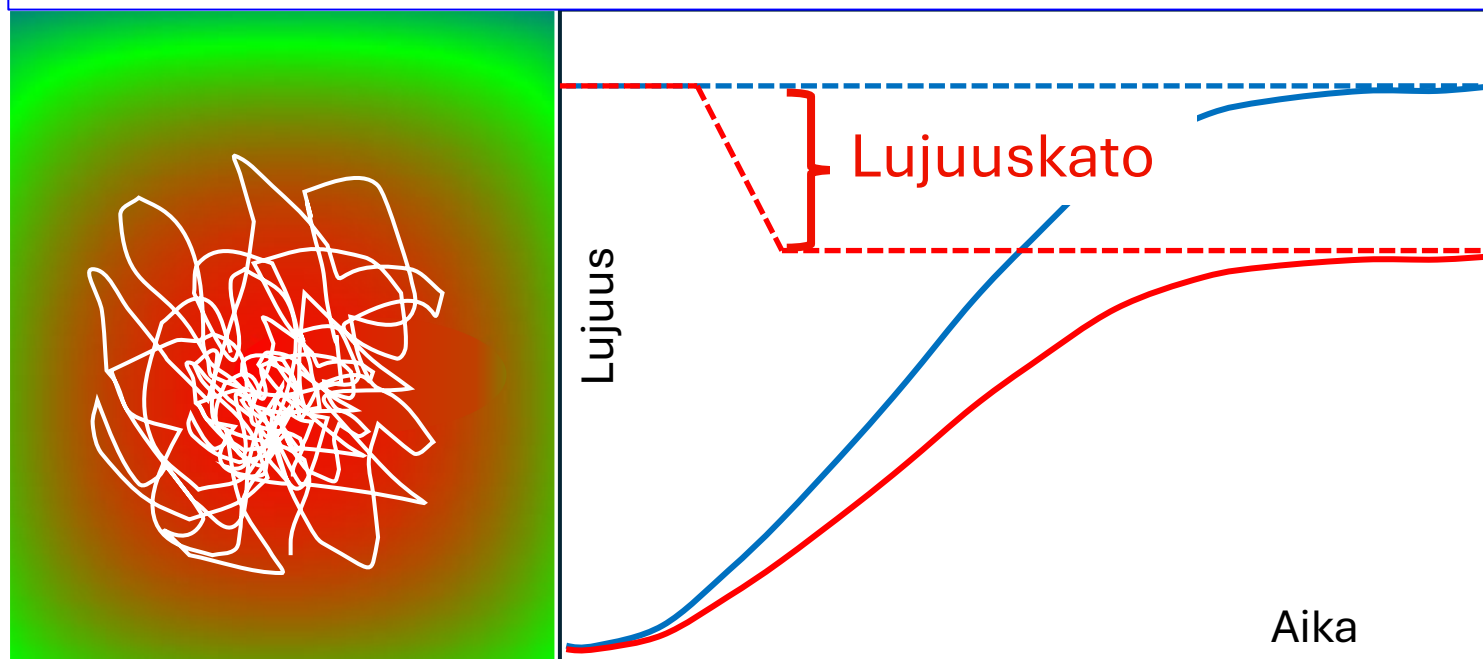
Anna Kronlöf, Klaus Kronlöf ja Timo Kronlöf

Miksi pitäisi jäähdyttää ?

Halkeilua tapahtuu, kun jännitykset ylittävät lujuuden, yleensä, kun lämpötilagradientti on suuri.



Lujuuskato on korkeassa lämpötilassa tapahtuva materiaalivaurio.




BetoCast laskee molemmat ilmiöt.

Jännitykset ja halkeiluriski sekä lujuuskato

Halkeiluriskiin vaikuttavat

- Lämpö- ja kuivumismuodonmuutokset → jännitykset
- Rakenteen muoto ja kiinnitetyt kohdat
- Jännityksen tyyppi (veto, puristus, leikkaus) ja sen suhde vastaavaan lujuuteen tarkastelupisteessä ja tarkasteluhetkellä
- Yms.

Lujuuskatoon vaikuttavat

- Massan koostumus 
- Muotti
- Eristeet
- Sää
- Yms.

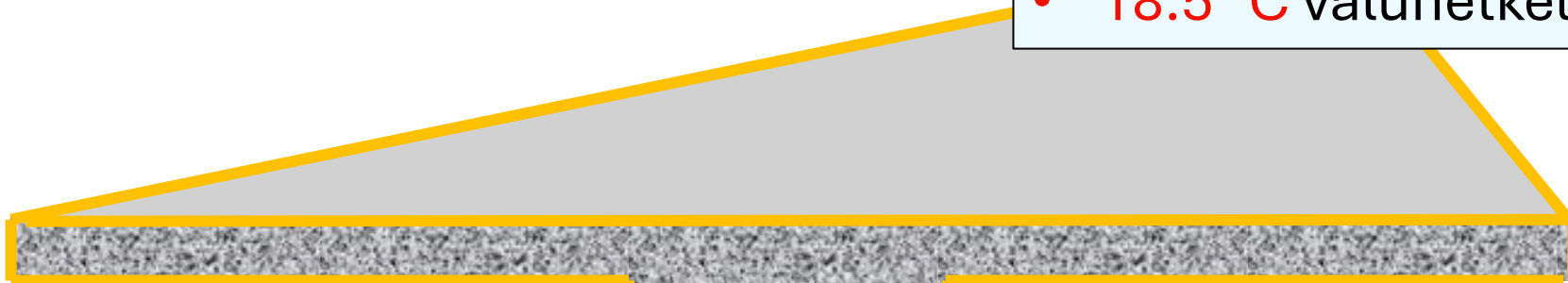
BetoCast ottaa tekijät huomioon.

Esimerkkivalu

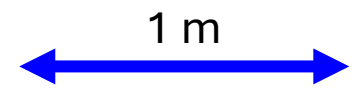
- Sää: Tuuli 0 m/s (telтта), $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Muotit: 25 mm lauta, puretaan 48 tunnin iässä.
- Raudoitus: 300 kg/m^3
- Muotti ja raudoitus $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Betoni 1 – (Ei GWP)

- Lujuus: C45/55
- P-lukutunnukset: Ro20, R4
- $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ valuhetkellä



Ei ole kiinnitetty mihinkään.
"Levitoi" muotin varassa.

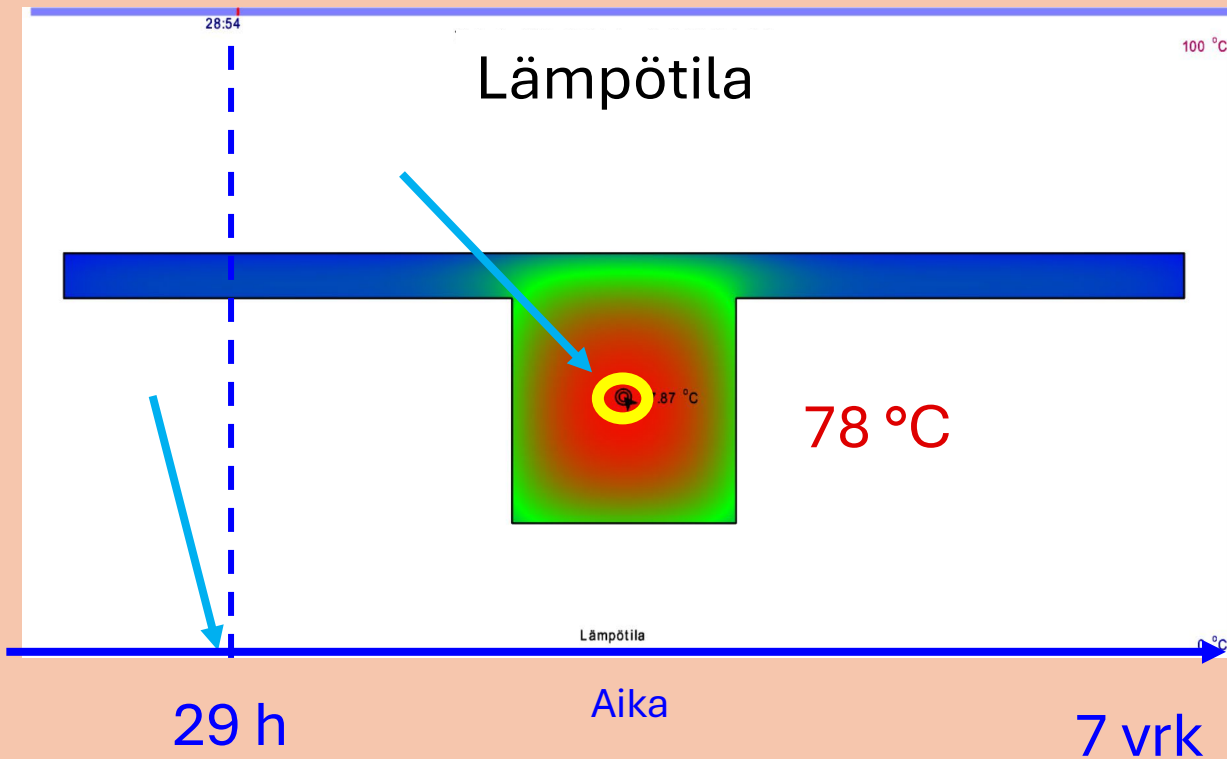


Anna Kronlöf ja Klaus Kronlöf

Lämpötila – Betoni 1 – (Ei GWP)

Lujuus: C45/55
P-lukutunnukset: Ro20, R4

Sää: Tuuli 0 m/s, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
Muotit: 25 mm lauta, purettu 48 tunnin iässä.
• Raudoitus: 300 kg/m^3

