

# Effekten av lavvarmebetong på fasthetsutvikling og rissrisiko i anleggskonstruksjoner utsatt for fastholding

**Øyvind Oskarsen**  
**Arild Halvorsen Kind**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Sverre Smeplass, KT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for konstruksjonsteknikk





## **MASTEROPPGAVE 2012**

*For stud. techn.*

Arild Kind Halvorsen og Øyvind Oskarsen

### ***Effekten av lavvarmebetong på fasthetsutviklingen og rissrisiko i anleggskonstruksjoner utsatt for fastholding***

*The effect of low heat concrete on the strength development and crack risk in civil concrete structure  
subject to restraint*

#### Innledning

I grove konstruksjoner gir støpeskjøter og kontaktstøp fare for opprissing på grunn av fastholdt termisk og autogen dilatasjon. Dette kan gi problemer i vanntette konstruksjoner, og kan være en utfordring for betongens bestandighet. I de siste årene har bruken av lavvarmebetong redusert dette problemet betydelig, og dermed bidratt til økt kvalitet i mange anleggskonstruksjoner. Lavvarmebetong har mer langsom fasthetsutvikling enn tradisjonell anleggsbetong. Dette gir ulemper som forlenget rivetid, forlengede produksjonssykluser, og forsinket oppspenning av spennarmerte konstruksjoner.

#### Oppgave

Oppgaven går ut på å bruke FEM-basert beregningsverktøy til å beregne fasthets-utvikling, spenningsutvikling og rissrisiko i aktuelle betongtverrsnitt utsatt for ulike grader av fastholding. Kulvert-konstruksjonen i den nye jernbanestasjonen ved Værnes lufthavn er et serdeles aktuelt analyseobjekt. Typiske tverrsnitt for fullprofil-utstøpte fjelltunneler er også aktuell for slik analyse. Analysene skal omfatte flere typer betong tilpasset denne typen konstruksjoner.

Videre skal det gjennomføres laboratorieforsøk for å kartlegge effekten av størknings- og herdingsakseleratorer på betongens aktiveringsenergi, varmetutvikling, fasthetsutvikling og

sluttfasthet. Effekten av disse tilsetningsstoffene skal evalueres ved at det gjennomføres nye FEM- analyser basert på resultatene fra laboratorieforskene.

### **Gjennomføring**

Oppgaven utføres delvis på instituttet, delvis på Skanskas byggeplass på Værnes lufthavn. Gjennomføringen av oppgaven skal tilpasses de ressurser som stilles til disposisjon.

Oppgaven er utlevert 16. januar 2012, og skal innleveres til Institutt for konstruksjonsteknikk innen 12. juni 2011.

2011-01-10

Sverre Smeplass  
(faglærer)

## Forord

Denne masteroppgaven er en besvarelse i faget TKT4925, våren 2012 ved Institutt for Konstruksjonsteknikk på NTNU. Rapporten er utarbeidet som et selvstendig arbeid med veiledning fra Prof. II Sverre Smeplass.

Formålet med oppgaven er å tilegne seg forståelse for problemstillinger knyttet til fersk betong. Temperatur og rissutvikling i betonger med forskjellig mengde flygeaske, størknings- og herdingsakselerator er temaer som gjennomgås i oppgaven. I tillegg er dataverktøyet CrackTeSt COIN benyttet i analysearbeidet.

Vi vil gjerne rette en stor takk til veileder Sverre Smeplass for hans store engasjement og interesse rundt oppgaven. Han har vært til stor hjelp med faglige innspill og diskusjon rundt temaet.

Takk til Ove Loraas, Steinar Seehuus og de andre ansatte ved NTNU lab for betong. De har bidratt med hjelp rundt det praktiske samt innspill til laboratorieprogrammet. Takk til Oliver Berget Skjølsvik for innføring i CrackTeSt COIN.

Trondheim, 7.mai 2011

Arild Kind Halvorsen

Øyvind Oskarsen



## Sammendrag

Bruken av lavvarmebetong i massive konstruksjoner bidrar til å redusere varmeutviklingen, og dermed rissrisikoen. På den andre siden medfører bruken av lavvarmebetong lav tidligfasthet i konstruksjonen. Dette kan gi redusert fremdrift av bygg- og anleggsprosjekter. Rescon Mapei har laget herdingsakseleratoren Mapefast HA, et produkt de mener skal øke tidligfastheten i lavvarmebetong, uten å påvirke maksimumstemperaturen. Gjennom laboratorieforsøk har denne studien som hovedmål å kartlegge effekten av Mapefast HA i lavvarmebetong med ulike mengder flygeaske. Det er spesielt interessant å undersøke Rescon Mapei sitt utsagn, om at tidligfastheten kan økes uten at temperaturen stiger. Noe som vil føre til at risikoen for opprissing minker der betongen er utsatt for fastholdningseffekter. Med tanke på å unngå riss, er det svært positivt at lavvarmebetonger kan øke tidligfastheten uten at temperaturen øker. Det er også undersøkt om kombinasjonen av Mapefast HA og størkningsakseleratoren Mapefast SA, vil kunne gi en ytterligere positiv effekt på betongens styrke- og varmeutvikling. Videre ble data fra forsøkene benyttet i det FEM-baserte beregningsverktøyet CrackTeSt COIN. Dette for å simulere temperaturforløpet og analysere rissrisiko i aktuelle betongtverrsnitt.

Resultatene viser at varmeutviklingen i betongene øker ved bruken av herdingsakseleratoren Mapefast HA, noe som ikke var forespeilet. Varmeutviklingens intensitet steg også markant mellom 10 og 20 modenhetstimer. Disse to forhold fører til at maksimumstemperaturen i en herdende betongkonstruksjon vil øke. Det er samtidig få indikasjoner på at tidligfastheten forbedres i betonger med HA når betongtemperaturen holdes konstant.

Det faktum at maksimumstemperaturen stiger er særdeles ugunstig med tanke på opprissingstendensen. Høyere temperatur fører til at betongen utvider seg mer, og må dermed trekke seg mer sammen under avkjøling. Når tverrsnitt avkjøles og trekker seg sammen oppstår problemer i form av strekkspenninger, siden den ferske betongen har blitt stivere. Det er ingen indikasjoner på at kombinasjonen HA og SA har noen positive effekter for lavvarmebetong.

Det kan virke som at Mapefast HA øker temperaturen i betongen, som indirekte vil føre til en raskere styrkeutvikling. Utsagnet om at tidligfasthet skal økes uten at maksimumstemperaturen i betongen økes, ser ikke ut til å være korrekt. I lavvarmebetong er det ønskelig å holde maksimumstemperaturen lavest mulig, Mapefast HA bidrar ikke til dette.

For de aktuelle formål undersøkt i studien, påviser Mapefast HA ingen gunstige effekter for massive betongtverrsnitt. Spenningsanalyser utført i CrackTeSt COIN viser at risikoen for opprissing på grunn av fastholdt termisk og autogen dilatasjon øker ved bruk av Mapefast HA, noe som er det motsatte av det man ønsket å oppnå.





## Abstract

The use of low heat concrete (LHC) in massive structures results in reduced heat development and crack index. On the other hand LHC results in lower early strength. This can reduce the progress on building- and construction sites. The admixture manufacturer Rescon Mapei has developed the hardening accelerator Mapefast HA, a product they claim increases the early strength of concrete without affecting the maximum temperature. The purpose of this thesis has been to determine the effect of the hardening accelerator Mapefast HA, in LHC with different levels of fly ash, through laboratory experiments. It is particularly interesting to investigate the statement of Rescon Mapei, that Mapefast HA can increase the early strength without influencing the heat development. It would be a positive effect if the LHC can increase the early strength without any temperature rise. This property will decrease the risk of cracking where concrete is exposed to internal and external restraints. It has also been investigated whether the combination of Mapefast HA and the setting accelerator Mapefast SA, will provide any positive effects on the strength and heat development. The results revealed during the laboratory experiments were used in the FEM based software CrackTeSt COIN. This is to simulate the temperature profile and analyze the crack index in current cross sections.

The results show that the heat development in the concrete increases with the use of Mapefast HA, which was not envisioned in the data sheet. The heat development intensity increased sharply between 10 and 20 maturity hours. These two terms resulted in an increase of the maximum temperature. There are few indications that the early strength were improved with HA when the concrete temperature were kept constant.

The fact that the maximum temperature rises, is particularly unfavorable in terms of the crack index. Higher temperature causes the concrete to expand, and during cooling the concrete tries to contract correspondently. Problems will occur during contraction, due to tensile forces, because the concrete has gained stiffness. There are no indications of positive effects by the combination Mapefast HA and SA, compared to concretes with just HA.

It appears that Mapefast HA increase the temperature of the concrete, which indirectly lead to faster strength development. The statement that the early strength will be increased without any increase of the maximum temperature does not seem to be correct. In low heat concrete it is beneficial to keep the maximum temperature as low as possible. Mapefast HA does not contribute to this.

For the current purposes examined in this study, there are no favorable effects due to the use of Mapefast HA in massive cross sections. The analysis made by CrackTeSt COIN gave increased crack index, which is the opposite of the desirable effect.



