

# Herdeteknologi

Åpent faglig møte i Grimstad 2018-04-19

Sjefsrådgiver, Prof II Sverre Smeplass

Skanska Teknikk, Betongteknologiavdelingen

## Skanska Teknikk



### Betongteknologi

Betong og materialteknisk støtte og rådgivning i alle faser av byggeprosessen, og innen betong-rehabilitering



### BIM

Utvikling og bruk av BIM i alle faser av byggeprosessen. Leverer målbare bidrag til økt samhandling i byggeprosessen ved bruk av BIM som katalysator



### Klima, energi og bygningsfysikk

Tverrfaglig kompetanse-miljø innen utvikling av bærekraftige grønne løsninger, klima-, energi- og miljørådgivning, livsløpsvurderinger, byggeteknikk og bygningsfysikk, lufttetthetsmåling og termografering



### Konstruksjon

Konstruksjonsteknisk-, geoteknisk- og forskalingsteknisk rådgivning

## Skanska Teknikk Betongteknologiavdelingen



Nina Borvik  
Avdelingssjef



Ingrid Hegseth



Sverre Smeplass



Bjarne Fossum



Arne Vatnar

## Bakgrunn - herdeteknologi

- Hydratisering av sement utvikler varme (eksoterm reaksjon)
  - 1 m<sup>3</sup> betong (B35 M45) utvikler ca. 35 kWh
- Den kjemiske reaksjonen er temperaturfølsom
  - 10°C temperaturfall halverer reaksjonshastigheten
- Varmeutviklingen gir temperaturforskjeller som kan forårsake oppsprekking



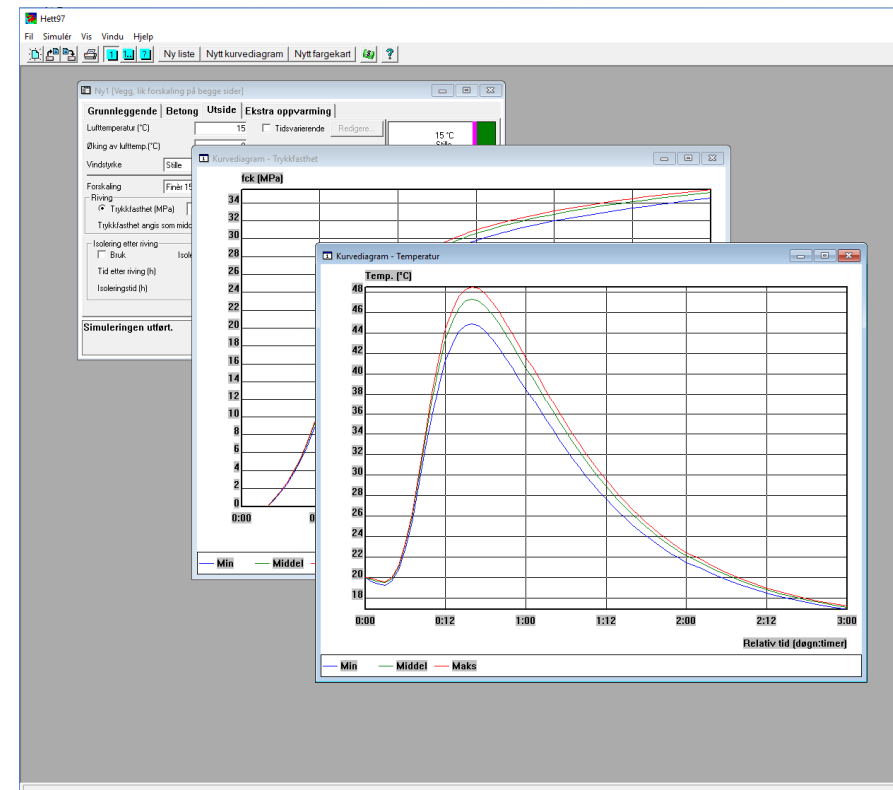


# Herdeteknologi

Herdeteknologi er en modell som beskriver effekten av temperatur på betongens herding og egenskapsutvikling. Modellen er basert på:

- Betongens kalibrerte hastighetsfunksjon,  $H(\theta)$ , og modenhetsprinsippet,  $\sum H(\theta) \cdot \Delta t$
- Målt varme- og fasthetsutvikling ved referansetemperaturen  $20^{\circ}\text{C}$

Kombinert med enkle varmestrømsberegninger kan denne modellen være et nyttig produksjonsstyringsverktøy.



## «Adiabatisk» temperaturstigning i betong

$$\Delta T = \frac{Q \cdot C}{\rho_r \cdot c_b}$$

$\Delta T$  - temperaturstigning, °C

$Q$  - varmemengde pr sementenhet, kJ/kg

$C$  - sementmengde, kg/m<sup>3</sup>

$\rho_r$  - betongens densitet, kg/m<sup>3</sup>

$c_b$  - spesifikk varmekapasitet, kJ/kg·°C

Talleksempel:

$Q = 330 \text{ kJ/kg}$

$C = 360 \text{ kg/m}^3$

$\rho_r = 2350 \text{ kg/m}^3$

$c_b = ? \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

$\Delta T = ? ^\circ\text{C}$

## Betongens spesifikke varmekapasitet

| Delmateriale | Mengde<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Spesifikk<br>varmekapasitet<br>(kJ/kg°C) | Absolutt<br>varmekapasitet<br>(kJ/m <sup>3</sup> °C) |
|--------------|--------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Cement       | 350                            | 0,80                                     | 280                                                  |
| Water        | 175                            | 4,20                                     | 735                                                  |
| Aggregates   | 1825                           | 0,80                                     | 1460                                                 |
| Samlet       | 2350                           | 1,05                                     | 2475                                                 |

## «Adiabatisk» temperaturstigning i betong

$$\Delta T = \frac{Q \cdot C}{\rho_r \cdot c_b}$$

$\Delta T$  - temperaturstigning, °C

$Q$  - varmemengde pr sementenhet, kJ/kg

$C$  - sementmengde, kg/m<sup>3</sup>

$\rho_r$  - betongens densitet, kg/m<sup>3</sup>

$c_b$  - spesifikk varmekapasitet, kJ/kg·°C

Talleksempel:

$Q = 330 \text{ kJ/kg}$

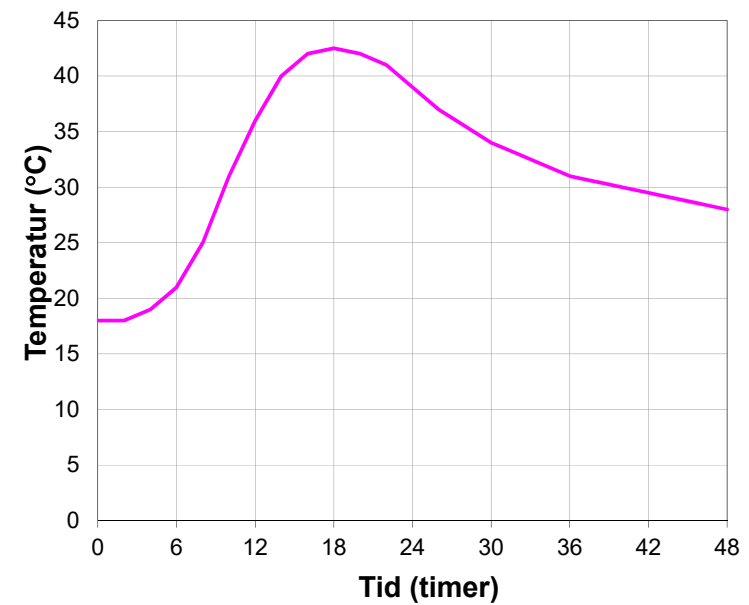
$C = 360 \text{ kg/m}^3$

$\rho_r = 2350 \text{ kg/m}^3$

$c_b = 1,05 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

$\Delta T = 48^\circ\text{C}$

## Temperaturmåling med termoelement og datalogger



## Hastighetsfunksjonen

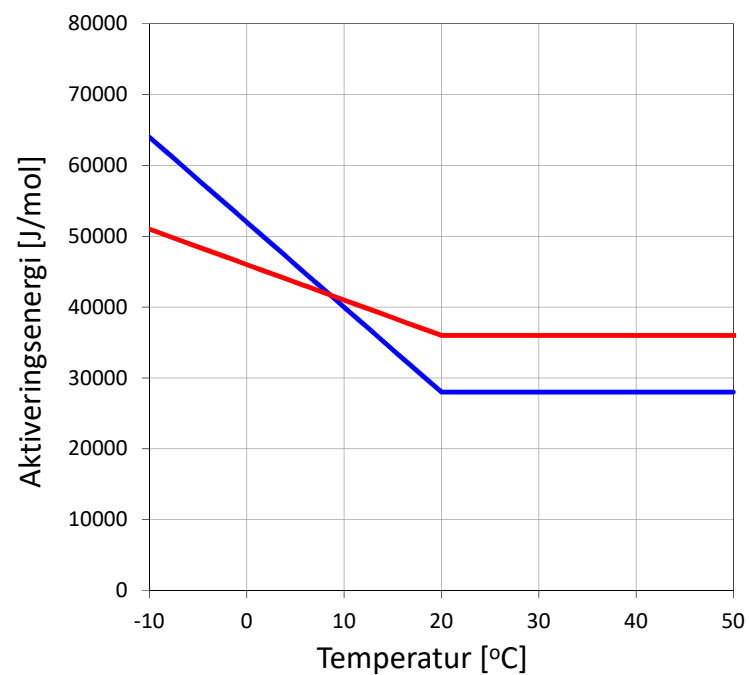
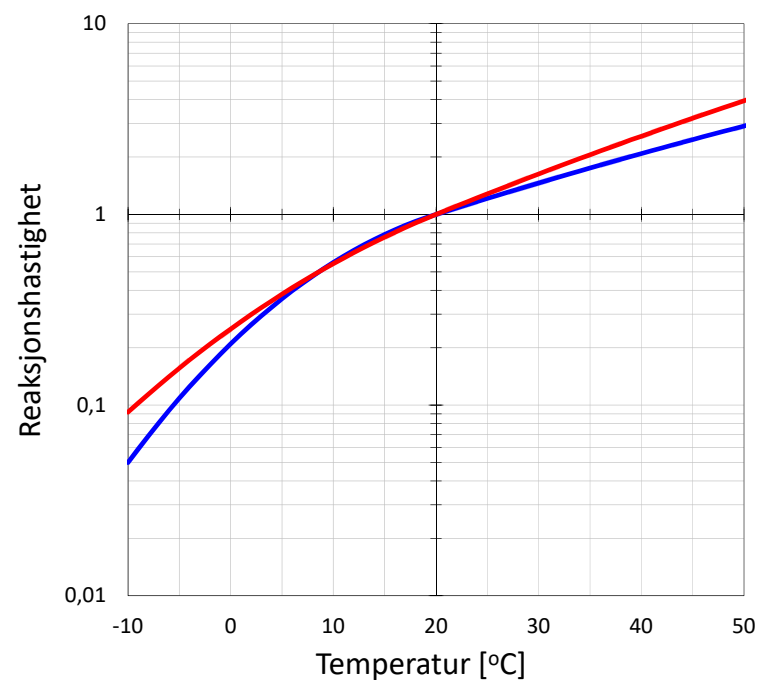
Hastighetsfunksjonen gir sammenhengen mellom reaksjonshastigheten og temperaturen

$$H(\theta) = e^{\frac{E(\theta)}{R} \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{273+\theta} \right)}$$
$$E(\theta) = A + B(20 - \theta), \theta < 20^\circ\text{C}$$
$$E(\theta) = A, \theta > 20^\circ\text{C}$$

$H(20) = 1$  (reaksjonshastighet ved referansetemperaturen  $20^\circ\text{C}$ )

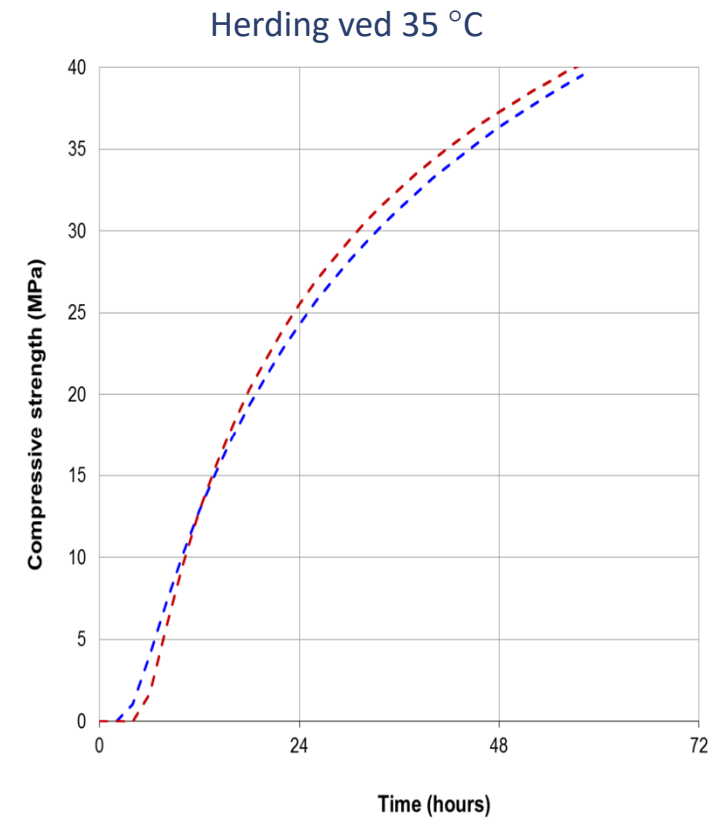
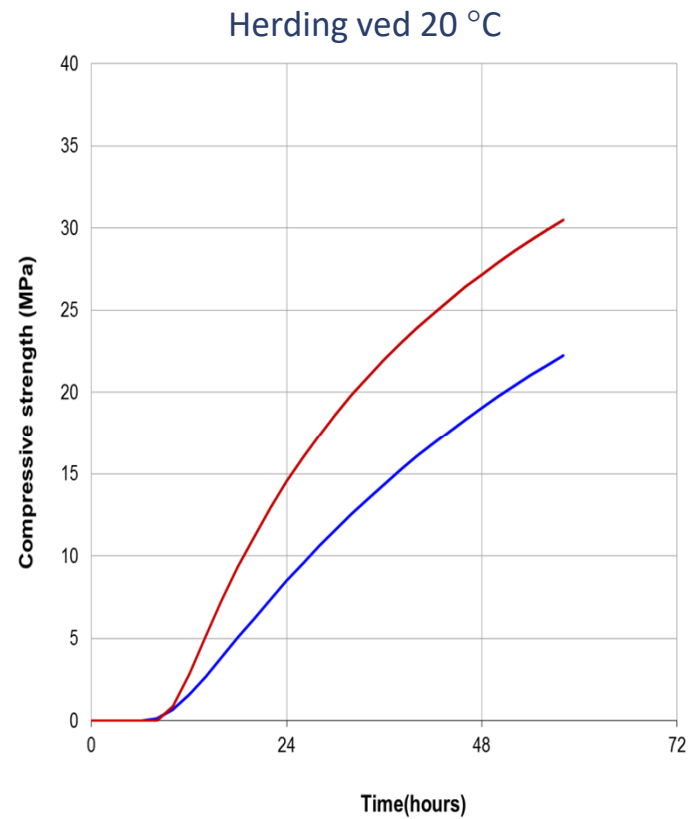
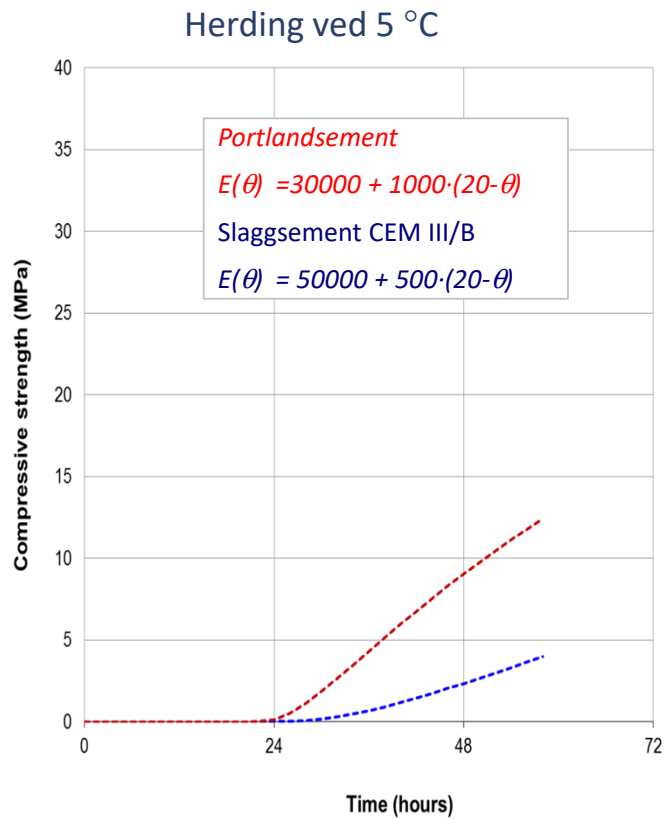
$E(\theta)$  - "Aktiveringsenergi"

(temperaturfølsomhet, faller med økende temperatur)