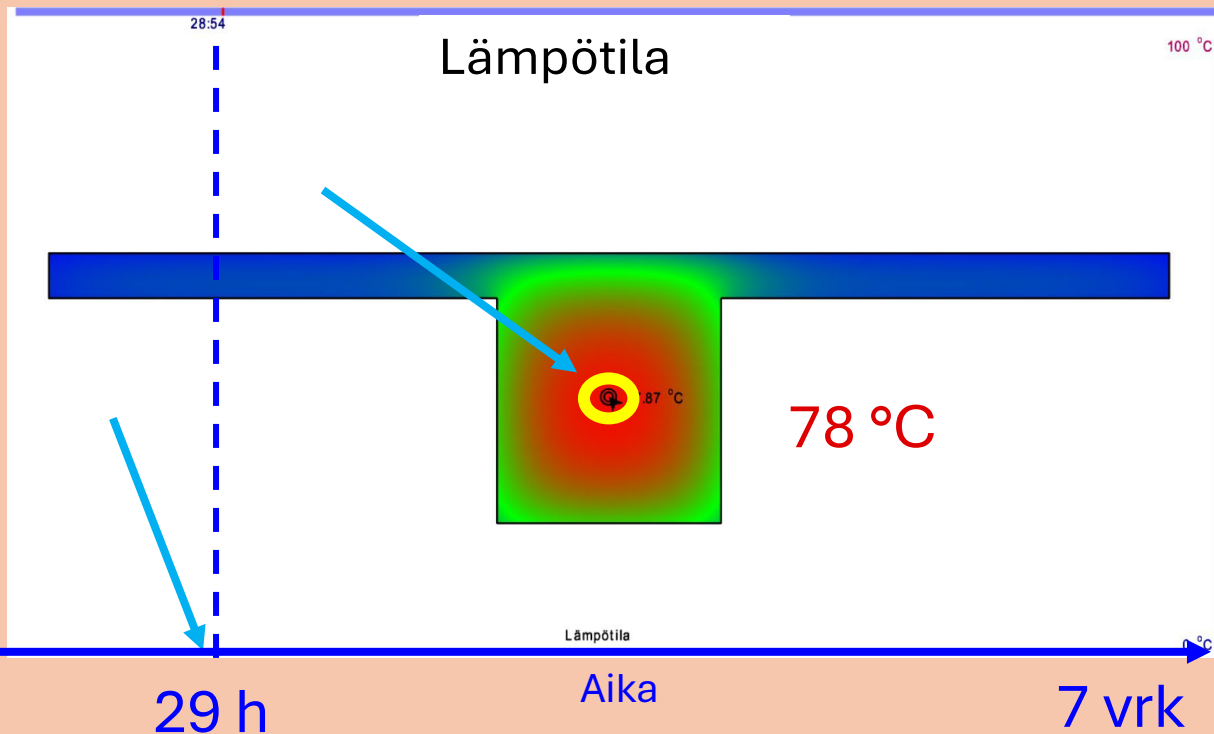


Kuumuin aika ja paikka

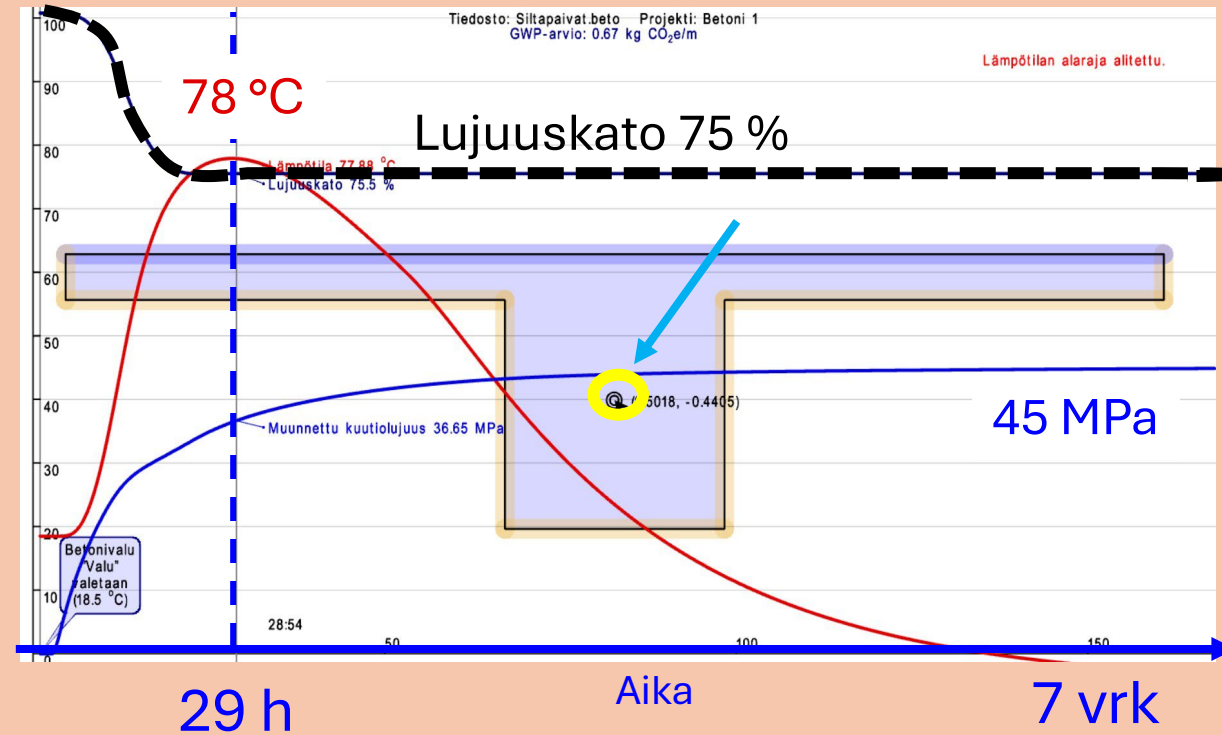
Betoni 1 – (Ei GWP) – kuuma paikka

Lujuus: C45/55
P-lukutunnukset: Ro20, R4

Sää: Tuuli 0 m/s, -5 °C.
Muotit: 25 mm lauta, purettu 48 tunnin iässä.
• Raudoitus: 300 kg/m³



Kuumuin aika ja paikka



Kuumimman paikan historia

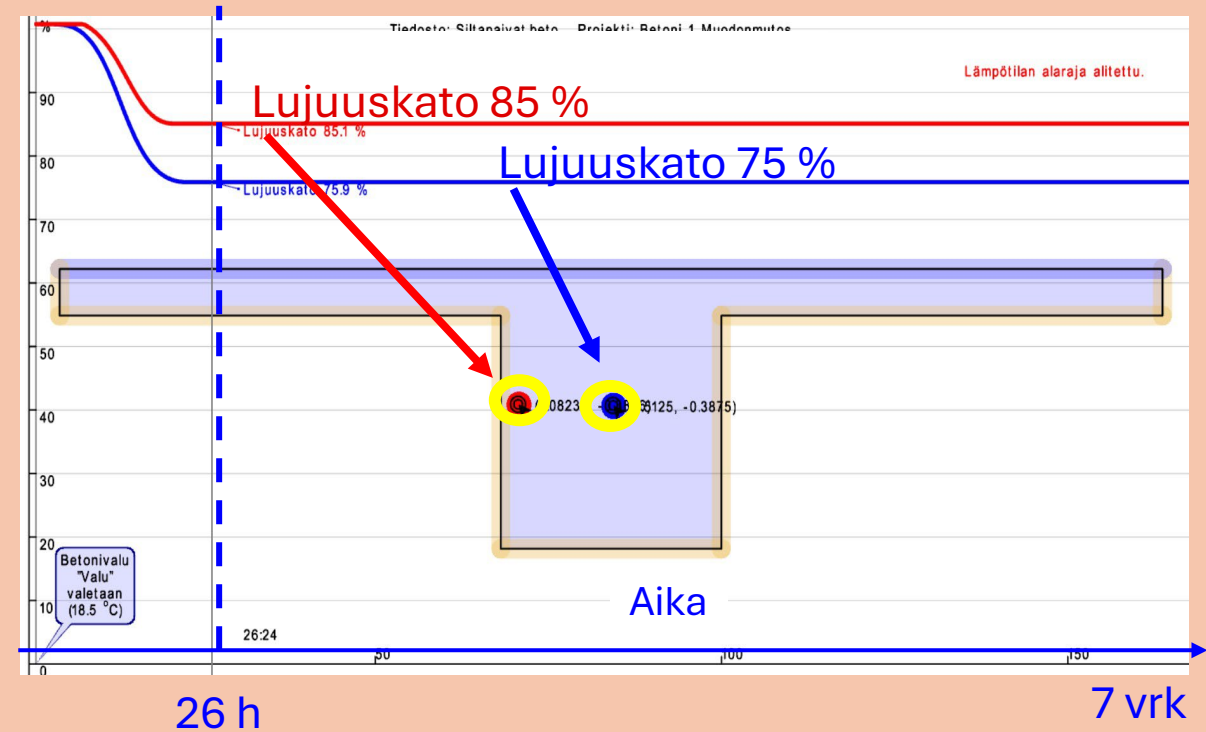
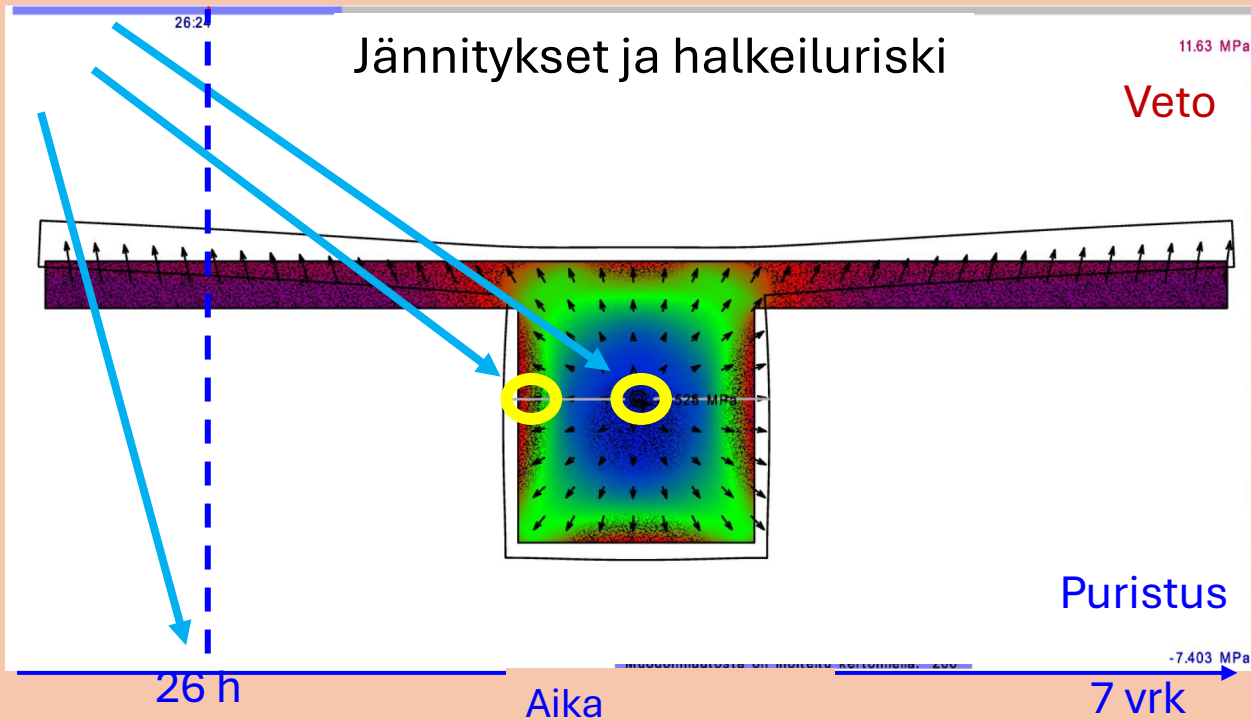
Betoni 1 - (Ei GWP) - jännitykset