## Innhold

1	Innledning.....	1
1.1	Bakgrunn.....	1
1.2	Hensikt.....	2
1.3	Casestudie av kulvert under Værnes lufthavn .....	3
1.4	Rissanalyse og lavvarmebetong i dag.....	4
2	Teori.....	5
2.1	Formål.....	5
2.2	Herdeteknologi og betongens ulike faser .....	6
2.3	Herde- og størkningsakseleratorer.....	7
2.4	Hastighetsfunksjon og aktiveringsenergi .....	9
2.4.1	Hastighetsfunksjonen.....	9
2.4.2	Aktiveringsenergi.....	10
2.5	Modenhetsprinsippet .....	11
2.6	Varmeutvikling, volumendring og spenningsoppbygging i ung betong.....	12
2.6.1	Varmeutvikling .....	12
2.6.2	Volumendring.....	14
2.6.3	Spenningsoppbygging .....	15
2.7	Pozzolaner .....	16
2.7.1	Pozzolaner og pozzolanreaksjoner.....	16
2.7.2	Silikastøv.....	17
2.7.3	Flygeaske .....	18
2.7.4	Flygeaskeinnhold i sement.....	20
2.8	Lavvarmebetong.....	21
2.9	Sammenheng mellom trykk, strekk og E-modul .....	22
2.10	Rissindeks.....	23
2.11	Indre og ytre fastholdning .....	24
3	Laboratorieprogram .....	27
3.1	Hensikt.....	27
3.2	Betongreseptene .....	28
3.3	Trykkfasthetsutvikling og aktiveringsenergi.....	29
3.4	Resultater fra trykktestingen.....	32
	Referansebetongen med Anlegg FA(Resept 1): .....	33
	Anlegg FA og høy dose HA(Resept 5): .....	34

Anlegg FA med 10 % ekstra FA(Resept 3): .....	35
Anlegg FA med 20 % ekstra FA(Resept 2): .....	36
Anlegg FA med 20 % ekstra FA og moderat mengde HA(Resept 4):.....	37
Anlegg FA med 20 % ekstra FA og høy mengde HA(Resept 6):.....	38
Anlegg FA med 20 % ekstra FA, høy mengde HA og SA(Resept 7): .....	39
3.5 Parameterne for aktiviseringsenergi og egenskapsfunksjon .....	40
3.6 Varmeutvikling i betong .....	43
3.7 Resultater fra herdekassene.....	44
Referansebetongen med Anlegg FA (Resept 1): .....	45
Anlegg FA og høy dose HA (Resept 5): .....	46
Anlegg FA med 10 % ekstra FA (Resept 3): .....	47
Anlegg FA med 20 % ekstra FA (Resept 2): .....	48
Anlegg FA med 20 % ekstra FA og middels dose HA (Resept 4): .....	49
Anlegg FA med 20 % ekstra FA og høy dose HA (Resept 6): .....	50
Anlegg FA med 20 % ekstra FA, SA og høy dose HA (Resept 7): .....	51
3.8 Parameterne for varmefunksjonen .....	54
4 Bruk av rissanalyseprogram .....	57
4.1 Hensikt .....	57
4.2 Bruken av Rissanalyseverktøy .....	57
4.3 CrackTeSt COIN Ver.2011 .....	58
4.4 Simulering av varmeutvikling .....	60
4.5 Bakgrunn for bruk parametere og input for analyse .....	61
4.5.1 Generelle beregningsforutsetninger/randbetingelser.....	61
4.5.2 Forutsetninger for geometri .....	62
4.5.3 Forutsetninger klimavariasjoner .....	63
4.6 Temperaturutvikling og rissindeks i vegg .....	64
4.6.1 Støping av vegg på fundament.....	64
4.6.2 Rissindeks i vegg .....	70
4.7 Temperaturutvikling og rissindeks i takplata .....	75
4.7.1 Støping av takplate.....	75
4.7.2 Rissindeks i takplate .....	78
5 Diskusjon .....	81
6 Konklusjon .....	83
7 Videre arbeid.....	85
Referanser .....	87

Vedlegg A - Resepter .....	91
Vedlegg B- Herdekasseforsøk.....	109
Vedlegg C - Datablad .....	117
Vedlegg D – Plantegninger Værnes.....	127



## Figurer

Figur 1 Påbegynte anleggsarbeider, eksisterende kulvert over sporet .....	3
Figur 2 Planlagt forlengelsen av kulvert under Værnes Lufthavn, tverrsnitt [2] .....	4
Figur 3 Illustrasjon fra byggingen av senketunnelen i Bjørvika.....	4
Figur 4 Betongens faser og temperatur over tid [3] .....	6
Figur 5 Akseleratorer og grad av varmeutvikling [6].....	7
Figur 6 Reaksjonshastighet $H(\theta)$ for en sement avhenger av temperatur [10] .....	9
Figur 7 Modell for aktiveringsenergi [10].....	10
Figur 8 Empirisk varmefunksjon .....	12
Figur 9 Spenningsoppbygging i herdefasen [3] .....	15
Figur 10 Illustrasjoner av pozzolaner [40] .....	16
Figur 11 Silikastøv [39] .....	17
Figur 12 Flygeaske [42].....	18
Figur 13 Prinsippskisse temperaturøkning ved ulike prosentandeler FA .....	19
Figur 14 Prinsippskisse ved ulike prosentandeler FA ved isotherm varmeutvikling.....	19
Figur 15 Prinsippskisse styrkeutvikling ved ulike prosentandeler FA .....	20
Figur 16 Styrkeutvikling lavvarmebetong [22] .....	21
Figur 17 Relativ styrke- og stivhetsutvikling.....	22
Figur 18 Illustrasjon av indre fastholdning [12] .....	24
Figur 19 Eksempel på riss i en vegg på grunn av indre og ytre fastholdning [3] .....	24
Figur 20 Eksempel på rissmønster i to vegger pga ytre fastholdning fra underlaget [3] .....	25
Figur 21 Grad av fastholdning [3].....	25
Figur 22 Losenhausen-maskin for trykktesting .....	29
Figur 23 Terning i brudd under forsøk .....	29
Figur 24 Alle trykktestene ble plottet mot tiden de ble utført .....	30
Figur 25 Tilpassing av egenskapsfunksjonen.....	30
Figur 26 A-verdien tilpasses .....	31
Figur 27 B-verdien tilpasses .....	31
Figur 28 Trykkfasthet plottet mot modenhet for Resept 1.....	33
Figur 29 Trykkfasthet plottet mot modenhet for Resept 5.....	34
Figur 30 Trykkfasthet plottet mot modenhet for Resept 3.....	35
Figur 31 Trykkfasthet plottet mot modenhet for Resept 2.....	36
Figur 32 Trykkfasthet plottet mot modenhet for Resept 4.....	37
Figur 33 Trykkfasthet plottet mot modenhet for Resept 6.....	38
Figur 34 Trykkfasthet plottet mot modenhet for Resept 7.....	39
Figur 35 A-verdi i $E(\theta)$ plottet mot dose HA .....	41
Figur 36 Avbindingstid mot dose HA.....	42
Figur 37 Tre herdekasser og Almemo datalogger .....	43
Figur 38 Illustrasjon på kompensasjonsbidraget .....	44
Figur 39 Utviklet varme(Isothermic) og stigningstallet til kurven( $dQ/dm$ ) plottet mot modenheten til betongen .....	45
Figur 40 Målt temperatur(Measured) i herdekasse, omliggende temperatur(Ambient) og Adiabatisk temperatur(Adiabatic).....	45
Figur 41 Utviklet varme (Isothermic) og stigningstallet til kurven ( $dQ/dm$ ) plottet mot modenheten til betongen. ....	46
Figur 42 Målt temperatur i herdekasse, omliggende temperatur(Ambient) og Adiabatisk temperatur .....	46

Figur 43 Utviklet varme (Isothermic) og stigningstallet til kurven (dQ/dm) plottet mot modenheten til betongen. ....	47
Figur 44 Målt temperatur(Measured) i herdekasse, omliggende temperatur og Adiabatisk temperatur .....	47
Figur 45 Utviklet varme(Isothermic) og stigningstallet til kurven(dQ/dm) plottet mot modenheten til betongen .....	48
Figur 46 Målt temperatur(Measured) i herdekasse, omliggende temperatur og Adiabatisk temperatur .....	48
Figur 47 Utviklet varme (Isothermic) og stigningstallet til kurven (dQ/dm) plottet mot modenheten til betongen. ....	49
Figur 48 Målt temperatur(Measured) i herdekasse, omliggende temperatur(Ambient) og Adiabatisk temperatur(Adiabatic).....	49
Figur 49 Utviklet varme(Isothermic) og stigningstallet til kurven(dQ/dm) plottet mot modenheten til betongen .....	50
Figur 50 Målt temperatur(Measured) i herdekasse, omliggende temperatur(Ambient) og Adiabatisk temperatur(Adiabatic).....	50
Figur 51 Utviklet varme (Isothermic) og stigningstallet til kurven (dQ/dm) plottet mot modenheten til betongen. ....	51
Figur 52 Målt temperatur(Measured) i herdekasse, omliggende temperatur(Ambient) og Adiabatisk temperatur(Adiabatic).....	51
Figur 53 Illustrasjonsbilde fra ConTeSt Pro 2008 [34].....	58
Figur 54 Illustrasjon av område for beregning av varme [34].....	59
Figur 55 Illustrasjon av rissdannelse normalt på z-retning [34].....	59
Figur 56 Eksempel med isotherm varmeutvikling for betong(CEM II/AV) og beste tilnærming av de to modellene, samt diskrete data [12] .....	60
Figur 57 Illustrasjon av vegg for analyse .....	62
Figur 58 Illustrasjon av takplate .....	63
Figur 59 Illustrasjon av temperaturtilstand 36 timer etter støp.....	64
Figur 60 Illustrasjonsbilde over punkter for temperaturberegning.....	65
Figur 61 Temperaturutvikling i vegg for Resept 1.....	66
Figur 62 Temperaturutvikling i vegg for Resept 5.....	66
Figur 63 Temperaturutvikling i vegg for Resept 3.....	67
Figur 64 Temperaturutvikling i vegg for Resept 2.....	67
Figur 65 Temperaturutvikling i vegg for Resept 4.....	68
Figur 66 Temperaturutvikling i vegg for Resept 6.....	68
Figur 67 Temperaturutvikling i vegg for Resept 7.....	69
Figur 68 Illustrasjonsbilde av plassering av punkter for kartlegging av rissindeks .....	70
Figur 69 Rissindeks i vegg for Resept 1 .....	71
Figur 70 Rissindeks i vegg for Resept 5 .....	71
Figur 71 Rissindeks i vegg for Resept 3 .....	72
Figur 72 Rissindeks i vegg for Resept 2 .....	72
Figur 73 Rissindeks i vegg for Resept 4 .....	73
Figur 74 Rissindeks i vegg for Resept 6 .....	73
Figur 75 Rissindeks i vegg for Resept 7 .....	74
Figur 76 Illustrasjonsbilde av temperaturtilstand ved skjøt vegg - takplate, 36 timer etter støp .....	75
Figur 77 Illustrasjon av plassering av punkter for temperaturforløp.....	76



Figur 78 Temperaturutvikling i takplate for Resept 1 .....	77
Figur 79 Temperaturutvikling i takplate for Resept 5 .....	77
Figur 80 Illustrasjonsfigur for plassering av punkter for kartlegging av rissindeks.....	78
Figur 81 Rissindeks i takplate for Resept 1 .....	79
Figur 82 Rissindeks i takplate for Resept 5 .....	79