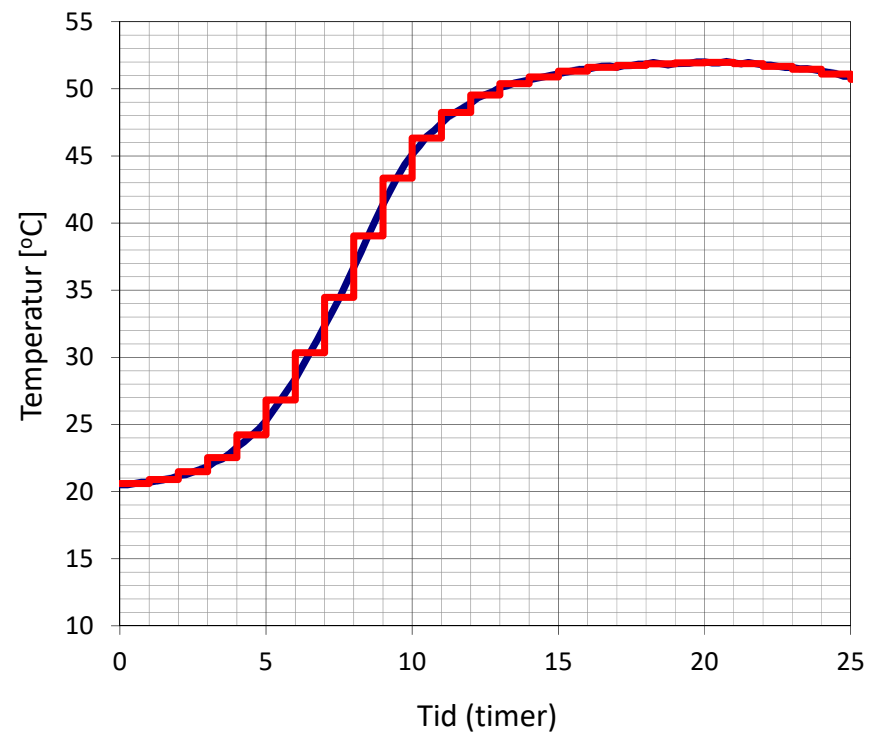
Temperaturfølsomheten  $E(\theta)$ Hastighetsfunksjonen  $H(\theta)$ 



## Effekt av temperaturfølsomheten

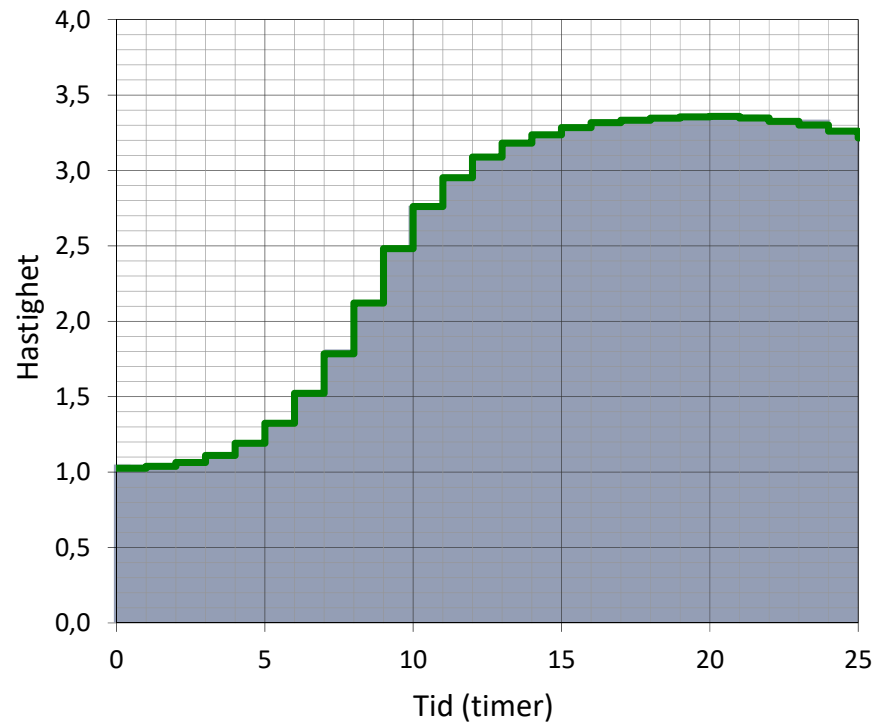


## Modenhetsprinsippet – ekvivalent tid ved 20°C

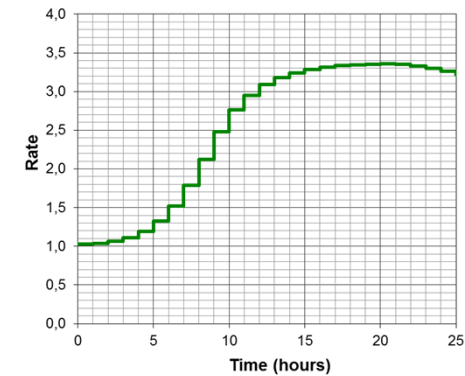
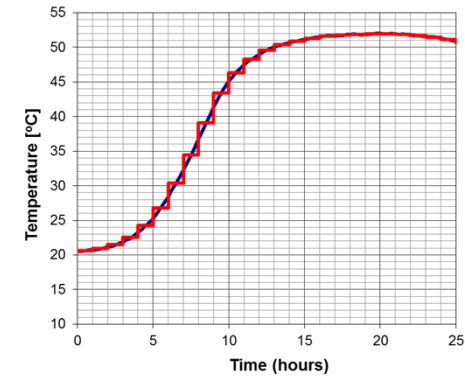


## Modenhetsprinsippet – ekvivalent tid ved 20°C

$$M = \sum_{i=1}^{i=n} H(\theta_i) \cdot \Delta t_i$$



| Tid (t) | Temp. (°C) | Hastighet | Modenhet (h) |
|---------|------------|-----------|--------------|
| 0       | 20,6       | 1,03      | 0,0          |
| 1       | 20,6       | 1,03      | 1,0          |
| 2       | 20,9       | 1,04      | 2,1          |
| 3       | 21,5       | 1,06      | 3,1          |
| 4       | 22,5       | 1,11      | 4,2          |
| 5       | 24,2       | 1,19      | 5,4          |
| 6       | 26,8       | 1,32      | 6,8          |
| 7       | 30,3       | 1,52      | 8,3          |
| 8       | 34,5       | 1,78      | 10,1         |
| 9       | 39,1       | 2,12      | 12,2         |
| 10      | 43,4       | 2,48      | 14,7         |
| 11      | 46,3       | 2,76      | 17,4         |
| 12      | 48,2       | 2,95      | 20,4         |
| 13      | 49,5       | 3,09      | 23,5         |
| 14      | 50,4       | 3,18      | 26,6         |
| 15      | 50,9       | 3,24      | 29,9         |
| 16      | 51,3       | 3,28      | 33,2         |
| 17      | 51,6       | 3,32      | 36,5         |
| 18      | 51,7       | 3,33      | 39,8         |
| 19      | 51,9       | 3,35      | 43,2         |
| 20      | 51,9       | 3,35      | 46,5         |
| 21      | 52,0       | 3,36      | 49,9         |
| 22      | 51,9       | 3,35      | 53,2         |
| 23      | 51,7       | 3,33      | 56,6         |
| 24      | 51,5       | 3,30      | <b>59,9</b>  |



$$M = \sum_{i=1}^{i=n} H(\theta_i) \cdot \Delta t_i$$

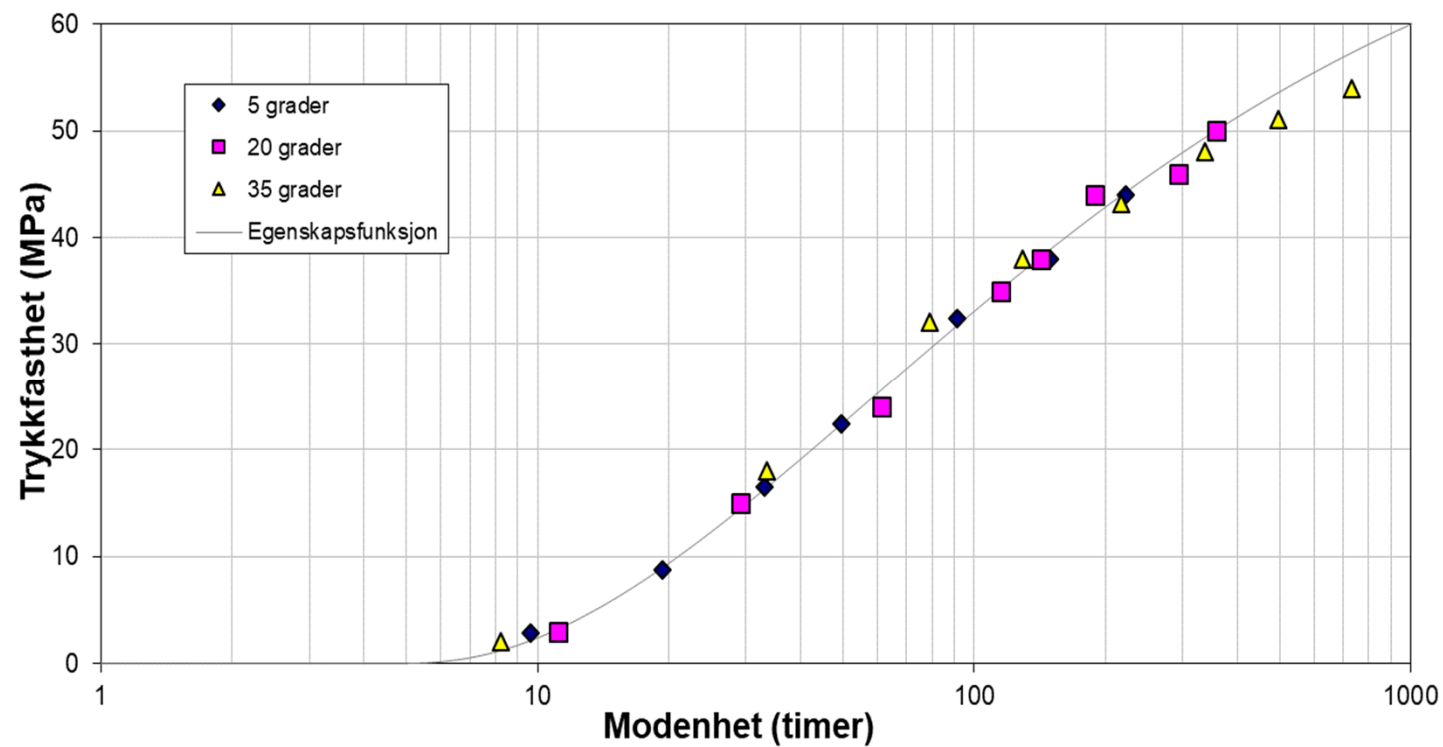
Modenhet [timer]

- Herdetid korrigeret for effekten av temperatur på reaksjonshastigheten
- Referansetemperaturen er alltid 20°C. Når temperaturen er konstant 20°C er modenheten lik herdetiden.