Lujuus: C45/55
P-lukutunnukset: Ro20, R4

Sää: Tuuli 0 m/s, -5 °C.

Muotit: 25 mm lauta, purettu 48 tunnin iässä.

- Raudoitus: 300 kg/m³



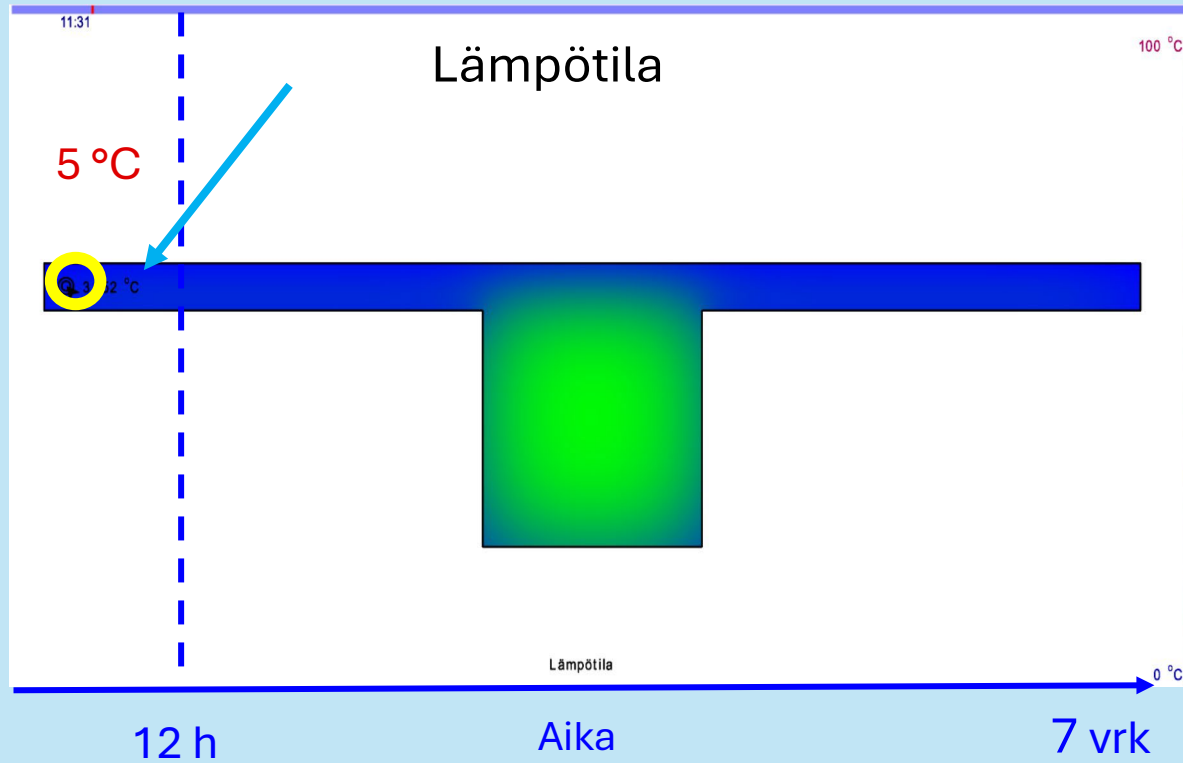
Kuumuin aika ja paikka

Kuumimman paikan historia

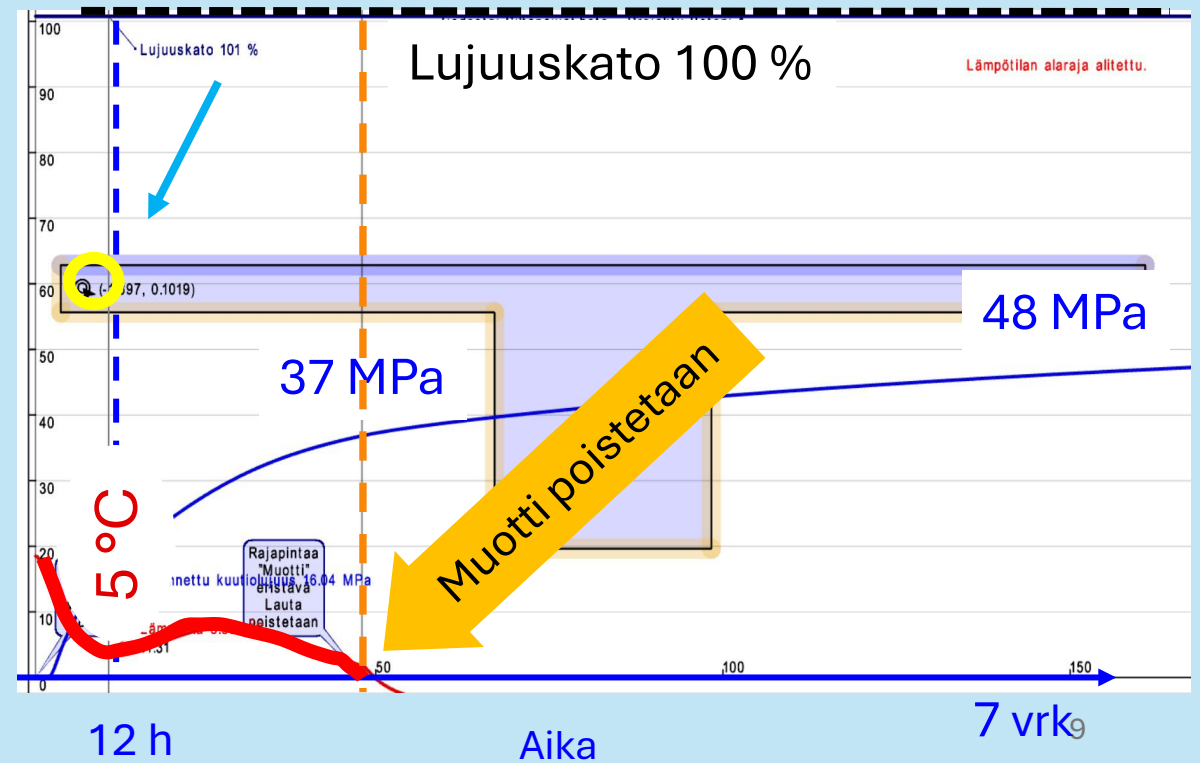
Betoni 1 – (Ei GWP) – kylmä paikka

Lujuus: C45/55
P-lukutunnukset: Ro20, R4

Sää: Tuuli 0 m/s, -5 °C .
Muotit: 25 mm lauta, purettu 48 tunnin iässä.
• Raudoitus: 300 kg/m^3



Kriittinen kylmä paikka ja aika



Kriittinen kylmä paikka ja sen historia

Jäähdytys

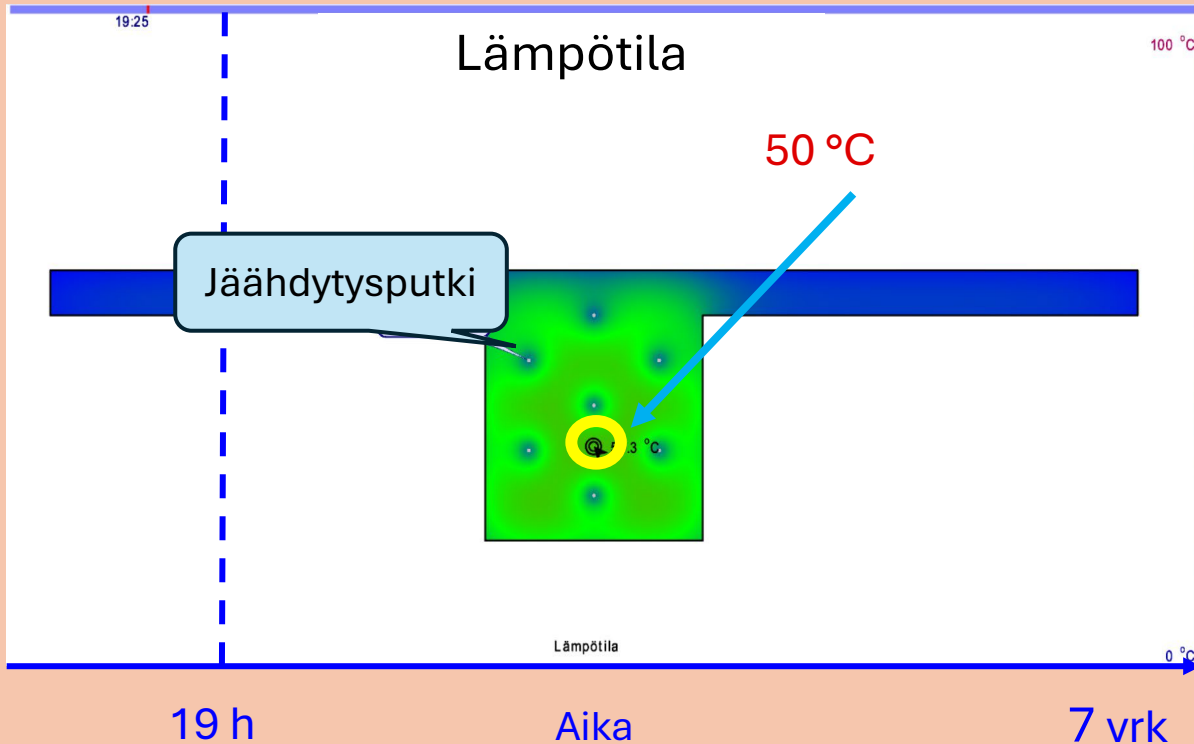
Jäähdytys suunnitellaan BetoCast-ohjelmassa:

- Valitaan putken materiaali, halkaisija ja seinämäpaksuus
- Ohjelmassa on oletuksena 32 mm polyeteeniputki.
- Valitaan veden lähtölämpötila
- Valitaan jäähdytyksen aloitus- ja lopetushetket
- Valitaan pisin yksittäisen putken pituus putkistossa.
- Sijoitellaan putket rakenteeseen.

Jäähdytys - Betoni 1 – (Ei GWP)

Lujuus: C45/55
P-lukutunnukset: Ro20, R4

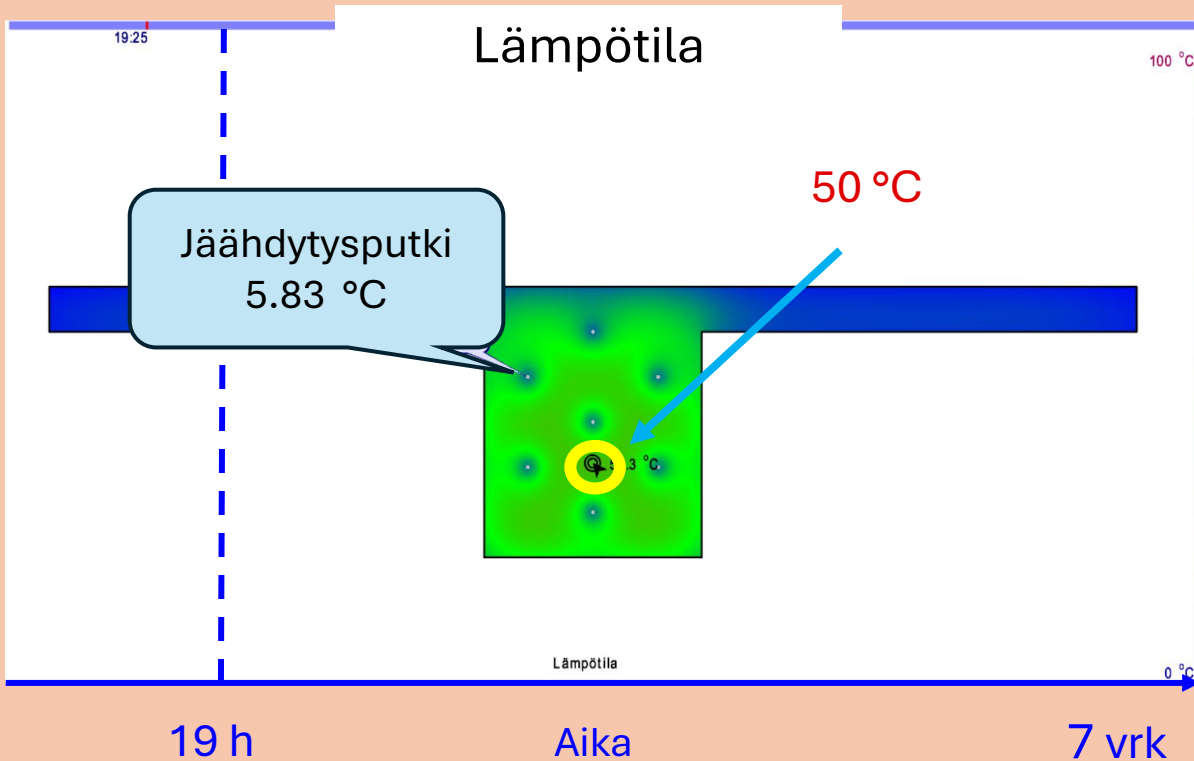
Sää: Tuuli 0 m/s, -5 °C.
Muotit: 25 mm lauta, purettu 48 tunnin iässä.
• Raudoitus: 300 kg/m³



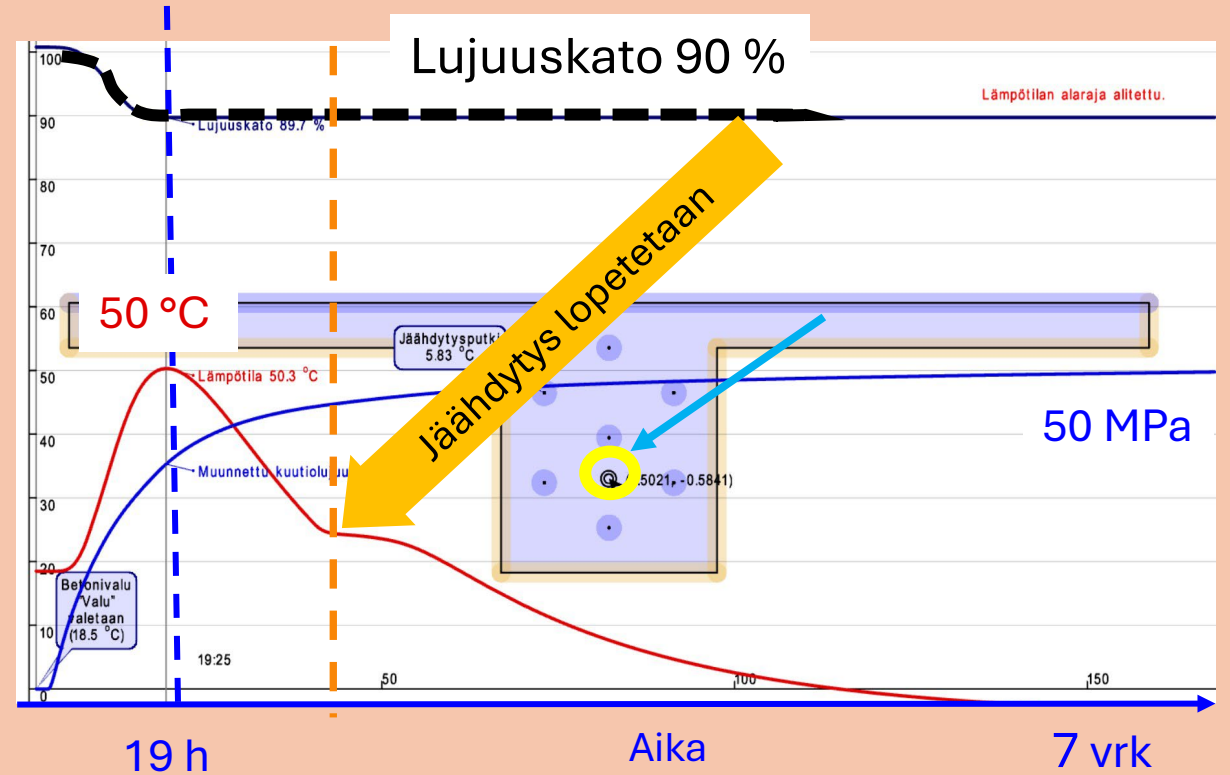
Kuumuin aika ja paikka

Jäähdytys on päällä välillä 8 - 40 tuntia, veden on lähtölämpötila 5 °C

Jäähdytys - Betoni 1 – (Ei GWP)



Kuumuin aika ja paikka



Kuumimman paikan historia

Jäähdytys on päällä välillä 8 - 40 tuntia, veden on lähtölämpötila 5 °C

Mitä BetoCast laskee? Kuka sitä käyttää? Miten päästään alkuun?

- Suunnittelija ?
- Urakoitsija ?
- Betonin valmistaja ?
- Milloin?
- **Tarvitaan betoniresepti- Mistä se saadaan ?**

Suunnittelija

Ei saa tulla lujuuskatoa ei halkeamia.
Korkeita lämpötiloja tulee välttää

Lujuus	P-lukutunnukset
C45/55	Ro20, R4

Dimensiot ja raudoitus	Muotti
Raudoitus 300 kg/m ³	2,5 cm lauta. Puretaan 48 tunnin iässä.

Anna Kronlöf ja Klaus Kronlöf

Suunnittelija

Ei saa tulla lujuuskatoa ei halkeamia.
Korkeita lämpötiloja tulee välttää

Lujuus	P-lukutunnukset
C45/55	Ro20, R4

Dimensiot ja raudoitus	Muotti
Raudoitus 300 kg/m ³	25 mm lauta. Puretaan 48 tunnin iässä.

Urakoitsija

Lämpötila	Tuuli	Säteily yms.
-5 °C	0 m/s

Mitään ei voida arvioida, jos ei tunneta betonireseptiä.

BetoCast laskee alustava reseptin vaatimusten perusteella.

Lujuus	P-lukutunnukset
C45/55	Ro20, R4

Tulokset	Alustava betoni 1	Alustava betoni 2 GWP
GWP (alustava)	108 %	68 %
P-luku (alustava)	62	42
Sementti (alustava)	412 kg/ m ³	227 kg/ m ³
Kuona (alustava)	0 kg/ m ³	207 kg/ m ³
Vesi (alustava)	157 kg/ m ³	157 kg/ m ³
Ilma (alustava)	5 %	5 %
Kuutiolujuus 28 ja 91 vrk (C45/55)	64 ja 68 MPa	64 ja 75 MPa

Vedentarve
voidaan säätää.