## Tabeller

Tabell 1 Oversikt over reseptene støpt i laboratoriet.....	28
Tabell 2 Trykkfasthet Resept 1 .....	33
Tabell 3 Trykkfasthet Resept 5 .....	34
Tabell 4 Trykkfasthet Resept 3 .....	35
Tabell 5 Trykkfasthet Resept 2 .....	36
Tabell 6 Trykkfasthet Resept 4 .....	37
Tabell 7 Trykkfasthet Resept 6 .....	38
Tabell 8 Trykkfasthet Resept 7 .....	39
Tabell 9 Parameterne for aktiviseringsenergi iterert fram ved hjelp av Excel.....	40
Tabell 10 Parameterne for egenskapsfunksjonen iterert fram ved hjelp av Excel .....	41
Tabell 11 Nøkkeltall fra herdekassene .....	53
Tabell 12 Varmemengde og parametere til varmefunksjonen, se Ligning 2.7 .....	54
Tabell 13 Maksimumstemperatur i betongene fra herdekasseforsøk .....	55
Tabell 14 Beskrivelse av betongresepter .....	64
Tabell 15 Oppsummering av maksimums rissindeks i veggen.....	74
Tabell 16 Oppsummering av maksimums rissindeks i takplata .....	80



# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Begrepet «Herdeteknologi» ble introdusert av Freiesleben-Hansen og Pedersen i Danmark på slutten av 70-tallet. De utviklet modeller som beskrev sammenhengen mellom varme og fasthetsutviklingen som en funksjon av temperatur og tid. Disse modellene ble kombinert med beregningsverktøy for å estimere temperaturutviklingen i betongkonstruksjoner gjennom herdefasen [1]. Dette er viktig for å beregne risikoen for rissutviklingen som følge av temperaturgradienter.

Betong med flygeaske har ofte gode egenskaper med hensyn på fastholdningsriss. Grunnen til dette er at flygeaske bidrar til at varmeutviklingen i betong fordeles over et lengre tidsrom. Ulempen er at dette påvirker styrkeutviklingen til å gå langsommere i starten, som igjen kan føre til dårligere framdrift for et bygg- og anleggsprosjekt. Derved er det ønskelig å undersøke om forskjellige mengder herdingsakselerator(HA) og en kombinasjon av HA og størkningsakselerator(SA) kan reversere den langsomme styrkeutviklingen som oppstår.

Massive betongtverrsnitt oppnår ofte en høy temperatur under herding. Den ferske betongen utvider seg i takt med varmen. Når tverrsnittet avkjøles og trekker seg sammen oppstår problemer i form av strekkspenninger. Fersk betong har ofte lav styrke som fører til fare for opprissing. Fordelen med lavvarmebetong er at maksimumstemperaturen blir lavere, og dermed utvider den seg ikke like mye. Hvis en lavvarmebetong kan utvikle lite varme samtidig som den har relativt rask styrkeutvikling, vil denne være meget godt egnet i massive betongtverrsnitt. Betongen vil ikke utvide seg mye, siden varmeutviklingen går saktere. Når den ikke utvider seg vil den heller ikke ha behov for å trekke seg like mye sammen under avkjøling. Som en følge av dette vil det oppstå lav strekkspenning. Om betongen i tillegg har oppnådd relativt høy fasthet på kort tid vil dette gjøre fare for opprissing enda mindre. Herde- og størkningsakselerator skal ha en effekt på tidlig fasthetsutvikling i betong.

## 1.2 Hensikt

Hensikten med oppgaven er å undersøke hvordan herdingsakseleratoren Mapefast HA, alene og i kombinasjon med SA, påvirker parameterne aktiveringsenergi, trykkfasthetsutvikling og herdevarme. Det er svært gunstig om HA og SA kan gi raskere fasthetsutvikling uten å øke temperaturen i betongen.

Det er gjennomført et laboratorieprogram på lavvarmebetong hvor andelen av flygeaske, HA og SA varierer for å kartlegge egenskapene til Mapefast HA.

Beregninger av rissutvikling i massive tverrsnitt, med betongene vi har testet, gjennomføres ved hjelp av programvare basert på herdeteknologi og elementmetode. For å gjennomføre analyse og beregning trenger man kunnskap om betongens egenskaper, som for eksempel aktiveringsenergi, styrke- og varmeutvikling.

Videre skal det gjennomføres et casestudie av den nye jernbanekulverten som bygges under taksebanen og de nye flyoppstillingsplassene på Værnes. Kulverten har noen problematiske betongtverrsnitt med tanke på opprissing. Her ville det vært fordelaktig med lav varme og tidlig styrkeutvikling. Disse er ideelle for å se om HA og SA kan virke positivt eller negativt på lavvarmebetonger. Her skal betongreseptene som ble studert under laboratoriestudiet evalueres ved hjelp av dataverktøy. Det skal også gis anbefalinger på bruk av HA og eventuelt en kombinasjon av HA og SA.

Sementen som er benyttet i alle betongene er Norcem Anlegg FA med et innhold av 19 % flygeaske.

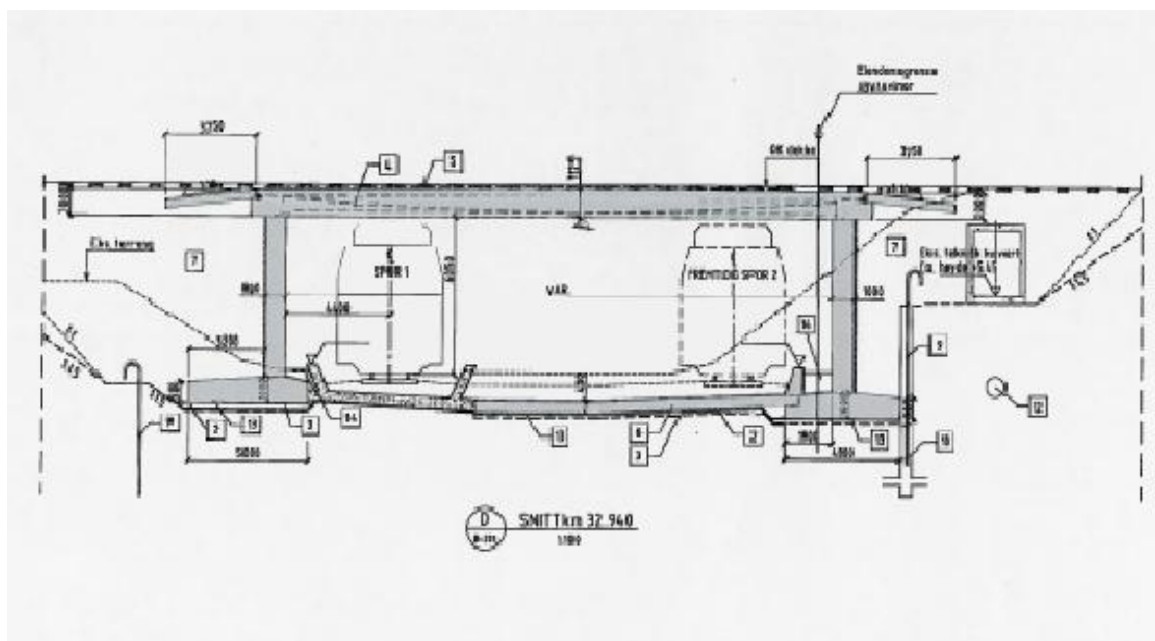
### 1.3 Casestudie av kulvert under Værnes lufthavn

I forbindelse med at det skal bygges nye flyoppstillingsplasser på Værnes lufthavn, er man nødt til å forlenge kulverten under flystripa. Nordlandsbanen går i dag med ett jernbanespor her, se Figur 1, men Avinor og Jernbaneverket ønsker at forlengelsen skal ha kapasitet for to spor. Skanska Norge AS er hovedentreprenør. Tiltakshaver er Avinor AS Hovedkontor og byggestart for prosjektet var i november 2011.



**Figur 1** Påbegynte anleggsarbeider, eksisterende kulvert over sporet

Deler av konstruksjonen består av massive betongtverrsnitt, hvor det er fare for opprissing grunnet høye temperaturgradienter. I Figur 2 vises en skisse over den nye kulverten hvor enkelte tverrsnitt er opptil 1 meter tykke. Overgang mellom fundament og vegger, samt overgang mellom vegger og takplate er veldig aktuell for rissrisiko-beregninger. Takplaten har et spenn på 24 meter og skal kunne tåle vekten av parkerte fly. I selve kulverten er det tilrettelagt for to spor, selv om Nordlandsbanen kun har ett spor i dag.



Figur 2 Planlagt forlengelsen av kulvert under Værnes Lufthavn, tverrsnitt [2]

### 1.4 Rissanalyse og lavvarmebetong i dag

I Norge har bruken av analyse rundt rissdannelse forårsaket av temperatur- og spenningstilstand fått liten oppmerksomhet fram til nyere tid. Statens Vegvesen har vært en pådriver på dette området grunnet de enorme utgiftene knyttet til vedlikehold rundt riss. Ved gradvis høyere krav og oppfordringer har Statens Vegvesen bidratt til at rissproblematikk har fått stadig større fokus.

Senketunnelen i Bjørvika i 2011, se Figur 3, var en milepel og satte standarden rundt prosjektering av vanntette og estetiske betongkonstruksjoner.

Dessuten innebærer bruken av lavvarmebetong et stort miljøpotensial ved at det vil redusere CO<sub>2</sub> utslippene i sementproduksjon betraktelig. I dag representerer sementproduksjon så mye som 4-5 % av de globale CO<sub>2</sub> utslippene. Lavvarmebetong omtales ofte som lavkarbonbetong.