Modenhetsprinsippet gjelder for:

- Varmeutvikling
- Trykkfasthetsutvikling
- Strekkfasthetsutvikling
- E-modulsutvikling

## Kalibrering av hastighetsfunksjonen — «måling» av temperaturfølsomheten

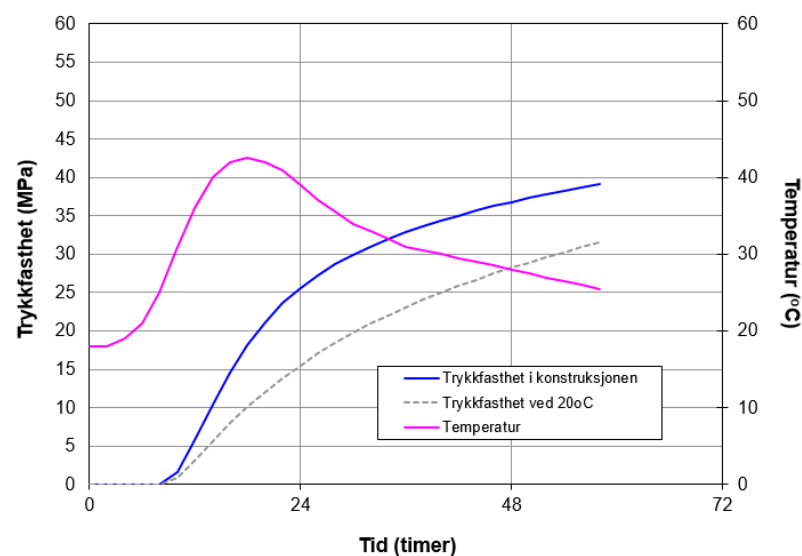


## Praktisk verktøy for beregning av fasthet ut fra temperaturforløp

### Fasthet etter modenhetsprinsippet

© ss 2016-02-25

| Tid<br>[timer] | Betong-<br>temperatur<br>[°C] | Modenhet<br>[timer] | Trykk-<br>fasthet i<br>konstr.<br>[MPa] | Trykk-<br>fasthet ved<br>20°C.<br>[MPa] |
|----------------|-------------------------------|---------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| 0,0            | 18,0                          | 0,0                 |                                         |                                         |
| 2,0            | 18,0                          | 1,8                 |                                         |                                         |
| 4,0            | 19,0                          | 3,7                 |                                         |                                         |
| 6,0            | 21,0                          | 5,7                 |                                         |                                         |
| 8,0            | 25,0                          | 8,0                 | 0,0                                     | 0,0                                     |
| 10,0           | 31,0                          | 10,7                | 1,7                                     | 0,9                                     |
| 12,0           | 36,0                          | 14,2                | 5,8                                     | 3,2                                     |
| 14,0           | 40,0                          | 18,3                | 10,4                                    | 5,6                                     |
| 16,0           | 42,0                          | 22,8                | 14,6                                    | 8,0                                     |
| 18,0           | 42,5                          | 27,6                | 18,2                                    | 10,1                                    |
| 20,0           | 42,0                          | 32,4                | 21,1                                    | 12,1                                    |
| 22,0           | 41,0                          | 37,0                | 23,6                                    | 13,9                                    |
| 24,0           | 39,0                          | 41,4                | 25,6                                    | 15,5                                    |
| 26,0           | 37,0                          | 45,5                | 27,3                                    | 17,0                                    |
| 28,0           | 35,5                          | 49,3                | 28,7                                    | 18,4                                    |
| 30,0           | 34,0                          | 52,9                | 29,9                                    | 19,7                                    |
| 32,0           | 33,0                          | 56,3                | 31,0                                    | 20,9                                    |
| 34,0           | 32,0                          | 59,6                | 32,0                                    | 22,0                                    |
| 36,0           | 31,0                          | 62,8                | 32,8                                    | 23,1                                    |
| 38,0           | 30,5                          | 65,9                | 33,6                                    | 24,1                                    |
| 40,0           | 30,0                          | 69,0                | 34,3                                    | 25,0                                    |
| 42,0           | 29,5                          | 71,9                | 35,0                                    | 25,9                                    |
| 44,0           | 29,0                          | 74,8                | 35,7                                    | 26,7                                    |
| 46,0           | 28,5                          | 77,7                | 36,3                                    | 27,5                                    |
| 48,0           | 28,0                          | 80,5                | 36,8                                    | 28,2                                    |
| 50,0           | 27,5                          | 83,3                | 37,3                                    | 28,9                                    |
| 52,0           | 27,0                          | 85,9                | 37,8                                    | 29,6                                    |
| 54,0           | 26,5                          | 88,6                | 38,3                                    | 30,3                                    |
| 56,0           | 26,0                          | 91,2                | 38,7                                    | 30,9                                    |
| 58,0           | 25,5                          | 93,7                | 39,2                                    | 31,5                                    |





# POWERHOUSE

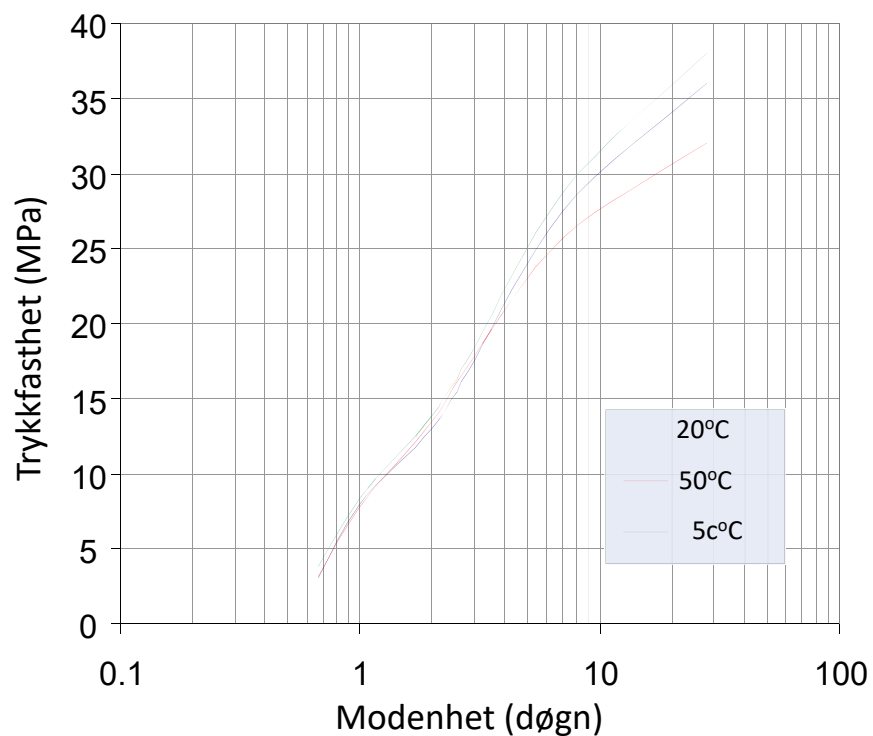
I Powerhouse Brattøra –prosjektet blir dekkene spent opp etter godkjent fasthetskontroll basert på temperaturmåling og bruk av modenhetsprinsippet

Bruk av lavkarbonbetong med mye FA gir behov for herdetiltak:

- Tildekking
- Fyring
- Varmekabler



## Effekt av herdetemperaturen på sluttfastheten



Modenhetsprinsippet kan brukes fram til betongen har nådd 50-70% av sluttfastheten

## Numerisk simulering av herdeforløpet

### 0 Betongegenskaper

- Kalibrert hastighetsfunksjon ✓
- Fasthetsutvikling ✓
- Varmekapasitet ✓
- Termisk ledningsevne ✓
- Varmeutvikling ?