- Alustavat reseptit ovat ”kansallisia keskiarvoja”, eivät tarkkoja koostumuksia.
- Betonin valistaja ilmoittaa lopullisen reseptin ja GWP:n.
- Alustavaa reseptiä säädetään yhteistyössä betonin valmistajan kanssa.
- BetoCast laskentaa tarkennetaan, kun resepti on tiedossa.

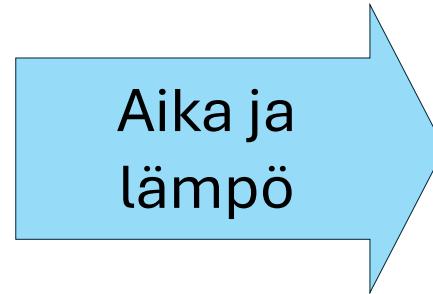
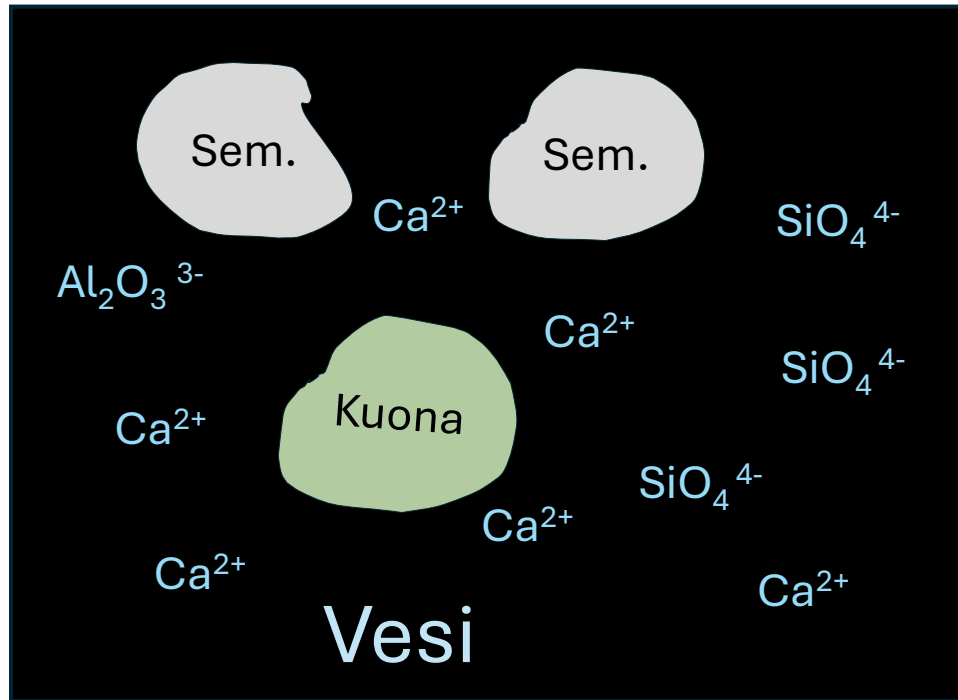
Miten BetoCast-ohjelma toimii sitten,
kun alustava tai lopullinen resepti on tiedossa.

Kemiaa, fysiikkaa, matematiikkaa ja kirjallisuutta

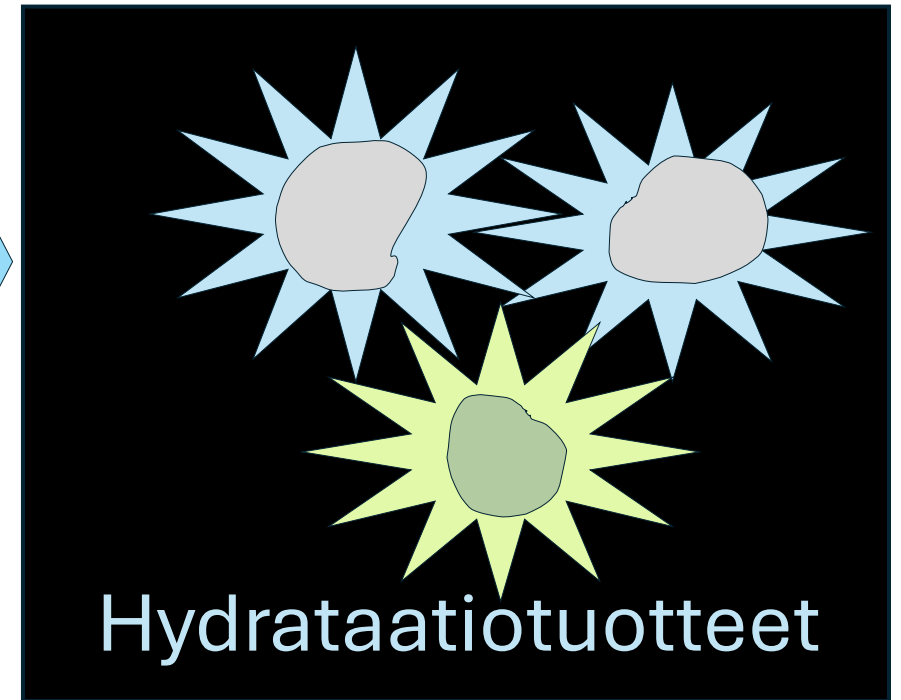
Lämmön- ja lujuudenkehitys

Kemiaa

Liukenemislämpö → Lämmönkehitys



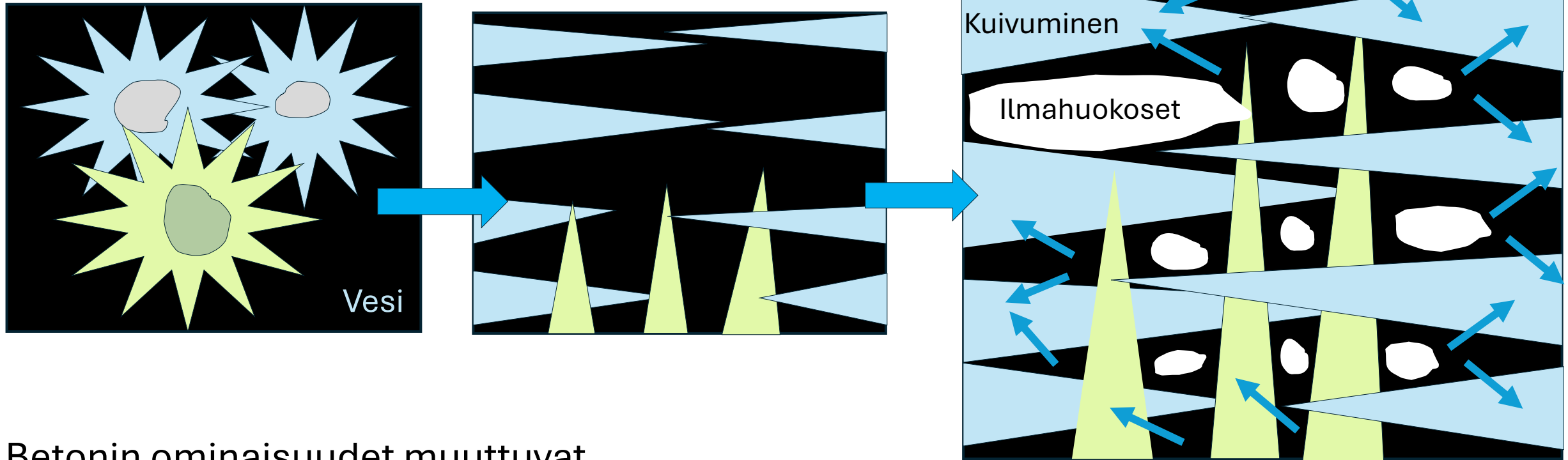
Kiteytyminen → Lujuus



BetoCast laskee lämmön ja lujuuden sovitettujen yhtälöiden ja parametrien avulla.

Huokosrakenne määrää ominaisuudet

Fysiikkaa



Betonin ominaisuudet muuttuvat

- betonin reseptin, ympäristön, ajan ja paikan funktiona.

Ominaisuuksien laskenta perustuu

- tunnettuun fysiikkaan sekä kirjallisuuteen.

Lämmöntuoton hetkellisen tehon yhtälö (13)

Matematiikkaa

$$f(t) = \left(\frac{A_e}{m_W} + B_e \right) m(t) C_e \left(E_e \frac{m_W}{m_C} + F_e \right) \left(m(t) - D_e + t_A - t_R - (k_{Super} P_{Super} - 1) \right)^{-\left(E_e \frac{m_W}{m_C} + F_e \right) - 1} e^{-C_e \left(m(t) - D_e + t_A - t_R - (k_{Super} P_{Super} - 1) \right)^{-\left(E_e \frac{m_W}{m_C} + F_e \right)}} \frac{d m(t)}{dt} \quad (13)$$

BetoCast ohjelman laskenta perustuu yli 200 yhtälöön.

- Lujuuden ja lämmönkehitys 61 kpl.
- Jännitykset ja muodonmuutos 79 kpl.
- Plastisen vaiheen käyttäytyminen 78 kpl. (Ei esitetä tässä yhteydessä.)

Kirjallisuutta

Otteita kirjallisuusluettelosta

- [3] Shengwen Tang, Desheng Huang, Zhen He, "A review of autogenous shrinkage models of concrete", *Journal of Building Engineering* 44 (2021) 103412.
- [4] Yunping Xi, Zdeněk P. Bažant, and Hamlin M. Jennings, "Moisture Diffusion in Cementitious Materials, Adsorption Isotherms", *Advanced cement based materials* 1994, 1, pp. 248-257.
- [5] Pietro Lura, *Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete*, Delft University Press ISBN: ISBN 90-407-2404-0, April 2003, Available online at https://www.researchgate.net/publication/27347573_Autogenous_Deformation_and_Internal_Curing_of_Concrete
- VTT Publications 322 (1997).
- [15] Aldarabseh, Safa M., "Evaporation Rate from Free Water Surface", Phd. dissertation, Western Michigan University Dissertations 3628 (2020)", Available online at <https://scholarworks.wmich.edu/dissertations/3628>
- [16] Göran Fagerlund, "On the capillarity of concrete"., Available online at <https://www.danskbetonforening.dk/media/ncr/publication-no-01-06.pdf>

Mitä, jos tulos epäilyttää ?