Figur 3 Illustrasjon fra byggingen av senketunnelen i Bjørvika



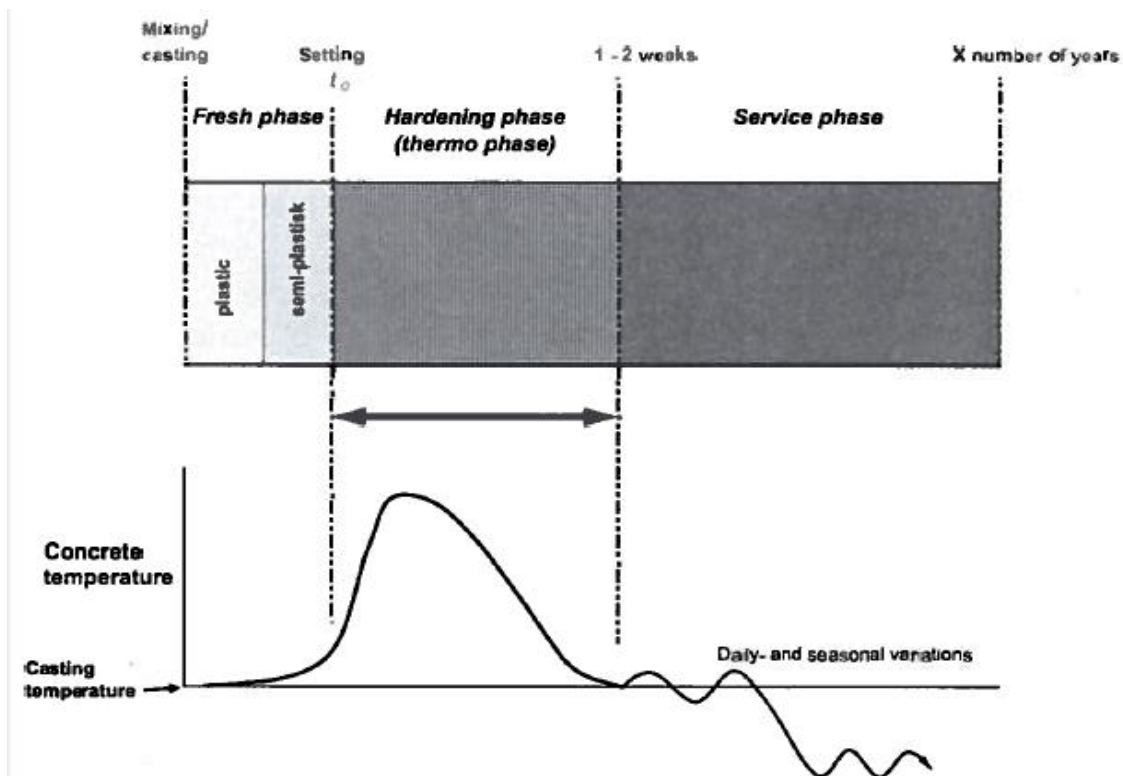
## 2 Teori

### 2.1 Formål

Formålet med dette kapitlet er å gi en helhetlig forståelse og forklaring for de mest sentrale begrepene brukt i rapporten. Samt å belyse mekanismer som påvirker betongens egenskaper og rissutvikling.

## 2.2 Herdeteknologi og betongens ulike faser

Gjennom reaksjonsprosessene mellom sement og vann utvikles det betydelige mengder varme. Disse reaksjonen bidrar også til å utvikle styrke, denne fasen omtales som herdefasen. I større betongtverrsnitt fører dette til høy temperaturøkning. Herding av betong er veldig temperaturavhengig. Høy temperatur resulterer i rask herding. Rask herding har både fordeler og ulemper. I Figur 4 vises en oversikt over betongens faser og temperaturutvikling.



Figur 4 Betongens faser og temperatur over tid [3]

Den ferske fasen har en varighet fra blanding til avbindingstiden,  $t_0$ , og kan videre deles inn i en plastisk og en halv-plastisk fase. Det tidspunktet man først klarer å måle betongens mekaniske egenskaper,  $t_0$ , kalles avbindingstid. Dette tidspunktet avhenger av flere faktorer, som temperatur, bindemiddel, tilsetningsstoffer og varierer fra 6- til 12 timer etter støping.

Herdefasen starter når betongen har størknet og generering av betydelige varmemengder begynner. Det er i denne fasen betongen utvikler de fleste av sine permanente egenskaper. I massive konstruksjoner kan temperaturen øke med 40 °C eller mer. Maksimum betongtemperatur inntreffer ofte etter 1-2 dager. Etter dette er varmetapet til omgivelsene dominerende og avkjøler betongen. Avkjølingsfasen finner sted helt til betongtemperaturen er i likevekt med omgivelsene, dette tar vanligvis 1-2 uker avhengig av betongkonstruksjonen og omgivelsene. I massive betongtverrsnitt, som for eksempel damkonstruksjoner, kan det ta flere måneder før betongen er fullstendig avkjølt.

Bruksfasen er fasen hvor betongen er i termisk likevekt med omgivelsene og blir utsatt for vær og laster. [3] Herdefasen og bruksfasen regnes som stiv fase.

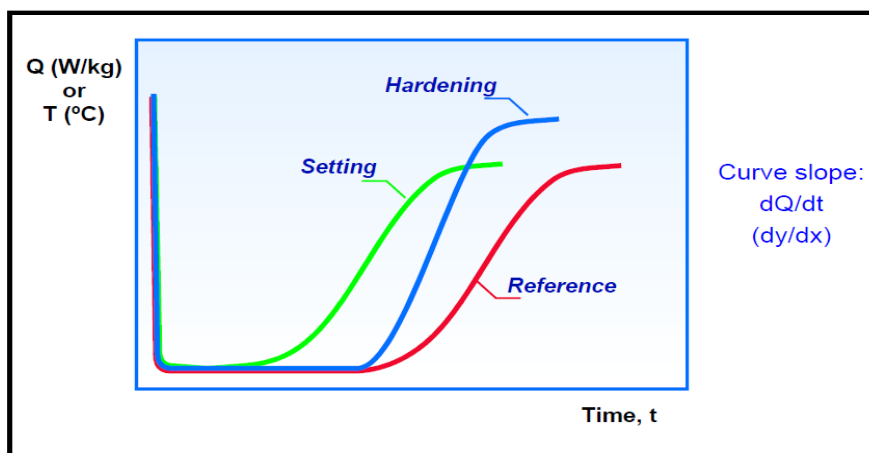
## 2.3 Herde- og størkningsakseleratorer

Graden av de kjemiske reaksjonene i herdefasen kan bli forandret ved å tilsette kjemiske substanser i betongen. Tilsetningsstoffene kan resultere i økning av herdingsgrad, fremskynde størkningstidspunktet eller øke virkningsgraden av andre kjemiske tilsetningsstoffer [4]. Det finnes i dag et begrenset utvalg akseleratorer for disse formål.

Akseleratorer er hovedsakelig klassifisert ved bruksområde; herding og størkning. Standarden «EN 934-2:2001 *Admixtures for concrete, mortar and grout – Part 2: Concrete*» gir i korte trekk definisjon av gruppene [5]:

- Herdingsakseleratorer(HA)  
*Tilsetningsstoff som øker graden av tidlig styrkeutvikling i betongen, som i tillegg kan påvirke størkningstid.*
- Størkningsakseleratorer(SA)  
*Tilsetningsstoff som fremskyver tidspunktet for forandring mellom plastisk og stiv fase for betong.*

Størkning blir som regel fastsatt ved det tidspunktet betongens mekaniske egenskaper motstår penetrering av et nål-instrument, Vicat apparat, med en gitt last. I Figur 5 illustreres effekten av størknings- og herdingsakselerator. Den røde kurven viser varmeforløpet til referansebetongen. Som vist i figuren tar det noe tid før varmeutviklingen starter. Betongen med størkningsakselerator, anvist som grønn kurve, viser et helt parallelt varmeforløp. Men varmeutviklingen starter på et tidligere tidspunkt, noe som illustrerer effekten av størkningsakselerator. Den blå kurven viser varmeutviklingen ved bruk av herdingsakselerator. Størkningstidspunktet er det samme som referansebetongen, men økningen i varmeutviklingen er høyere ved at kurveforløpet er brattere. Siden kurven har raskere stigning betyr dette at herdingen går raskere og at betongen får en hurtigere styrkeutvikling enn referansebetongen [4].



Figur 5 Akseleratorer og grad av varmeutvikling [6].

Ifølge Popovics [7] kan følgende fordeler oppnås ved å styre herde- og størkningsprosessen i betongproduksjon:

#### Framskyve størkningstidspunkt

- Tidligere behandling av overflater
- Tidligere igangsetting av videre arbeider som avhenger av faste betongoverflater
- Reduksjon av hydrostatisk trykk i forskaling, spesielt med tanke på plasstøpte vegger
- Mindre lekkasjer i forskaling grunnet hydrostatisk trykk.

#### Akselerere herdeprosessen

- Tidligere rivning av forskaling og kortere støpningscykluser
- Raskere fremdrift på byggeplass gir økonomisk- og tidsmessig gevinst
- Kompensasjon for bruken av lavvarmebetong.

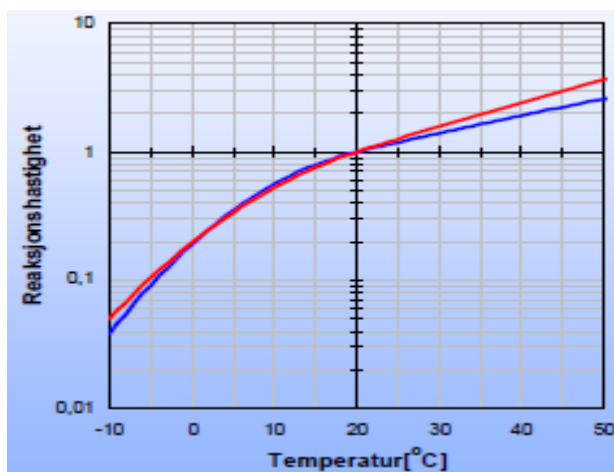
Det er et stort problem at kloridioner forårsaker korrosjon av armeringsstål i betong. På grunn av dette har det blitt utviklet flere ikke-kloridbaserte herdingsakseleratorer. De mest vanlige akseleratorene innenfor denne gruppen er kalsium format, tri- og dietanolamin. De kalsiumbaserte akselererer hydratiseringen av  $C_3S$  fasen av sementen. Di- og Trietanolamin har en akselererende effekt av spesielt  $C_3A$  og  $C_2S$  fasene og kan benyttes til å påvirke størkning og herding [8]. De påvirker avbindingstidspunktet kraftig, noe som gjør dem lite egnet i en herdingsakselerator til prefabrikkerte betongelementer [9].

Den retarderende effekten til vannreducerende tilsetningsstoffer har vist seg å bli motvirket ved bruken av ikke-kloridbaserte akseleratorer [8].