### 0 Konstruksjonens geometri

### 0 Randbetingelser

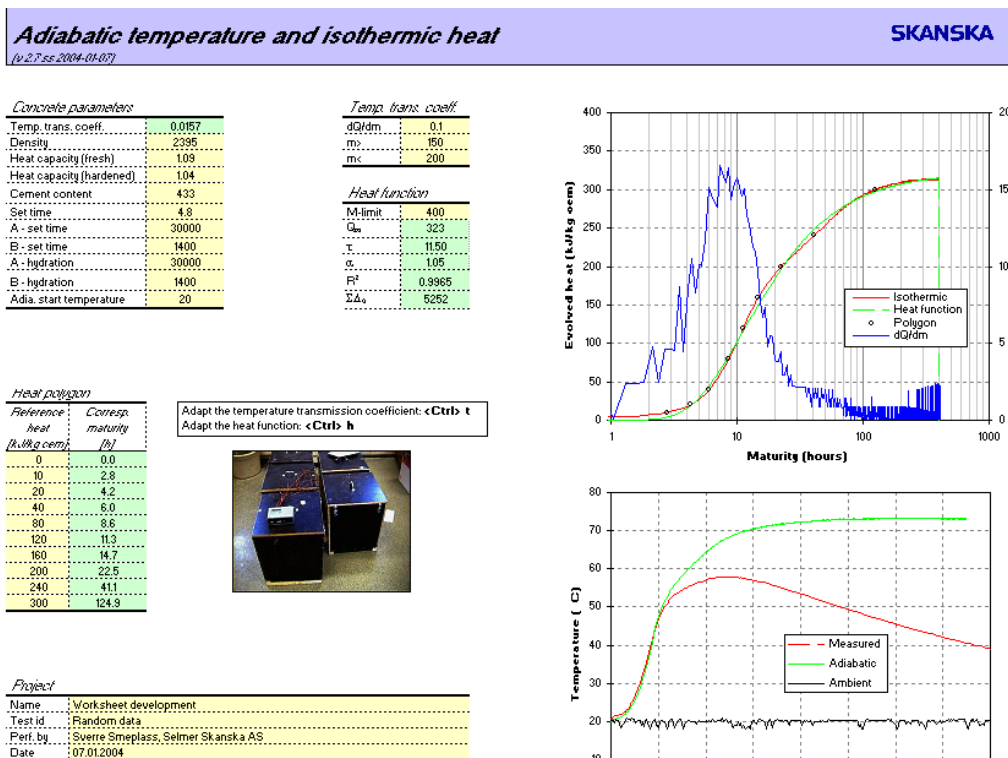
- Underlag, forskaling
- Vær (temperatur og vind)
- Herdetiltak, tildekking

### 0 Fersk betongtemperatur



Måling av herdevarme i stor herdekasse

## Bruk av herdekasse – «semi-adiabatisk kalorimeter»



## Simulering av herdeforløp basert på modenhetsprinsippet

**Hett97**



## Eksempel, Hett97, PIN 8741

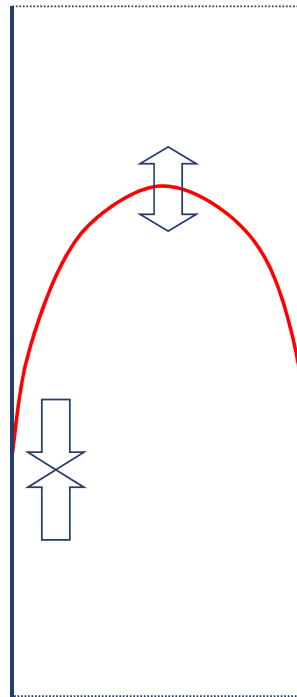
- o Frittbærende dekke, 200 mm
  - B30M60, Norcem Std. FA, 1 % P
  - 5°C, 2m/s vind
- o Værskifte, -5°C
  - Tildekking med plast eller ethafoam
  - Erstatte P med SP
  - Økt betongkvalitet
  - «Vinterbetong» med Industrisement
- o Fyring?

**Hett97**

## Opprissing pga. temperaturforskjeller – «indre fastholding»

Temperaturprofil i en vegg i nedkjølingsfasen

Omgivelser: 5°C  
Overflate: 10°C  
Senter: 35°C  
Gj. snitt: 25°C



$$\begin{aligned}\varepsilon_{\theta} &= \alpha_{\theta} \cdot \Delta\theta \\ &= 1,0 \cdot 10^{-5} / ^{\circ}\text{C} \cdot (25^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C}) \\ &= 1,5 \cdot 10^{-4} = 0,15 \text{ ‰}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_t &= E \cdot \varepsilon_{\theta} \\ &= 15000 \text{ MPa} \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} \\ &= \underline{2,3 \text{ MPa}}\end{aligned}$$

SVV (R762):

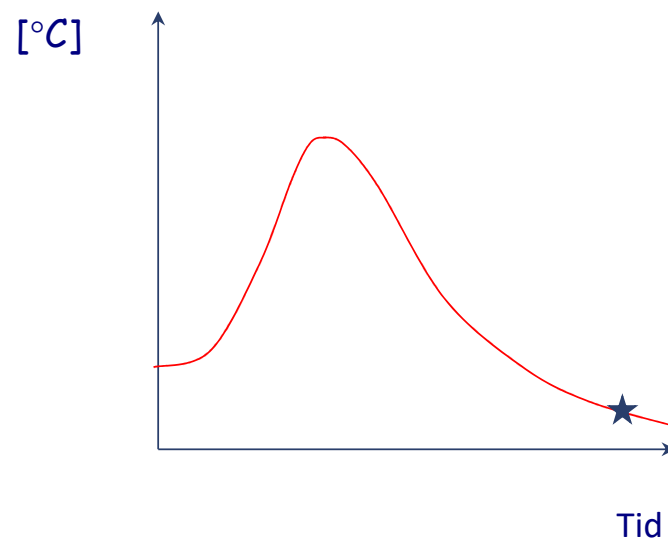
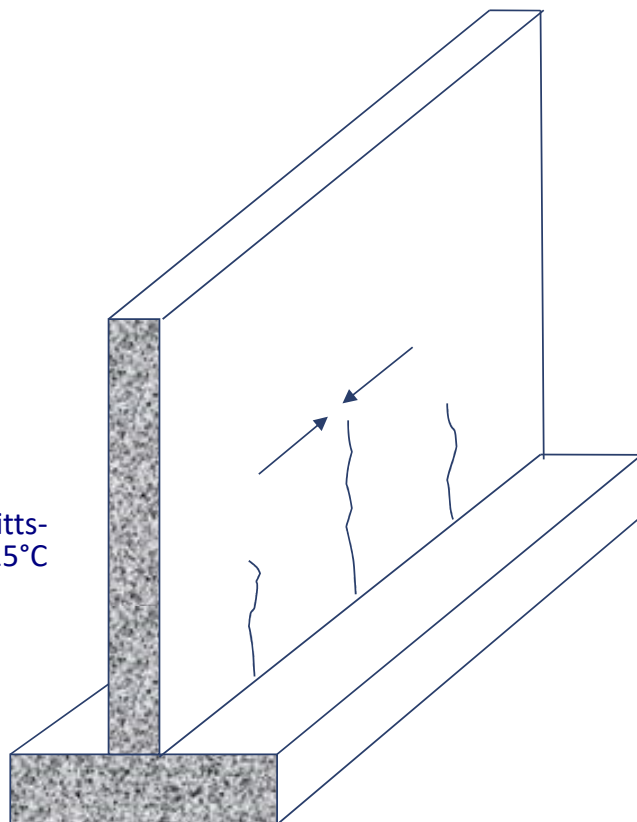
Maksimal tillatt temperatur-differanse i betongtverrsnitt: 20°C





## Opprissing pga. temperaturforskjeller – «ytre fastholding»

Omgivelser: 5°C  
Høyeste gjennomsnitts-  
temperatur i vegg: 25°C  
Fundament: 5°C



SVV (R762):

Maksimal tillatt temperatur-  
differanse mellom støpeavsnitt: 15°C



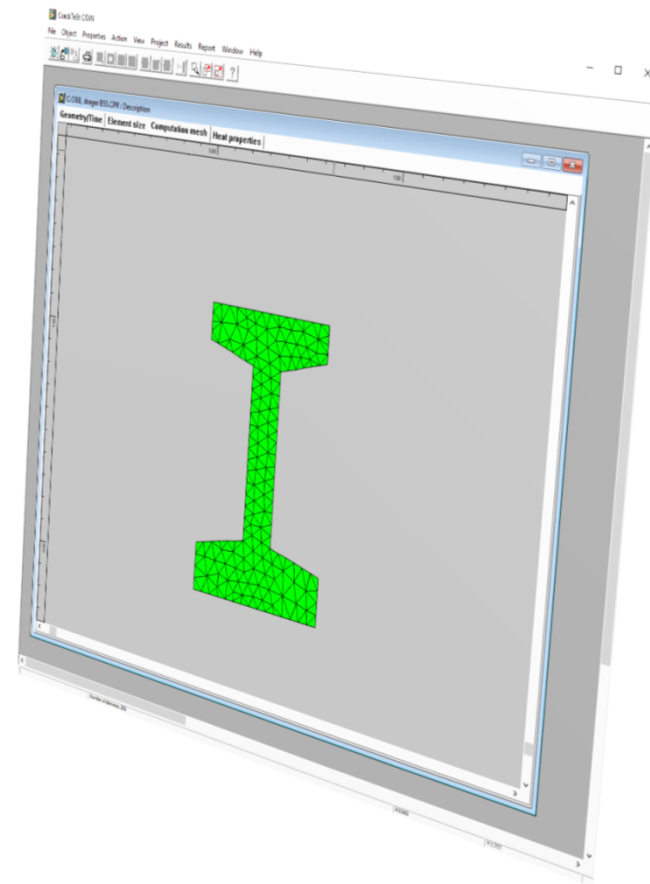


## Termisk induisert opprissing



## Beregning av spenninger og opprissingsfare pga fastholdte temperaturtøyninger i herdefasen

- Utgangspunkt
  - Beregnet temperaturforløp
- Nødvendige materialdata
  - Strekkfasthetsutvikling
  - E-modulsutvikling
  - Autogent svinn
  - Krypegenskaper
- Mer avansert beregningsverktøy
  - FEM-basert, 2- eller 3 - dimensjonalt