- Tarkasta laskemalla tuttuja rakenteita tai koekappaleita.
- Tarkasta välitulokset eli fysikaaliset suureet.
Saat ne näkyviin samoin kuin kaikki muutkin laskentatulokset.

Yhteensä yli 80 suuretta

- Lujuuden ja lämmönkehitys yli 20 kpl.
- Jännitykset ja muodonmuutos yli 40 kpl.
- Plastisen vaiheen käyttäytyminen yli 15 kpl. (Ei esitetä tässä yhteydessä)

- Ota yhteyttä.

Välitulokset eli fysikaaliset suureet

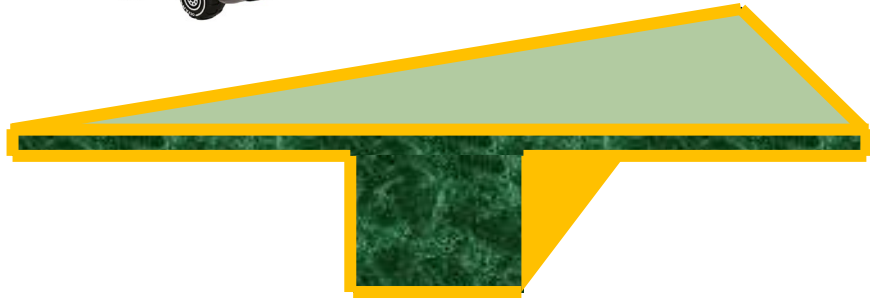
”Un-boxing of the black box”

Lämpötila	<input checked="" type="checkbox"/>	Betonin kimmokerroin (laskettu keskiluudesta)	<input type="checkbox"/>
Lämpötilagradientti	<input type="checkbox"/>	Betonin kimmokerroin 2D-laskentaan (Huomioi laatan paksuuden)	<input type="checkbox"/>
Ominaislämpökapasiteetti	<input type="checkbox"/>	Betonin suurin päävenymä (Puristuma negatiivisena)	<input checked="" type="checkbox"/>
Lämmönjohtavuus	<input type="checkbox"/>	Betonin pienin päävenymä (Puristuma negatiivisena)	<input checked="" type="checkbox"/>
Aktivaatioenergia Arrheniuksen yhtälöön	<input type="checkbox"/>	Betonin suurin leikkausvenymä	
Kosteudesta riippuva kypsyysskerroin		Betonin kokonaisvenymä X-suuntaan	
Lämpötilasta riippuva kypsyysskerroin		Betonin kokonaisvenymä Y-suuntaan	
Lämpötilasta riippuva kumulatiivinen kypsyysskerroin		Betonin kokonaisvenymä Z-suuntaan	
Lämpötilasta riippuva kypsyysskerroin		Betonin kimmainen venymä X-suuntaan	
Kokonaiskypsyysskerroin		Betonin kimmainen venymä Y-suuntaan	
Kumulatiivinen kypsyysskerroin		Betonin kimmainen venymä Z-suuntaan	
Kypsyysskerroin		Betonin plastinen venymä X-suuntaan	
Lämpöenergia (Kumulatiivinen)		Betonin plastinen venymä Y-suuntaan	
Lämpöteho (Hetkellinen lämpöteho)		Betonin plastinen venymä Z-suuntaan	
Muunnettu kuutiolujuus		Betonin rajoittamaton venymä lämpömuutoksesta	
Sylinterilujuus EN 206-standardin mukaan		Betonin muodonmuutos (Siirtymävektori)	
Linearisoitu sylinterilujuus		Betonin siirtymä X-suuntaan	
Keskilujuus		Betonin siirtymä Y-suuntaan	
Muunnettu kuutiolujuus ilman lujuuskatoa		Betonin suurin pääjännitys (Puristusjännitys)	
Sylinterilujuus ilman lujuuskatoa		Betonin pienin pääjännitys (Puristusjännitys)	
Linearisoitu sylinterilujuus ilman lujuuskatoa		Betonin suurin leikkausjännitys	
Keskilujuus ilman lujuuskatoa		Betonin vetohalkeiluriski venymästä ja -jännityksestä	<input checked="" type="checkbox"/>
Lujuuskato		Betonin leikkaushalkeiluriski leikkausvenymästä ja -jännityksestä	<input checked="" type="checkbox"/>
		Pastan autogeenisen kutistuman aiheuttama halkeiluriski	<input checked="" type="checkbox"/>
		Vapaan ja sitoutuneen veden yhteenlaskettu määrä betonissa	<input type="checkbox"/>
		Vedenläpäisevyys	<input type="checkbox"/>
		Kimmokerroinkomponentti kiinteytymisestä	<input type="checkbox"/>
		Kimmokerroinkomponentti aluminaattihydrataatiosta	<input type="checkbox"/>
		Kimmokerroinkomponentti kuivumisesta	<input type="checkbox"/>
		Kimmokerroinkomponentti silikaattihydrataatiosta	<input type="checkbox"/>
		Veden erottuminen	<input checked="" type="checkbox"/>
		Haihtuminen	<input checked="" type="checkbox"/>
		Haihtuminen ilman jälkihoitoainetta	<input checked="" type="checkbox"/>
		Vedenpinnan korkeus (Negatiivinen arvo tarkoittaa kuivumista)	<input checked="" type="checkbox"/>
		Vedenpinnan korkeus ilman jälkihoitoa	<input type="checkbox"/>
		Vedenpinnan korkeus ilman sisäänpäin kuivumisen vaikutusta	<input type="checkbox"/>
		Halkeilua aiheuttava negatiivinen kapillaarialipaine	<input checked="" type="checkbox"/>
		Halkeilulta suojaava alhaisin vetolujuus	<input checked="" type="checkbox"/>
		Paikallinen vetolujuus	<input type="checkbox"/>
		Keskimääräinen halkeamaleveys	<input checked="" type="checkbox"/>
		Keskimääräinen halkeamatiheys	<input checked="" type="checkbox"/>

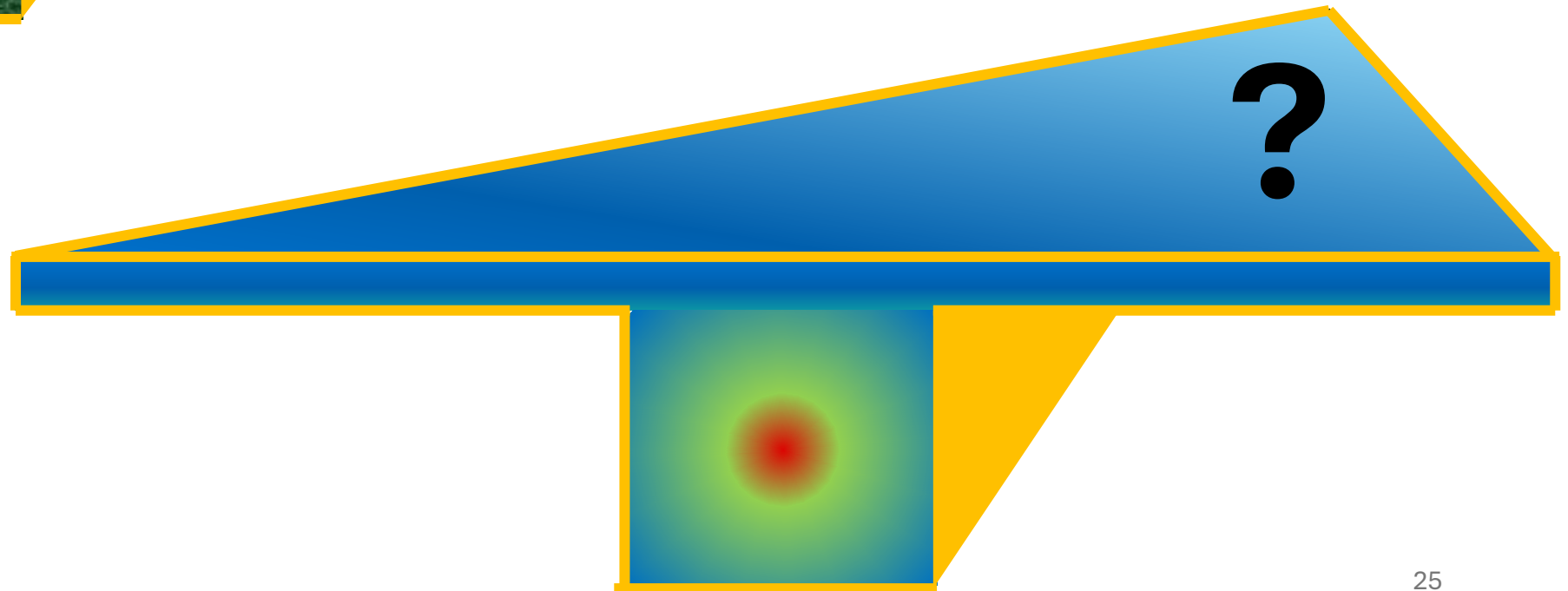
Miten BetoCast kestää aikaa?

- Toteutettu yleisimmin käytetyillä ohjelmointikielillä.
- API-riippuvuudet on minimoitu.
- Käyttöliittymä toimii myös kosketusnäytöissä ja ilman näppäimistöä.
- Helposti siirrettävissä käyttöjärjestelmästä toiseen.
- Toimii nykyisellään Windows ja Android koneissa.

Vihreä siirtymä ja BetoCast



GWP-betonit käyttäytyvät toisin.
Mitä työmaalla tapahtuu?