## 2.4 Hastighetsfunksjon og aktiveringsenergi

### 2.4.1 Hastighetsfunksjonen

Som tidligere nevnt er reaksjonshastigheten veldig avhengig av temperaturen. Ikke bare avgjør temperaturen hvor tidlig herdefasen starter, men også i hvor stor grad sementen hydratiserer. Derved frigjøres energi i form av varme. Hastighetsfunksjonen  $H(\theta)$  angir reaksjonshastigheten ved en gitt temperatur,  $\theta$ , i forhold til referansetemperaturen på 20 °C, som illustrert i Figur 6



Figur 6 Reaksjonshastighet  $H(\theta)$  for en sement avhenger av temperatur [10]

Arrhenius ligning, se Ligning 2.1, beskriver sammenhengen mellom temperatur og den kjemiske aktiviteten til en termisk aktivert prosess [11]. På bakgrunn av denne er  $H(\theta)$  utformet, se Ligning 2.2.

$$k = Ae^{\frac{-E_a}{RT}}$$

Ligning 2.1

$k$  – rate konstanten [-]  
 $A$  – konsentrasjon [ $\text{mol dm}^{-3}$ ]  
 $T$  – temperatur [K]  
 $E_a$  – aktiveringsenergi [ $\text{J mol}^{-1}$ ]  
 $R$  – gasskonstanten [ $\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$ ]

$$H(\theta) = e^{\frac{E(\theta)}{R} \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{273 + \theta} \right)}$$

Ligning 2.2

$H(\theta)$  = hydratiseringsrate [-]  
 $E(\theta)$  = aktiveringsenergi [ $\text{kJ mol}^{-1}$ ]  
 $\theta$  = temperatur  
 $R$  = gasskonstanten, 8,314 [ $\text{J mol}^{-1} \text{C}^{-1}$ ]

### 2.4.2 Aktiveringsenergi

Aktiveringsenergien beskriver hvor mye energi som må til for å aktivere sementen ved en gitt temperatur. Freiesleben-Hansen og Pedersen har utviklet en modell for aktiveringsenergien, eller «temperatursensitiviteten», gitt i Ligning 2.3 og Ligning 2.4.

$$E(\theta) = A + B(20 - \theta) \quad \theta \leq 20 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Ligning 2.3}$$

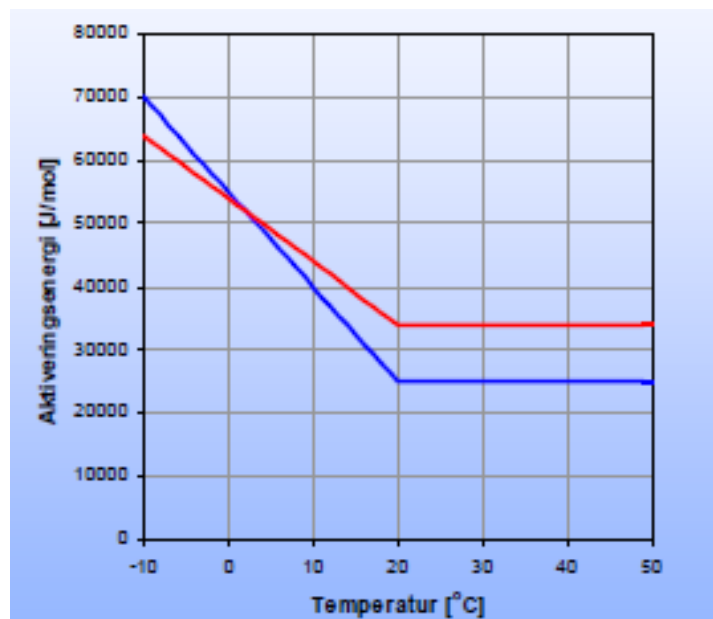
$$E(\theta) = A \quad \theta > 20 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Ligning 2.4}$$

$E(\theta)$  – aktiveringsenergi [ $\text{kJ mol}^{-1}$ ]

A – konstant, aktiveringsenergien over  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$  [ $\text{kJ mol}^{-1}$ ]

B – konstant, som avgjør aktiveringsenergien stigningstall under  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$  [ $\text{kJ mol}^{-1}$ ]

Aktiveringsenergien er en funksjon av temperaturen. Dette er som sagt en modell og en ganske grov tilpasning til virkeligheten, men gir likevel akseptable verdier til praktisk bruk [1]. Figur 7 viser hvordan betongens aktiveringsenergi er i forholdt til temperatur. Det at aktiveringsenergien øker lineært fører til at reaksjonshastigheten faller raskere ved fallende temperatur under  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ , som vist i Figur 6.



Figur 7 Modell for aktiveringsenergi [10]

## 2.5 Modenhetsprinsippet

Fra hastighetsfunksjonen,  $H(\theta)$ , er det mulig å beregne modenheten ved forskjellige temperaturhistorier. Det er ønskelig å kunne fastslå utviklingen til en gitt betong ved kun å kartlegge temperaturutviklingen. Dette gjøres ved å beregne betongens ekvivalente alder ved 20 °C, for så å beregne nødvendig hydratiseringstid ved annen temperatur for å oppnå tilsvarende hydratiseringsgrad, også omtalt som modenhetsprinsippet. For eksempel er hastighetsfunksjonen lik 2 for en betong ved 40 °C, da vil betongen ha en modenhet på 20 timer etter 10 klokketimer. En tilsvarende betong som holder 20 °C må altså herde i 20 timer for å oppnå en lik hydratiseringsgrad, siden en betong som ved 20 °C har en hastighetsfunksjon lik 1. To identiske betonger har lik modenhet når fastheten er lik. Modenhet er integralet av hastighetsfunksjonen fra  $t_0$  til  $t$ , se Ligning 2.5. [1]

$$M = \int_{t_0}^t H(\theta) dt, \quad \theta = \theta(t) \quad \text{Ligning 2.5}$$

M - modenhet

t - sluttid

$t_0$  - tid når vann tilsettes sementen

$\theta$  – temperatur

For å beregne riktig modenhet må temperaturen logges underveis, vanligvis kan man ikke regne seg fram denne. Den numeriske beregningen av modenhet, M, er utført ved å dele temperaturhistorien inn i n tidsintervaller med lengde  $\Delta t$ . Videre beregnes hastighetsfunksjonen for hvert enkelt tidsintervall. Dette gjør at den endelige modenheten er summen av hastighetsfunksjonen i alle tidsintervallene, se Ligning 2.6.

$$M = \sum_{i=1}^{i=n} H(\theta) \Delta t \quad \text{Ligning 2.6}$$

$\Delta t$  – tidsintervall

n – antall tidsintervall

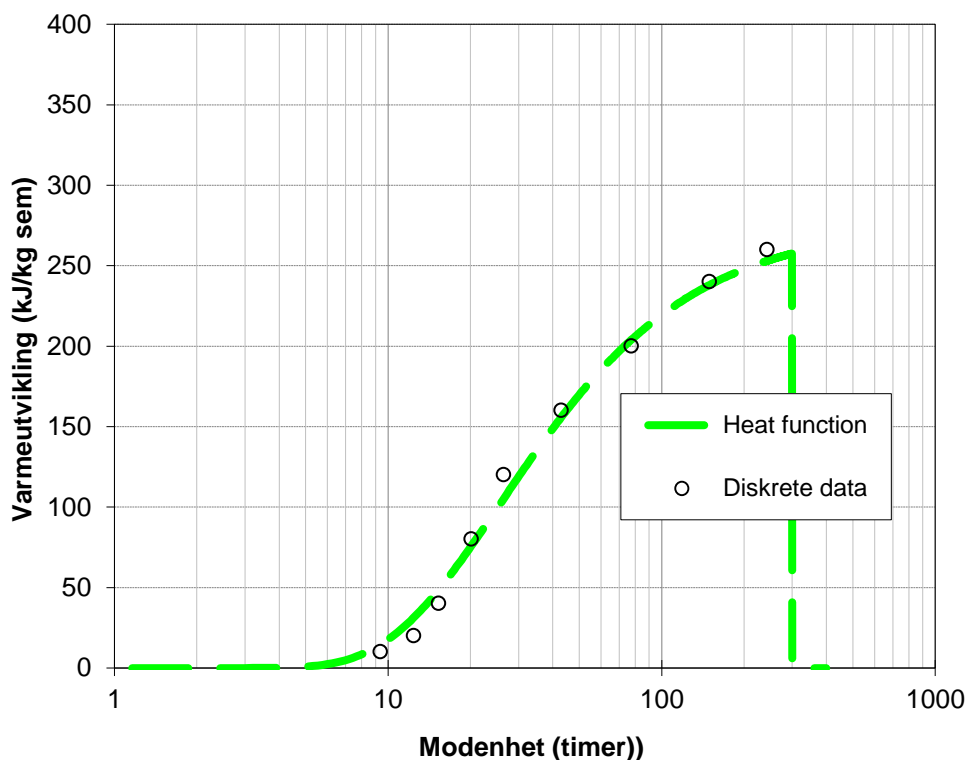
Både styrke- og varmeutvikling kan tilnærmet beskrives ut fra betongens modenhetsfunksjon i tidlig alder. Dette gjøres ved å benytte egenskapsfunksjonen.

## 2.6 Varmeutvikling, volumendring og spenningsoppbygging i ung betong

### 2.6.1 Varmeutvikling

Funksjonene som beskriver egenskapsutviklingen i betong kan brukes med høy nøyaktighet i første del av herdehistorien, cirka 100 modenhetstimer. Etter denne perioden er ikke påliteligheten til modenhetsprinsippet god nok. Dette gjelder spesielt for betong som har herdet under temperatur i mellom 30-70 °C.

Ligning 2.7 som kalles den danske/norske modellen, beskriver varmeutviklingen med samme type funksjon som for utvikling av styrke i avsnitt 2.9. Denne formfunksjonen, se Figur 8, er bygd opp ved empiriske data av tradisjonell betong uten flygeaske. Denne type betong har en mer s-formet egenskapsfunksjon enn betong med pozzolaner [12].