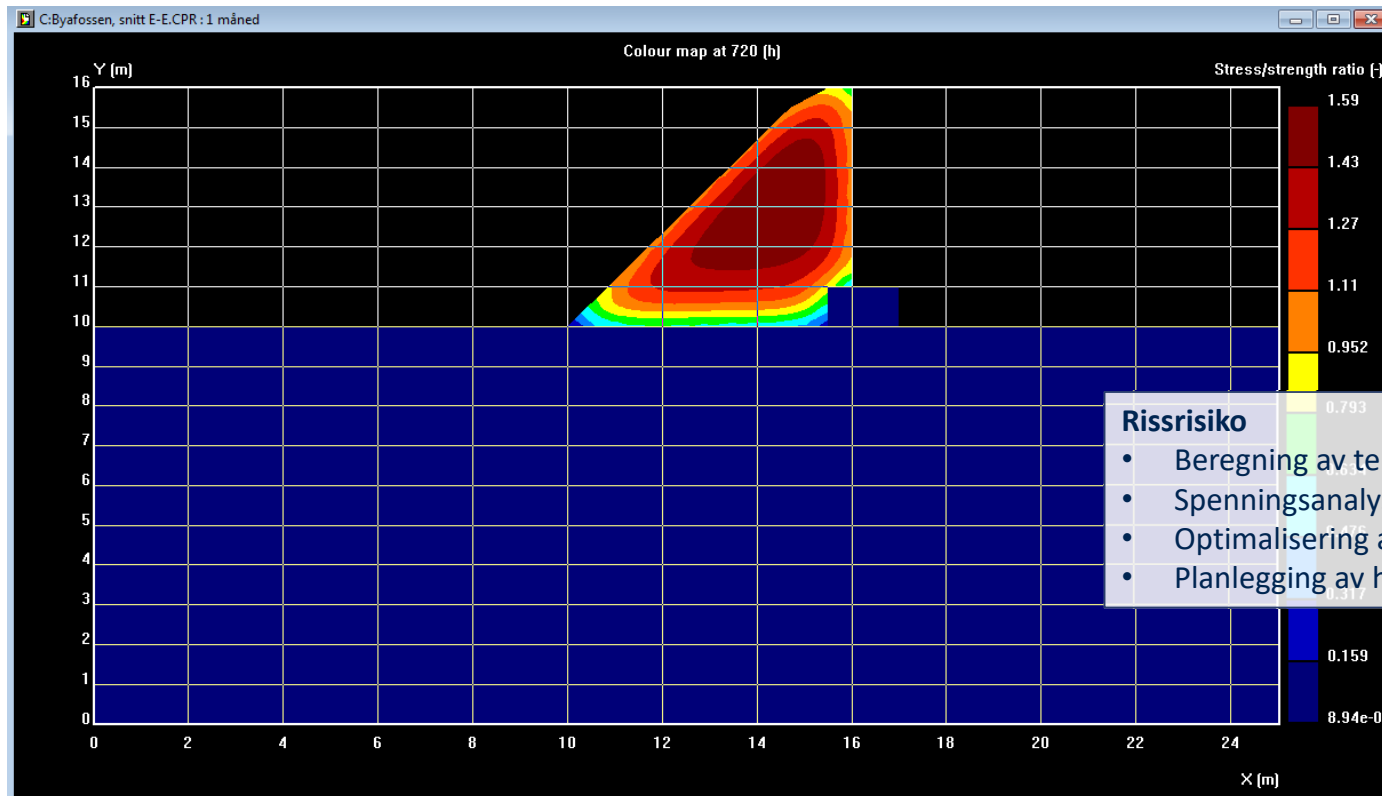
## Termisk induisert opprissing i massive betongkonstruksjoner

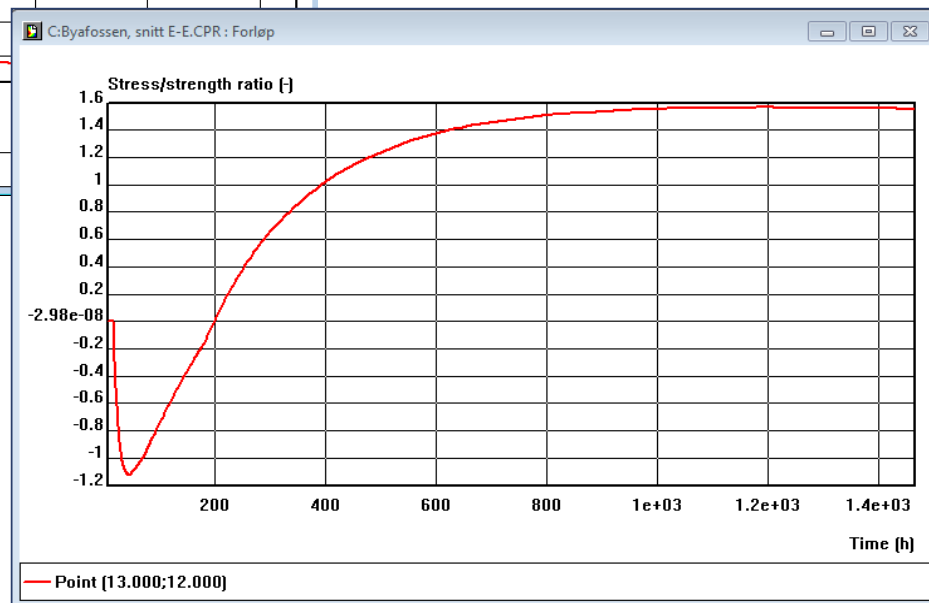
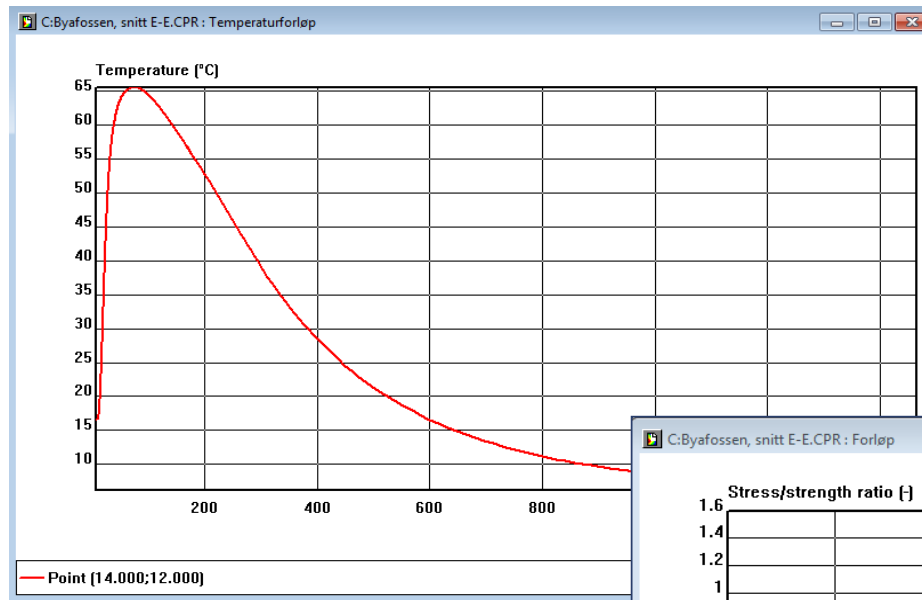
- Sementhydratasjonen gir temperaturstigning på typisk 40-50 °C i massive konstruksjoner (> 2 m tverrsnitt)
- Opprissingen skjer ved nedkjøling pga. fastholding mot fjell eller tilstøtende støpeavsnitt
- Nedkjølingen tar lang tid, opprissingen kan derfor skje sent
- Strekkspenningene er permanente. Opprissing kan derfor indueres lenge etter avsluttet støpearbeid, ved påføring av last eller ved naturlige temperatursvingninger



## Analyse av rissrisiko – CrackTeSt COIN

Fastholdt termisk og autogen dilatasjon – eksempel overløpskonstruksjon Byafossen (NTE)







## Overløpskonstruksjon, Byafossen (NTE)

- Ordinær betongkvalitet, ingen krav til temperaturdifferanser eller risshindrende tiltak
- Ingen rissfordelende armering
- 1-3 gjennomgående, vannførende riss per støpeseksjon, ellers meget godt støperesultat
- Rissvidder 0,3-0,5 mm