Vihreä siirtymä ja BetoCast

Uudet riski

- Vihreät betonit ovat hitaita.
- Jäätymisriski
- Työmaan aikataulut muuttuvat.

Alustava betoni 2, **GWP**

Lujuus	P-lukutunnukset
C45/55	Ro20, R4

Tulokset	Alustava betoni 2 GWP
GWP (alustava)	68 %
P-luku (alustava)	P42
Sementti (alustava)	227 kg/ m ³
Kuona (alustava)	207 kg/ m³
Vesi (alustava)	157 kg/ m ³
Ilma	5 %

Vedentarve
voidaan säätää.



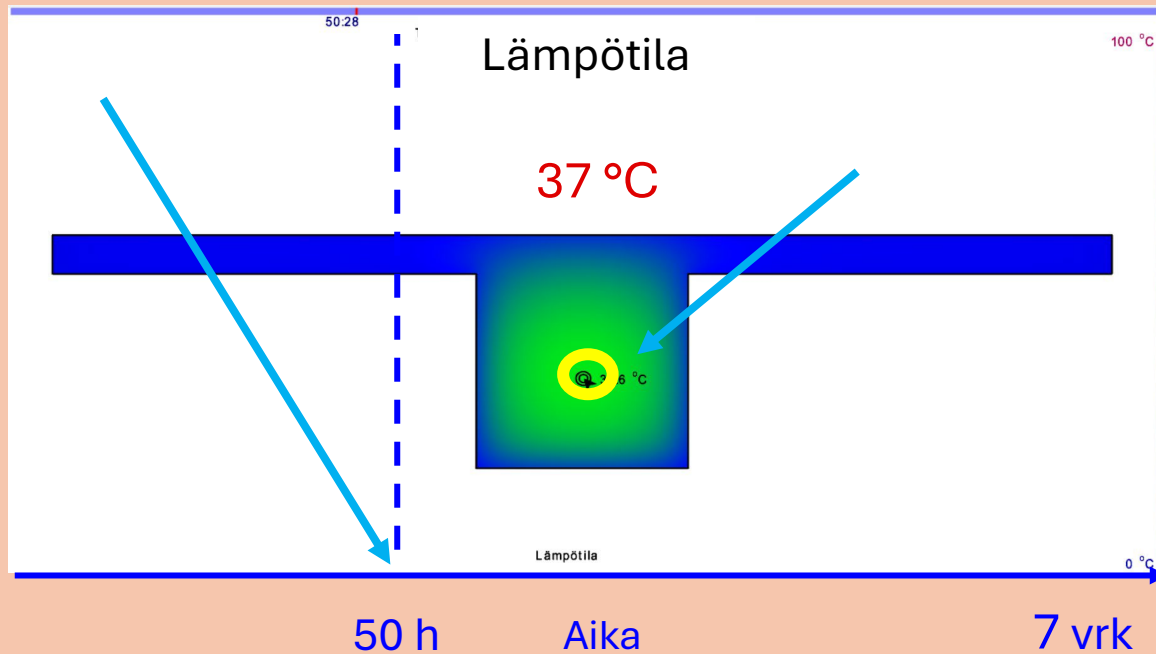
- Alustavat reseptit ovat ”kansallisia keskiarvoja”.
- Betonin valmistaja ilmoittaa lopullisen reseptin ja GWP:n.
- Alustavaa reseptiä säädetään yhteistyössä betonin valmistajan kanssa.
- BetoCast laskentaa tarkennetaan, kun resepti on tiedossa.

Alustava betoni 2, GWP

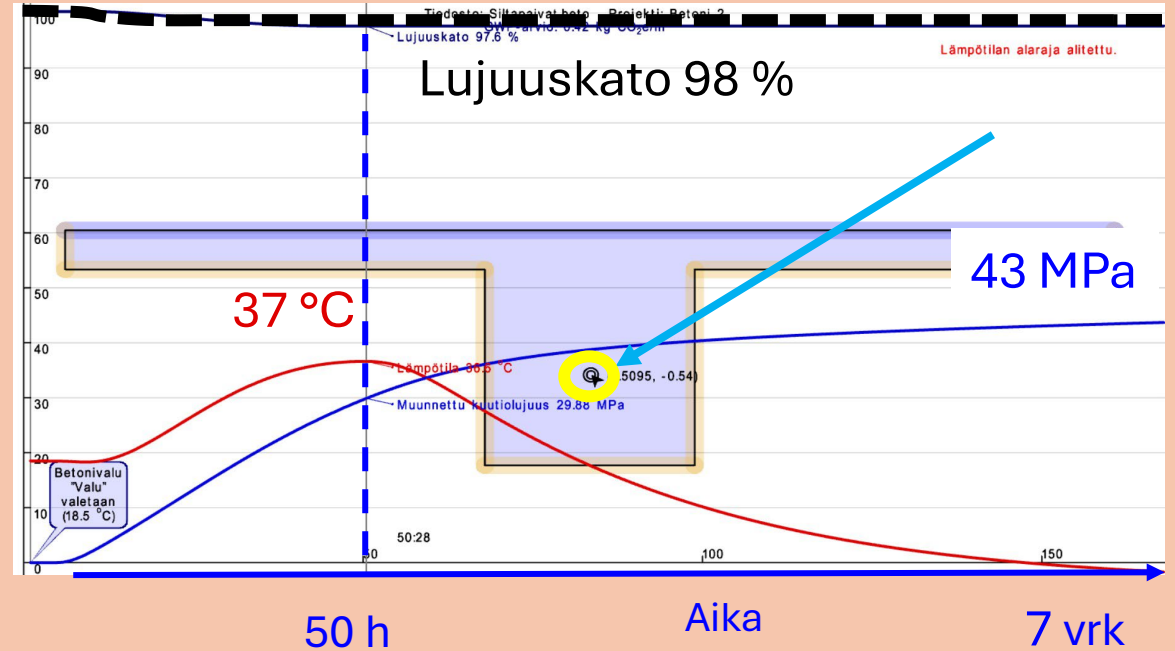
Korkeat lämpötilat saadaan haltuun, **mutta ...**

Lujuus: C45/55
P-lukutunnukset: Ro20, R4

Sää: Tuuli 0 m/s, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
Muotit: 25 mm lauta, purettu 48 tunnin iässä.
• Raudoitus: 300 kg/m^3