Figur 8 Empirisk varmefunksjon

$$Q(M) = Q_{\infty} \cdot e^{-\left(\frac{\tau_e}{M}\right)^{\alpha}}$$

Ligning 2.7

$Q_{\infty}$  - total varmeutvikling [ $\text{kJ kg}^{-1}$  sement]

$\tau_e$  - retardasjonsparameter [t]

$\alpha$  – kurvatur parameter

I Sverige har det vært tradisjon for å benytte en annen funksjon for varmeutvikling, se Ligning 2.8. Det er ingen betydelig forskjell mellom disse tilnærmingene.



$$Q(t_{eq}) = W_{\infty} \cdot \exp^{(-\epsilon_1 \cdot \ln(1 + \frac{t_{eq}}{t_1}))^{-K_1}}$$

**Ligning 2.8**

$Q(t_{eq})$  - Varmeutvikling [J/kg] som en funksjon av modenhet

$t_{eq}$  - Modenhet [h]

$W_{00}$  - Endelig varmeutvikling etter «uendelig tid» [J/kg]

$t_1$  - kurvetilpassingsparameter [h]

$\epsilon_1$  – kurvetilpassingsparameter [-]

$K_1$  - kurvetilpassingsparameter [-]

Den kjemiske reaksjonen mellom sement og vann er en eksoterm<sup>1</sup> prosess. En vanlig Portland sement utvikler 400-500 kJ/kg varme ved full hydratisering. I realiteten vil sementen i betong aldri nå en hydratiseringsgrad på 100 %. Graden av hydratisering er avhengig av mange faktorer som blant annet klinkersammensetningen, finheten (blaine) og betongens w/c-tall. I tillegg spiller herdeforholdene som temperatur, fuktighet og tid en viktig rolle.

Temperaturutvikling i betong, under adiabatisk<sup>2</sup> forhold, kan beskrives som i Ligning 2.9. [1]

$$\Delta\theta = \frac{Q_{\infty} C}{\rho_r C_b}$$

**Ligning 2.9**

$\Delta\theta$  – varmeøkning [°C]

$Q_{\infty}$  – varmemengde per enhet sement [kJ kg<sup>-1</sup>]

$C$  – sementmengde [kg m<sup>-3</sup>]

$C_b$  – betongen spesifikke varmekapasitet [kJ kg<sup>-1</sup> °C]

$\rho_r$  – betongens tetthet [kg m<sup>-3</sup>]

Det vil si at all varmen fra sementhydratiseringen går med til å varme opp betongen. I praksis vil man aldri oppnå adiabatisk forhold. En stor del av varme vil gå tapt til omgivelsene, noe som gjør den reelle varmeøkningen i betong langt lavere. Nedenfor følger et talleksempel for temperaturøkning i betong under adiabatisk forhold:

#### Eksempel på temperaturøkning

Varmemengde per enhet sement – 260 [kJ kg<sup>-1</sup>]

Sementmengde – 380 [kg m<sup>-3</sup>]

Betongens spesifikke varmekapasitet – 1,04 [kJ kg<sup>-1</sup> °C]

Betongens densitet – 2400 [kg m<sup>-3</sup>]

$$\Delta\theta = \frac{260 \cdot 380}{2400 \cdot 1,04} = 39,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

<sup>1</sup> Varmegivende reaksjon

<sup>2</sup> Ingen varmeutveksling med omgivelsene

## 2.6.2 Volumendring

Volumendring i ung betong domineres av tre typer deformasjon: termisk utvidelse, uttørkingssvinn og autogent svinn. Uttørkingssvinn oppstår på grunn av fordampning av fukt fra betongen til omgivelsene og kan elimineres ved massive tverrsnitt i ung betong. Derved uttrykkes volumendring i betong som i Ligning 2.10, ifølge Ji [13].

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{td} + \varepsilon_{ad} \quad \text{Ligning 2.10}$$

$\varepsilon_{tot}$  – total deformasjon [-]

$\varepsilon_{td}$  – termisk utvidelse [-]

$\varepsilon_{ad}$  – autogen deformasjon [-]

### 2.6.2.1 Termisk utvidelse

Temperaturendringer i betong fører til tøyninger, også kalt termisk utvidelse  $\varepsilon_{td}$ . Denne utvidelsen er en konsekvens av at sementen reagerer med vann og utvikler varme, som omtalt i avsnitt 2.6.1. Tøyningene som oppstår er proporsjonale med temperaturutvidelseskoeffisienten til betong, se Ligning 2.11.

$$\varepsilon_{td} = \Delta\theta \cdot \alpha_{\theta} \quad \text{Ligning 2.11}$$

$\alpha_{\theta}$  – temperaturutvidelseskoeffisient [-]

$\Delta\theta$  – temperaturendring [-]

Temperaturutvidelseskoeffisienten utvikles over tid, og vil forandre seg gjennom betongens livsløp. Den varierer fra betong til betong og er blant annet avhengig av tilslag, fukt og matriksinnhold. [13].

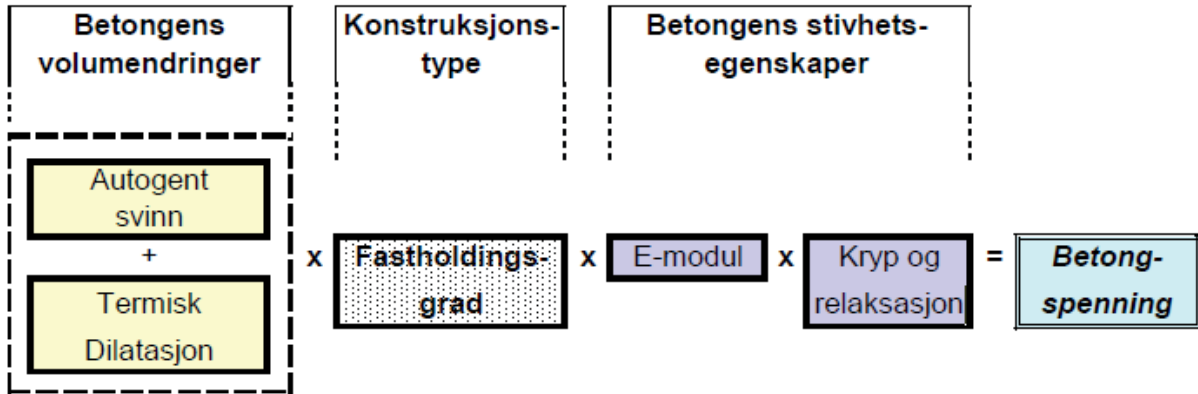
### 2.6.2.2 Autogen deformasjon

Autogen deformasjon er en konsekvens av kjemisk svinn. Kjemisk svinn er når produktet av hydratiseringen har mindre volum enn reaktantene (sement og vann). Kjemisk svinn starter når sement blir tilsatt vann og varer så lenge sementen reagerer. Det nye volumet vil være ca. 8 % mindre ved full hydratisering. Volumreduksjonen fører til «self-desiccation», altså selvuttørking. Selvuttørkingen skaper kapillærkrefter og et undertrykk i porevannet som resulterer i ekstern kontraksjon av betongen, dette er autogen deformasjon.

Kjemisk svinn -> selvuttørking -> autogen deformasjon.

### 2.6.3 Spenningsoppbygging

Termisk utvidelse og autogen deformasjon er drivkreftene bak spenningsoppbyggingen, mens de andre parameterne forenklet sett kan kalles «respons». Diagrammet i Figur 9 viser alle parametere involvert.



Figur 9 Spenningsoppbygging i herdefasen [3]

Betongens E-modul avgjør hvor stor spenningen blir for en gitt tøyning. Krypegenskapene avgjør betongens egenskaper til å redusere spenning over tid. En myk betong, altså lav E-modul, og høy krypkapasitet er derfor ønskelig for å redusere spenningen. [3]

## 2.7 Pozzolaner

### 2.7.1 Pozzolaner og pozzolanreaksjoner

I tillegg til Portland sementklinker benyttes det i stor grad aktive mineraler i betongsammensetning. Disse kan ha hydratiseringsegenskaper i seg selv, men inngår vanligvis i kjemiske reaksjoner med kalsiumhydroksid,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Kalsiumhydroksid er et biprodukt av klinkermel og vann. Materialer som har denne egenskapen, kalles pozzolaner, og reaksjonen betegnes pozzolanreaksjon [14]. Pozzolaner kan virke på tre måter; alene med vann, sammen med Portland sement eller med biproduktene fra hydratiseringsprosessen [15].

Denne rapporten vil i all hovedsak belyse de pozzolanene som er av relevans for lavvarmebetong:

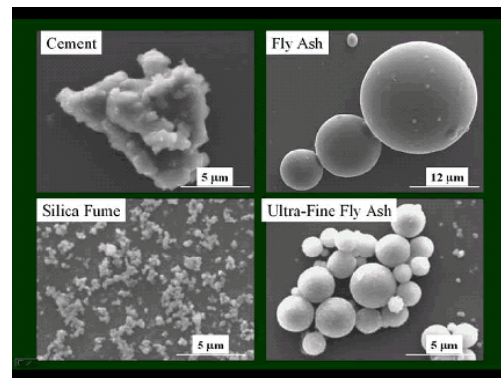
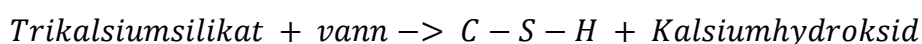
- Silikastøv (SF)
- Flygeaske (FA)

I tillegg til flygeaske og silikastøv er slagg det pozzolanenet som benyttes mest i Norge. Alle tre tilsetningene er industrielle biprodukter og vil ved bruk i betong redusere behovet for klinkermel i Portland sement. Dette er fordelaktig av økonomisk og miljømessig hensyn, grunnet de enorme  $\text{CO}_2$  utslippene som forekommer ved produksjon av Portland sement.

Pozzolanreaksjoner er generelt mer sensitive til temperatur enn hydratisering av sement.

Egenskapsutvikling fra reaksjonene er økende ved stigende temperatur [15]. For at reaksjonene skal kunne starte må det være tilgjengelig fuktighet og temperatur over  $5^\circ\text{C}$ . I tillegg må pH være minst 13,2. Økning av alkalitet i porevannet krever at en bestemt andel hydratisering av sement har foregått. Når pH har steget til 13,2, begynner reaktantene til pozzolanreaksjonene å dannes på overflaten og rundt pozzolanene. Etter en tid vil flere pozzolanprodukter diffusere bort i kapillærporesystemet. Dette fører til en reduksjon av den kapillære porøsiteten som leder til finere porestruktur [16].