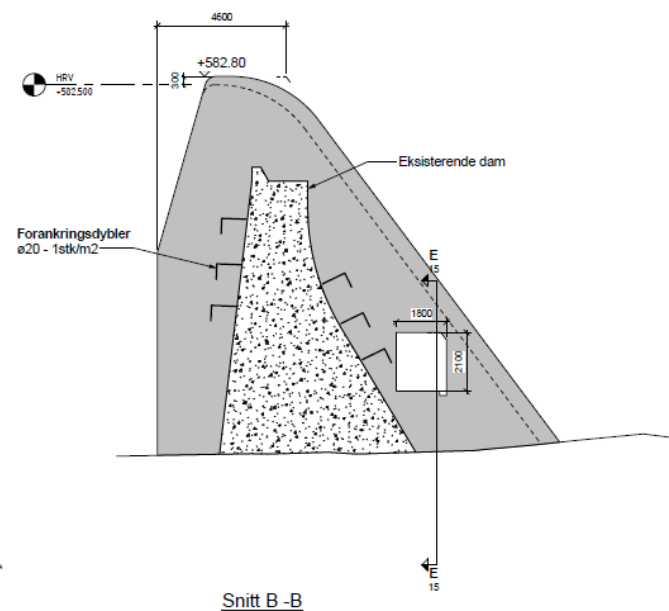
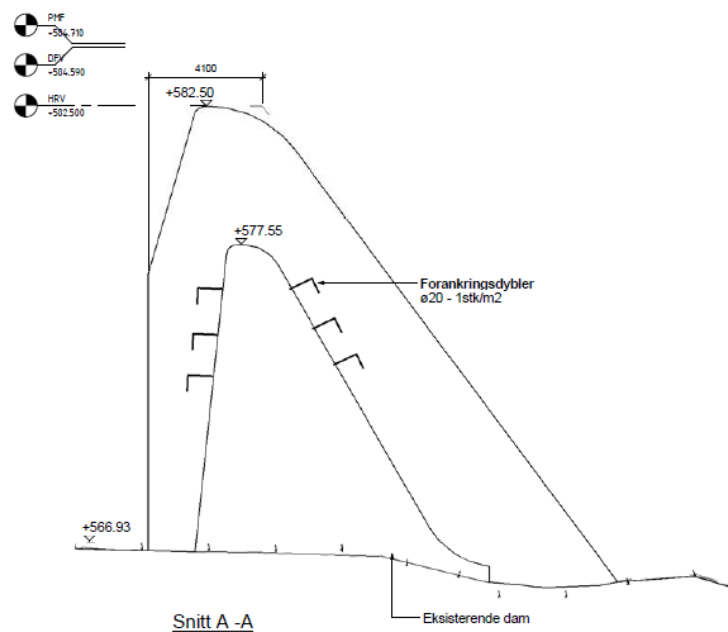
## Fastholdingsforhold ved ombygging og rehabilitering

Eksempel fra Verma kraftverk, Rauma Energi



## Fastholdingsforhold ved ombygging og rehabilitering

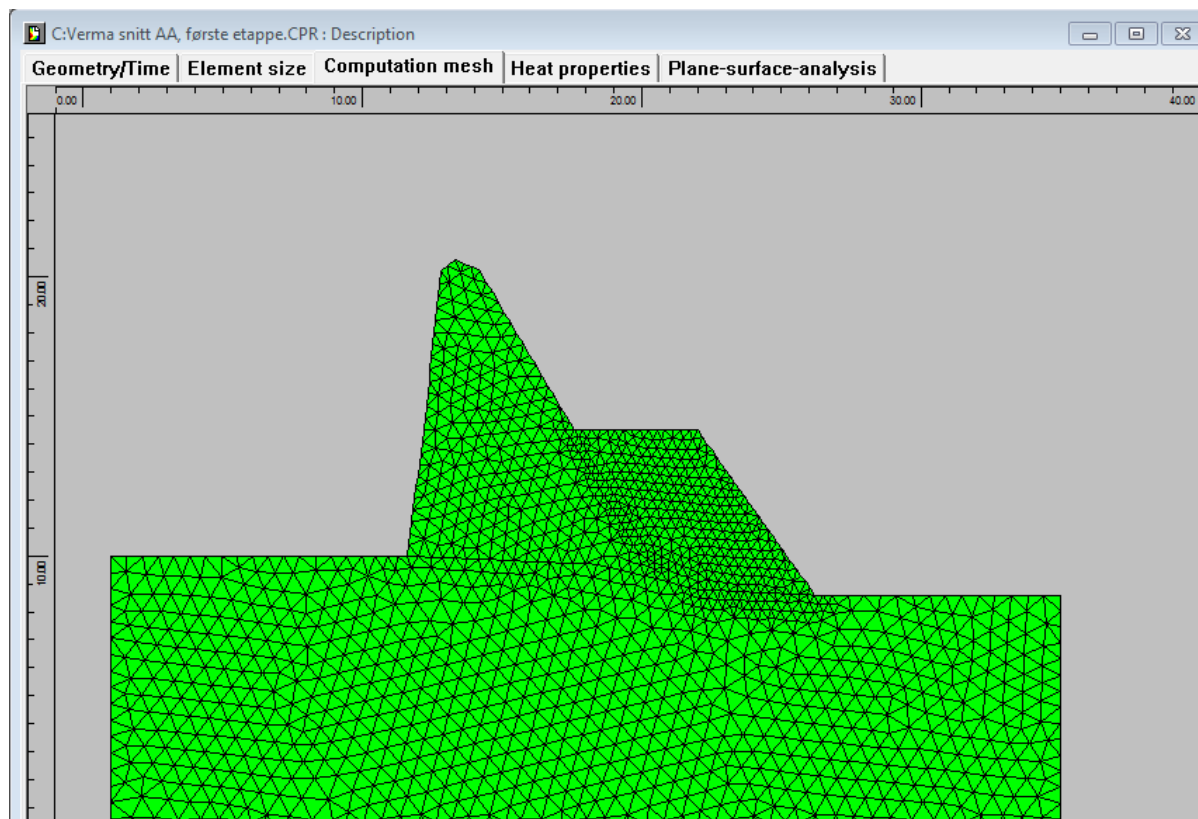
Eksempel fra Verma kraftverk





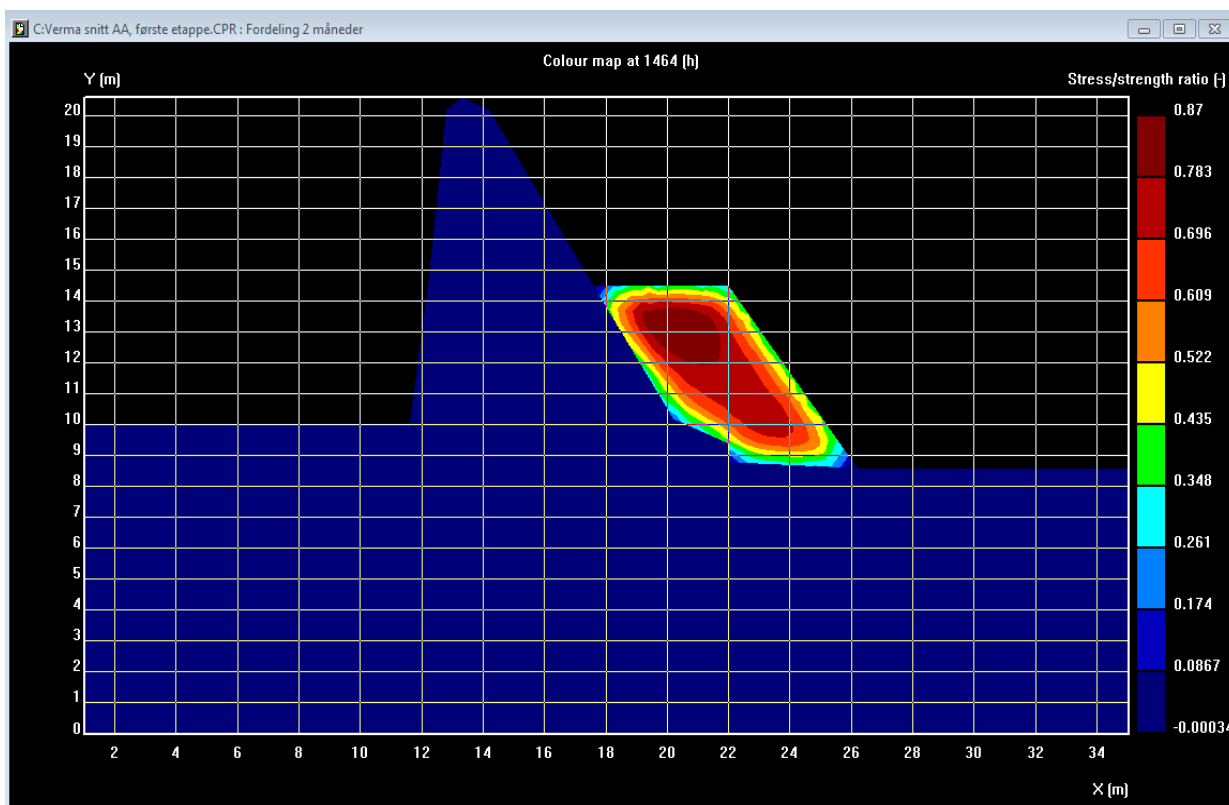
## Samtidig fastholding fra fjell og eksisterende konstruksjon