Kuumuin aika ja paikka



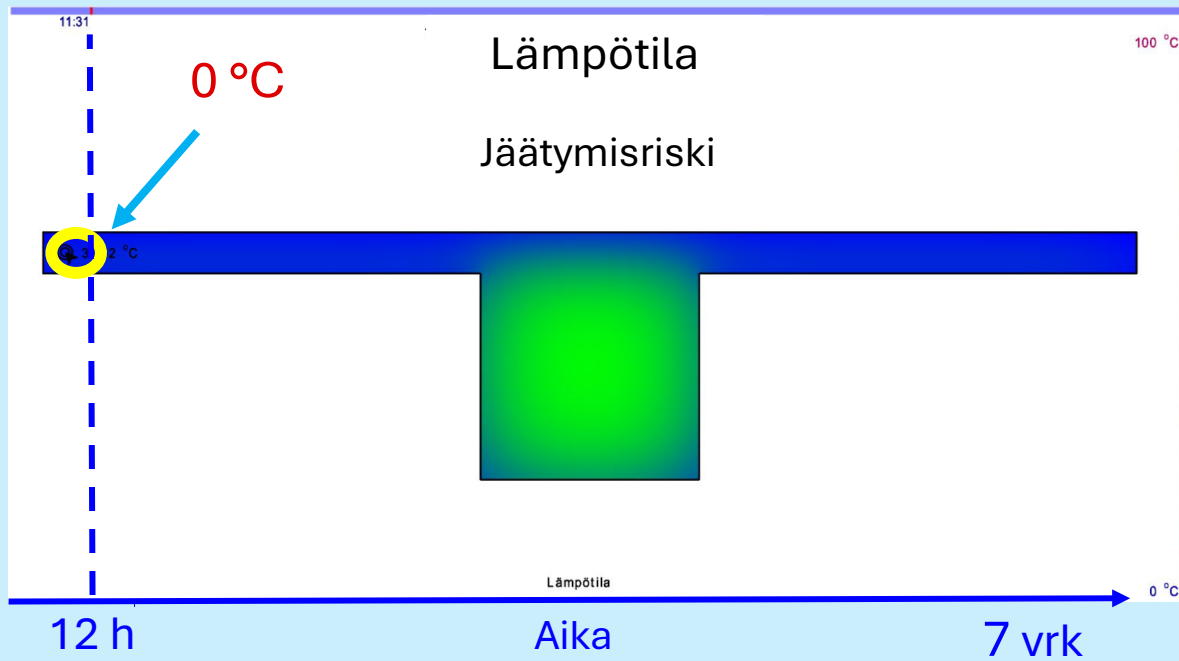
Kuumimman paikan historia

Alustava betoni 2, GWP

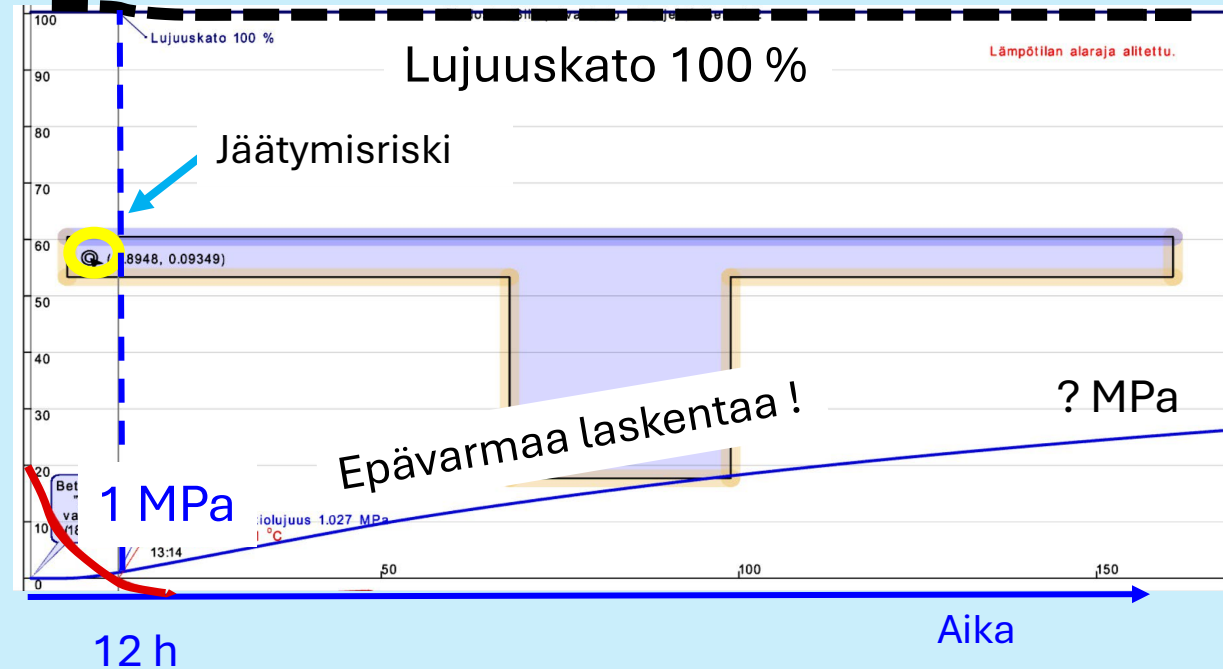
Korkeat lämpötilat saadaan haltuun, mutta reunoilla on jäätymisriski.

Lujuus: C45/55
P-lukutunnukset: Ro20, R4

Sää: Tuuli 0 m/s, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
Muotit: 25 mm lauta, purettu 48 tunnin iässä.
• Raudoitus: 300 kg/m^3



Kriittinen kylmä paikka ja aika



Kriittinen kylmä paikka ja sen historia

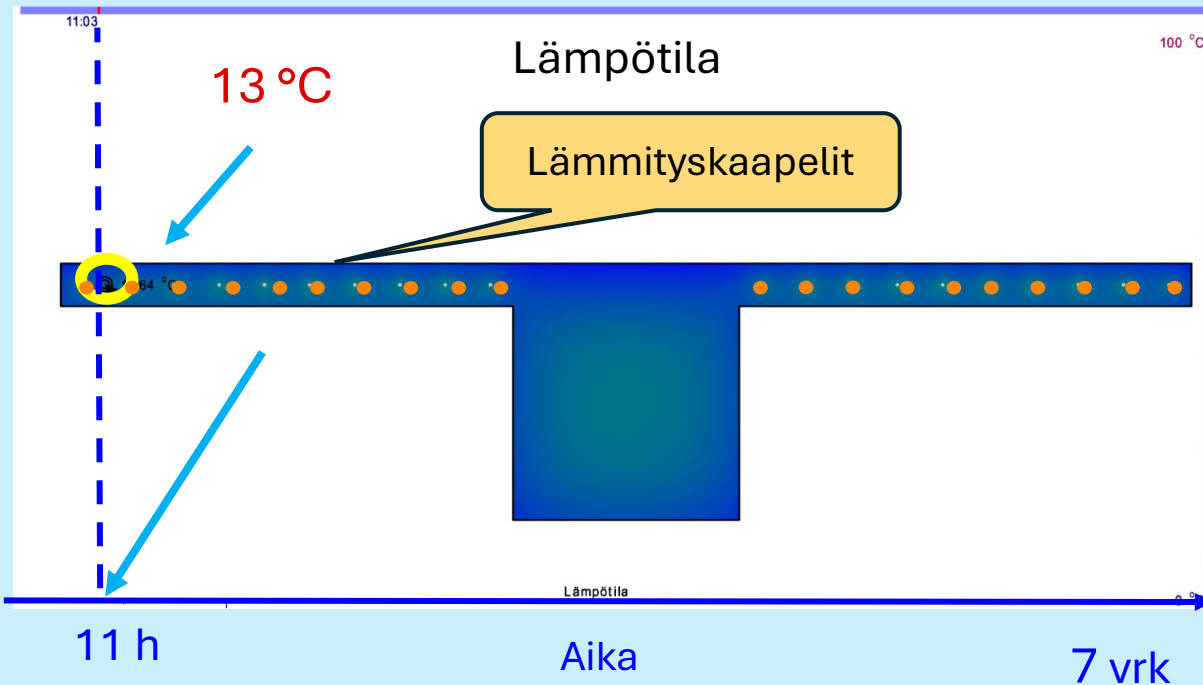
Lämmitys

- BetoCast-ohjelmassa lämmitys suunnitellaan valitsemalla
 - lämmitysvastusten teho, W/m
 - alkamis- ja päättymishetket sekä
 - vastusten sijoittelu geometriaan.

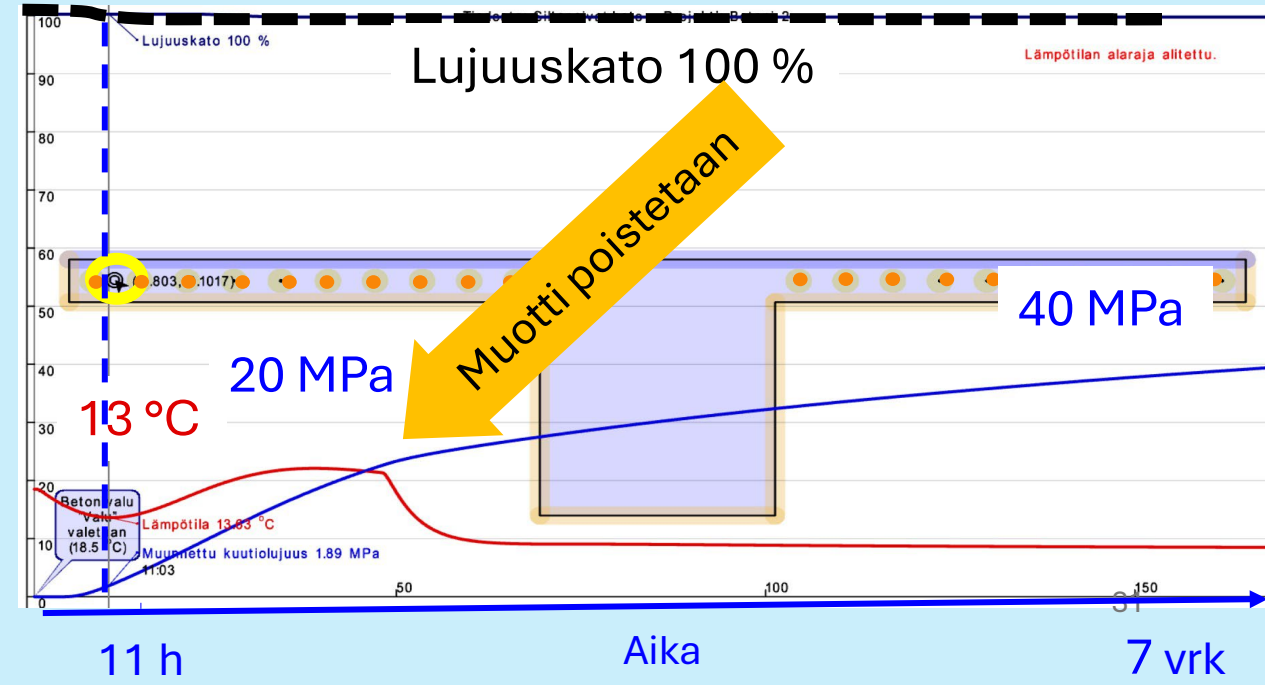
Hidas betoni 2,GWP) tarvitsee lämmityksen.

Lujuus: C45/55
P-lukutunnukset: Ro20, R4

Sää: Tuuli 0 m/s, **-5 °C**.
Muotit: 25 mm lauta, purettu 48 tunnin iässä.
• Rauditus: 300 kg/m³



Kriittinen kylmä paikka ja aika

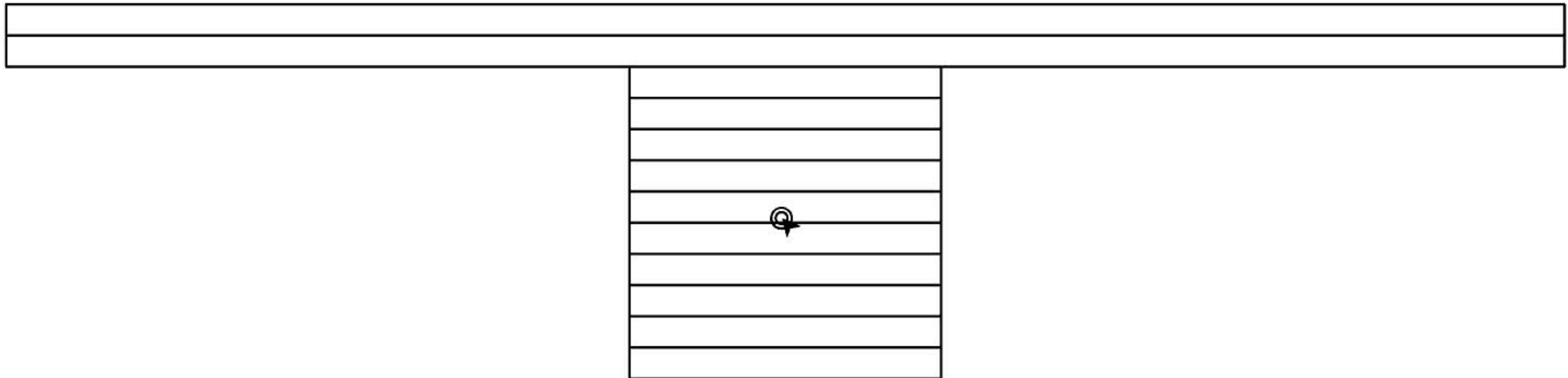


Kriittinen kylmä paikka ja sen historia

Lämmitys on päällä 7 vrk.

Kiitos !

ja vielä kerrosvalu...



Lämpötila