Pozzolaner er silika- og aluminainnholdige materialer som i seg selv ikke har binderegenskaper. Under kan man se reaksjonsligninger fra hydratisering av sement og pozzolanreaksjonen, Ligning 2.12 og Ligning 2.13: [17]



Figur 10 Illustrasjoner av pozzolaner [40]

### 2.7.2 Silikastøv

Silikastøv, illustrert i Figur 11, er et biprodukt ved produksjonen av silisium metall og ferrosilium legeringer. I betongsammenheng har silikastøv bruksområde som pozzolan og filler<sup>3</sup>. SiO<sub>2</sub>, som er hovedandelen i silikastøv, utgjør omlag 85-98 % og har en sfærisk eller ukarakteristisk form med partikkel størrelse fra 0,1 til 0,2 µm. Den store overflaten, omlag 20 m<sup>2</sup>/g, gjør silikastøv svært reaktiv i kontakt med biprodukter fra kalsiumhydroksid fra sement, som forårsaker en ytterligere produksjon av bindemiddelet kalsium- silikat- hydrat(C-S-H). [15]



Figur 11 Silikastøv [39]

På grunn av den lille partikkelfraksjonen er også silikastøv godt egnet som filler og vil endre den ferske betongens egenskaper. Silikastøvet vil binde store mengder vann og medføre at den ferske betongen blir seigere, samt at den indre kohesjonen<sup>4</sup> øker [14]. Generelt blir graden av separasjon redusert i betong. Dette er et forhold som må tas hensyn til for å unngå plastisk svinn og uttørking. Stabiliseringseffekten blir i stor grad benyttet i betong hvor høy slump er ønskelig, som for eksempel SKB<sup>5</sup> [15]. Ved kombinasjon av P/SP<sup>6</sup> + silikastøv vil betongen få høyere slump på grunn den lille overflaten og bidra til en kulelager-effekt. Den gunstige effekten utligner det faktum at silikastøv bidrar til større vannbehov. I tillegg vil kombinasjonen av P/SP + silikastøv redusere plastiserende stoffers retarderende effekt på betongen, ved at silikastøv beslaglegger en stor del av de plastiserende stoffene [14].

I forbindelse med styrkeutvikling vil silikastøv ha en positiv effekt ved dannelsen av ytterligere andel C-S-H og finfordele disse mer homogent i betongen. Kalsiumhydroksidet ligger som et svakt sjikt rundt armeringsjern, tilslagskorn og er oppløst i kapillærvannet. Ved reaksjon mellom silikastøv og kalsiumhydroksid vil de svake sjiktene bli sterkere og de største kapillærporene mindre. Andelen C-S-H og fastheten øker betraktelig. Vannbehovet bli redusert som igjen vil gi rom for ekstra styrkeutvikling [14].

Ved høye temperaturer opp mot 35 °C vil vann/semment-reaksjonene gå raskere. Tilgjengelig kalsiumhydroksid vil tidligere være tilstede for pozzolanreaksjonene. Ved bruk av silikastøv i betong har det vist seg at det utvikles mer varme enn ved kun bruk av sement. Total varmeutvikling blir større mens bidraget til maksimums temperatur blir lavere, dette siden reaksjonene ikke skjer samtidig. Denne effekten forsterkes ved lavere herdetemperaturer. Til og med ved herdetemperatur rundt 20 °C har dette vist seg å være gjeldene. Pozzolanreaksjonens temperaturavhengighet kan bli utnyttet i massive betongkonstruksjoner til å oppnå lavere temperaturer under selve herdingen. [14]

<sup>3</sup> Filler: Inaktiv reaktiv tilslag mindre enn 125µm med formbarhetsfremmende egenskaper

<sup>4</sup> Krefter mellom partikler i flytende tilstand

<sup>5</sup> SKB: Selvkomprimerende betong

<sup>6</sup> P/SP: Plastiserende/Superplastiserende tilsetningsstoff

### 2.7.3 Flygeaske

Flygeaske er et biprodukt fra kullkraftverk. I Europa benyttes flygeaske som et pozzolansk materiale i betongsammenheng. Bruken av flygeaske er fortsatt svært liten, noe som skyldes manglede standardisering av flygeaske som et materiale [18].

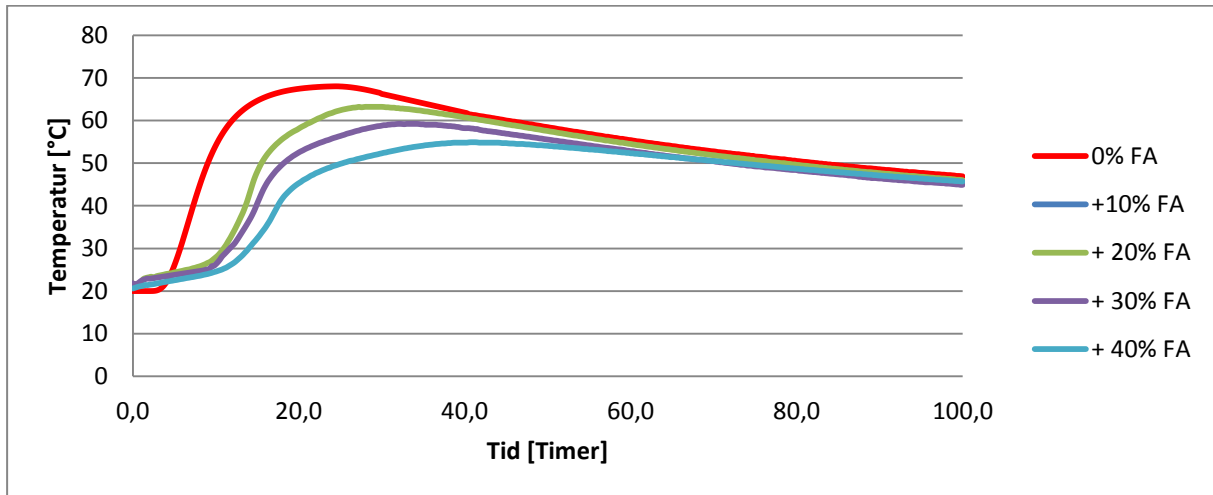
På lik linje med silikastøv er flygeaske sfærisk, men med en større partikkelfraksjon på 10- 20 $\mu$ m. SiO<sub>2</sub>, hovedandelen i flygeaske, utgjør om lag 50 %. Det er også en betydelig andel aluminat som vil bidra til å danne bindemiddelet, C-S-H. Siden hovedkomponentene er de samme i flygeaske og silikastøv, kan silikastøv bli benyttet som en modell til å forstå Det bidrar til noe forskjellig reaksjonsmønster. Dette vil føre til at flygeaske har en langsommere reaksjonstid enn silikastøv. Den viktigste egenskapen til flygeaske i betongsammenheng er den trege pozzolanske effekten, som gir utvikling av egenskaper over lengre tid [15]. Flygeaskebetong er dessuten godt egnet for å redusere risikoen for alkali- og silikareaksjoner [19].



Figur 12 Flygeaske [42]

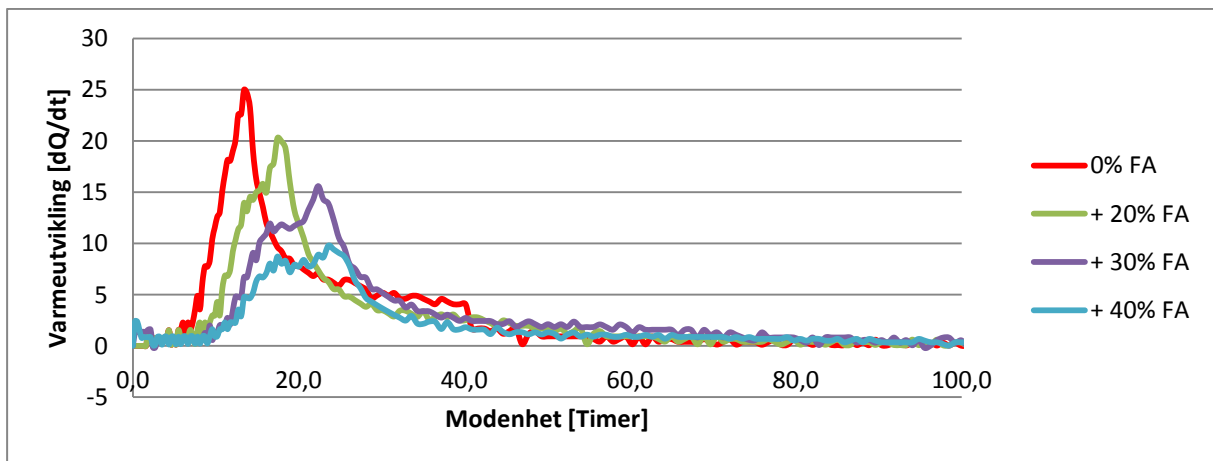
I en rapport av Metha [18] om styrkeutvikling i Portland sement med flygeaske, ble det konkludert med at kalsiuminnholdet og partikkelfraksjonen er de viktigste faktorene til flygeaske for ekstra styrkeutvikling i betong. I tillegg til å bidra med høyere langtids styrkeutvikling har flygeaske egenskaper som bidrar til økt bestandighet i betongkonstruksjoner. De pozzolanske reaksjonene som skjer i de svake sjiktene rundt armeringsjern, tilslagskorn og i porevannet bidrar til å danne finere porestruktur.

Effekten av flygeaske i betong illustreres i prinsippkissene til Figur 13, Figur 14 og Figur 15. I Figur 13 vises temperaturutviklingen for ulike prosentandeler flygeaske opp mot tid. Temperaturen i omgivelsene er konstant 38 °C og betongens starttemperatur er på 20 °C. Ved høyere andel flygeaske får temperaturforløpene tregere temperaturøkning og lavere maksimums temperatur [20]. Tallverdiene er hentet fra trender observert i laboratoriet og har utgangspunkt fra semi-adibatisk temperaturutvikling.