Analyse av første støpetappe av kappestøp



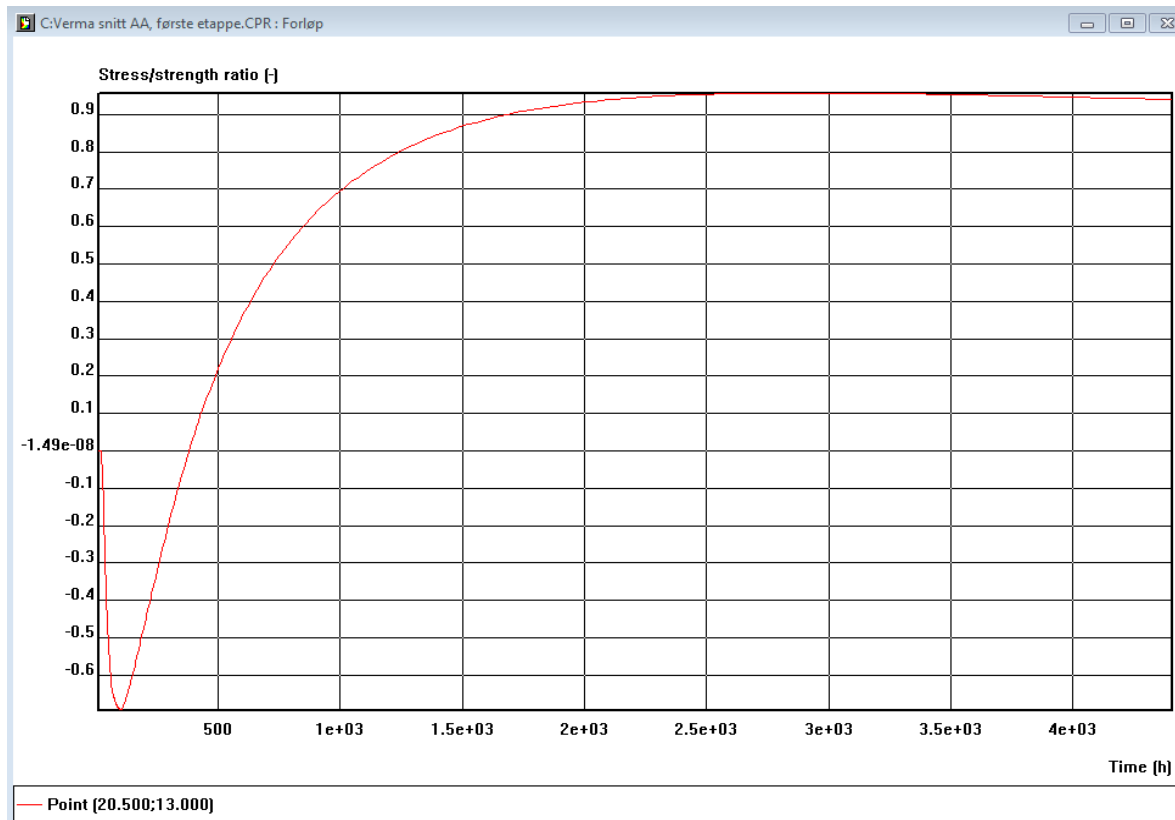
## Samtidig fastholding fra fjell og gammel konstruksjon

### Spenningsfordeling 2 måneder etter støp med lavvarmebetong

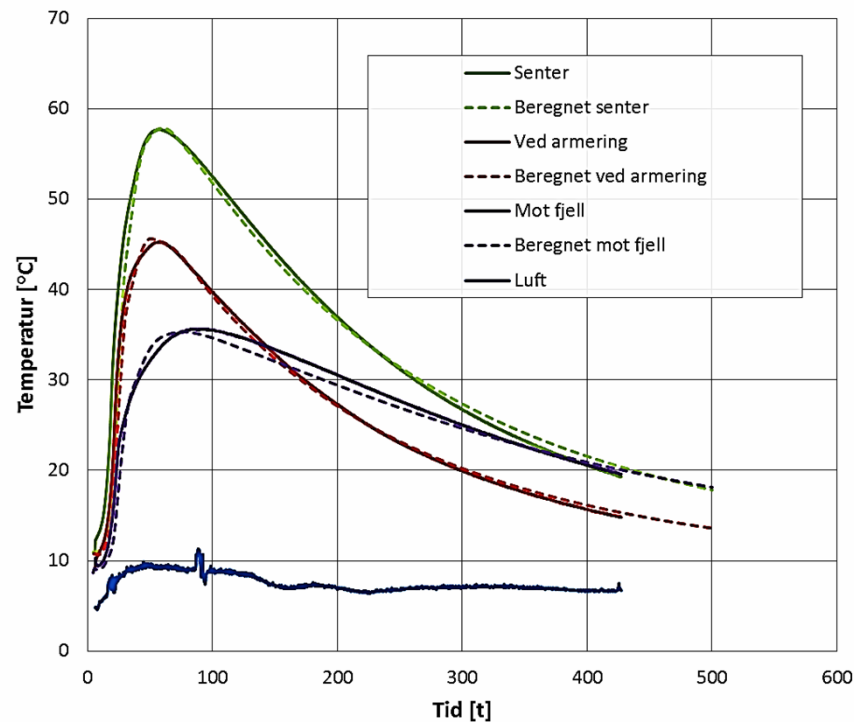


## Samtidig fastholding fra fjell og gammel konstruksjon

Forløp av maksimal rissindeks



## Kalibrering av spenningsberegninger



- Kalibrering av beregnet temperaturforløp mot målte temperaturer gir mer presise spenningsberegninger. Innledende temperaturmålinger i herdekasse med aktuell betongsammensetning er obligatorisk
- Betydelig usikkerhet i vurderingen av rissrisiko. Sikkerhet for rissfrihet krever god margin i beregningene
- Måling og dokumentasjon av strekkfasthet og E-modul gir økt presisjon i beregningene



## Tiltak for å begrense termisk industert opprissing i massive konstruksjoner – reduserte temperaturforskjeller

| Tiltak                                             | Temperatur-reduksjon (°C) | Kostnad (NOK/m³) |
|----------------------------------------------------|---------------------------|------------------|
| Kald fersk betong (vintertiltak)                   | ~ 5                       | 0                |
| Kjølerør, stål, $\phi 30$ mm, c/c 500 mm, injisert | 7-12                      | 300-500          |
| Lavvarmebetong, 30 % FA                            | 6-9                       | 0-100            |
| Lavvarmebetong, 40 % FA                            | 8-12                      | 0-100            |

### Andre tiltak?

- Redusere fastholdingen mot fjell eller naboseksjon?
- Oppvarming av underlag?
- Støp mot varm naboseksjon?

## Hva er lavvarmebetong?

- Betong med høy andel pozzolane eller hydrauliske bindemidler (flygeaske eller slag)
- Flyveaskeinnhold 25-40 % av totalt bindemiddel (FA i sement eller FA tilsatt på blandeverk. Norcem Anlegg FA + 10% ekstra FA er en vanlig løsning). Regler for tilsetning er gitt i NS-EN 206 og SVV håndbok R762
- Slagginnhold 50-85% av totalt bindemiddel (alltid som en del av sementen i Norge. Både Norcem/ Heidelberg og Cemex kan levere CEM III/B). SVV godkjenner ikke CEM III/B
- Typisk v/c = 0,45
- Adiabatisk temperaturstigning redusert med 6-20°C
- Tidligere tiders «dambetong» var basert på «damsement», en grovmalt portlandsement (CEM I) med liten varmeutvikling, kombinert med grovt tilslag ⇒ «**lavvarmebetong**»

*NB! Lavvarmebetong er ikke definert som begrep i Norsk Standard*

## SVVs definisjon av lavvarmebetong

Tabell 84.4-1

| Gjennomsnittlig omgivelsestemperatur, $T_{\text{snitt}}$ | Krav til maksimum temperaturøkning i herdekassa, $\Delta T$ |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 25 °C                                                    | 36 °C                                                       |
| 20 °C                                                    | 35 °C                                                       |
| 15 °C                                                    | 34 °C                                                       |
| 10 °C                                                    | 33 °C                                                       |
| 5 °C                                                     | 32 °C                                                       |
| 0 °C                                                     | 31 °C                                                       |
| -5 °C                                                    | 30 °C                                                       |



## Oppsummering

- «Herdeteknologi» gir mulighet til å forutsi herdeprosessen og styre tiltak på byggeplass, også ved bruk av lavkarbonbetong
- Lavvarmebetong  $\approx$  lavkarbonbetong
- Lavvarmebetong og lavkarbonbetong er tregere enn ordinær betong, men trenger ikke å ha høyere temperaturfølsomhet
- Sementer med høyt slagginnhold har meget høy temperaturfølsomhet
- Lavvarmebetong reduserer tendensen til termisk opprissing i fastholdte konstruksjoner