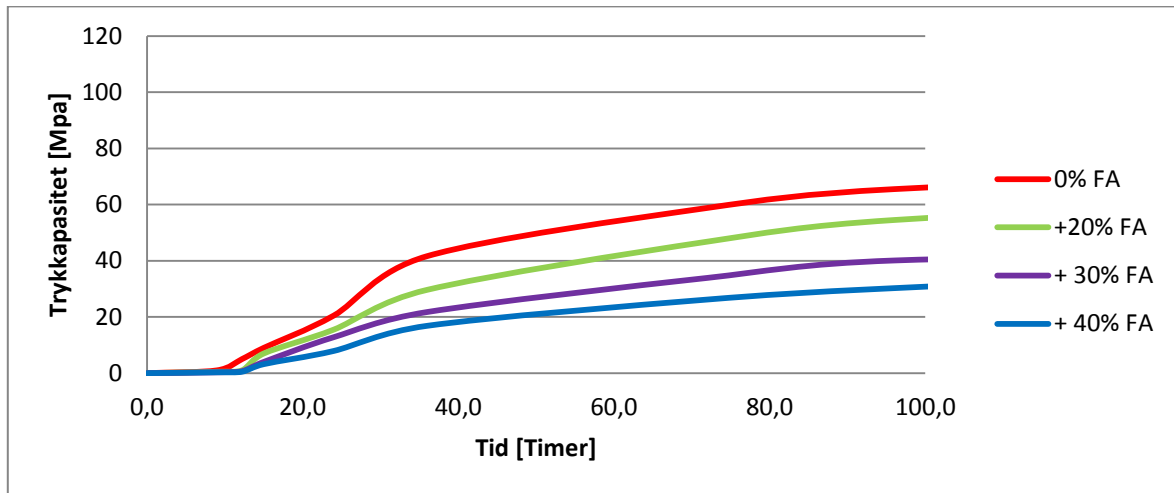
Figur 13 Prinsippkisse temperaturøkning ved ulike prosentandeler FA

I Figur 14 illustreres varmeutviklingen ved ulike prosentandeler flygeaske opp mot tid. Her vises en sammenheng med Figur 13 ved at økt mengde flygeaske gir lavere og tregere varmeutvikling. Tidspunktet for maksimal varmeutvikling forekommer også på et senere tidspunkt.



Figur 14 Prinsippkisse ved ulike prosentandeler FA ved isoterm varmeutvikling

Figur 15 illustrerer styrkeutvikling ved ulike prosentandeler flygeaske opp mot tid. Ved høyere mengder flygeaske går utviklingen av trykkfasthet langsommere.



Figur 15 Prinsippskisse styrkeutvikling ved ulike prosentandeler FA

#### 2.7.4 Flygeaskeinnhold i sement

I Norge benyttes to måter for å angi flygeaskeinnhold i sement. Statens vegvesen bruker følgende formel for å angi andel flygeaske(FA):

$$\text{Andel flygeaske} = \frac{\text{FA masse}}{\text{Sement masse}} \cdot 100 \% \quad \text{Ligning 2.14}$$

I litteraturen benyttes vanligvis følgende formel:

$$\text{Andel flygeaske} = \frac{\text{FA masse}}{\text{Sement masse} + \text{FA masse}} \cdot 100 \% \quad \text{Ligning 2.15}$$

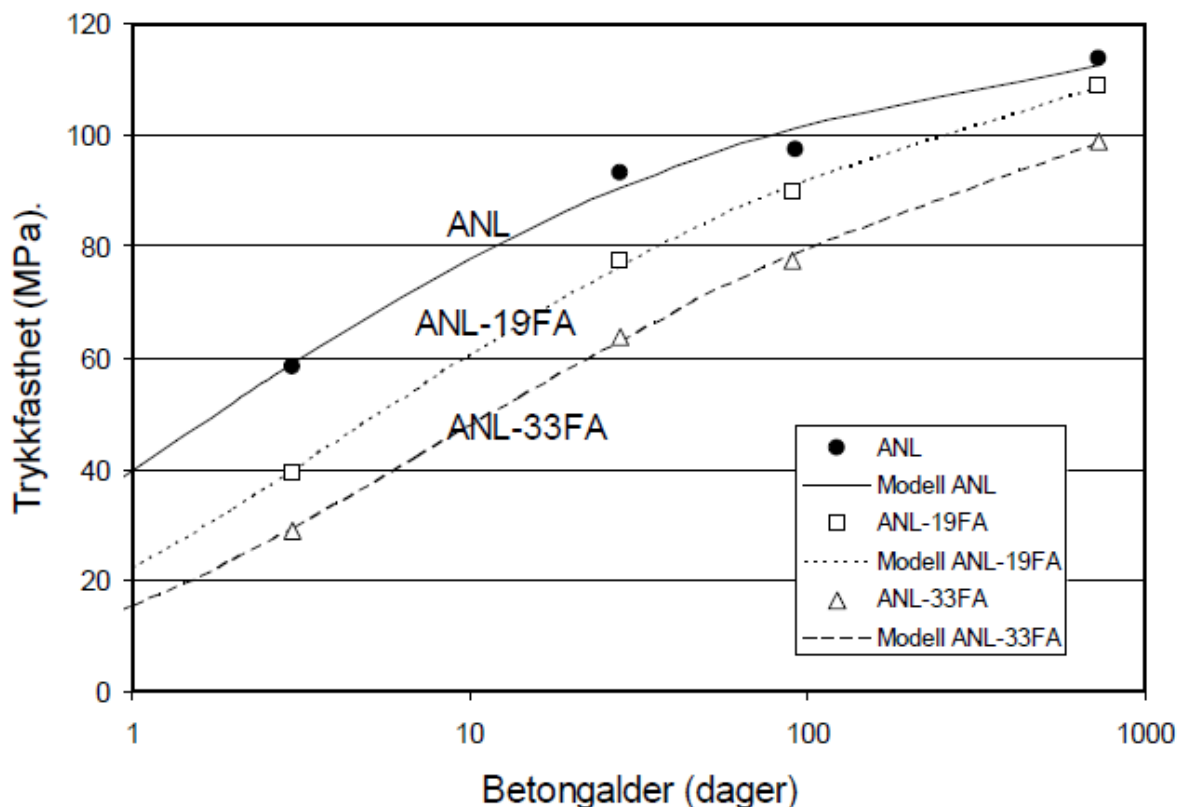
Ved å benytte Ligning 2.14 vil prosentandelen for flygeaskeinnhold i sement bli høyere enn ved Ligning 2.15. I denne oppgaven er det konsekvent brukt notasjon etter Ligning 2.15 med mindre noe annet er oppgitt, det vil altså si at Norcem Anlegg FA har 20 % flygeaske.



## 2.8 Lavvarmebetong

Ifølge Statens vegvesen er lavvarmebetong en betongtype hvor Portland sementen er kombinert med 30-65 % flygeaske og 4-8 % silikastøv (her er Statens vegvesen egen notasjon benyttet, se Ligning 2.14). Denne typen betong har betydelig mindre varmeutvikling enn betong hvor størsteparten av sementen er klinkermelet.

En sement hvor deler av klinkermelet er erstattet med flygeaske vil gi en mer miljøvennlig og mer økonomisk sement. Ulempen er først og fremst fasthetsutviklingen etter kort tid, slik som illustrert i Figur 16. [21]

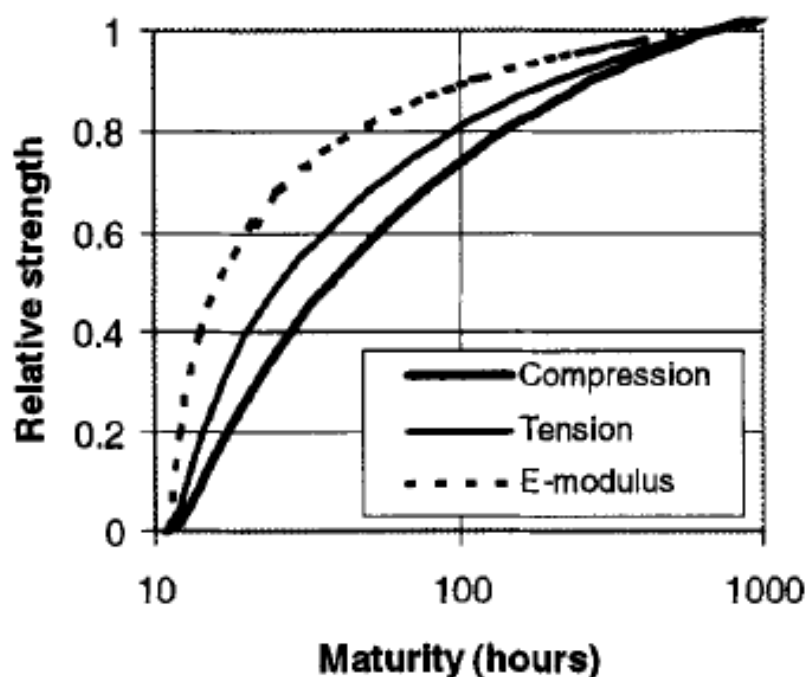


Figur 16 Styrkeutvikling lavvarmebetong [22]

I en studie av Atis [23] om styrkeutvikling i betong med høyt innhold av flygeaske ble det vist at lavvarmebetong potensielt kan oppnå høyere langtids trykk- og strekkfasthet enn ordinær Portland sement. Resultatene viste en senere styrkeutvikling de første dagene, men en økning ved lengre tidsperioder. Davies, et al. [24] påviste allerede i 1937 at temperaturutviklingen i Portland sement ble redusert som en følge av at en andel av sement ble erstattet med flygeaske. Dette ble bekreftet i en rapport av Atis [20] om varmeutvikling i betong med høyt innhold av flygeaske. Videre ble det vist en sammenheng med resultatene fra varmeutvikling og styrkeutviklingen. Både varme- og styrkeutviklingen for betong med flygeaske og superplastiserende viste en langsom utvikling de første dagene etter støp. Dette var gjeldende for alle andeler av flygeaske. Atis sine resultater bekrefter Davis i så måte. I tillegg viste [23] at betong med høy andel flygeaske hadde en betydelig lavere svinn verdi enn betong med vanlig Portlandsement.

## 2.9 Sammenheng mellom trykk, strekk og E-modul

Strekfastheten til betong er lav sammenlignet med trykkfastheten, generelt 10-12 % for vanlig betong og 4-6 % for høy-styrke betong. Ved dimensjonering av betongkonstruksjoner velges det ofte å la armeringen ta seg av all form for strekkspenning. Derfor har det tradisjonelt sett ikke vært så mye fokus på betongens strekkegenskaper. Likevel er det i noen tilfeller åpenbart at strekkspenningen er betydningsfull, for eksempel i forbindelse med skjærkapasitet, i heft mellom betong og armering eller i ny støp mot gamle konstruksjoner. Betongens strekkfasthet vil i stor grad påvirke rissutvikling i strekksonene og derved betongens bestandighet.



Figur 17 Relativ styrke- og stivhetsutvikling

Ifølge Kanstad, et al. [25] kan trykkfastheten, strekkfastheten og E-modulen uttrykkes som en funksjon av modenheten ved de følgende ligningene; Ligning 2.16, Ligning 2.17 og Ligning 2.18. I Figur 17 ser du typisk utvikling for trykkfasthet, strekkfasthet og E-modul i betong.

Trykkfasthet

$$f_c(M) = f_{c28} \cdot e \left[ s \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{28}{M/24 - t_0/24}} \right) \right] \quad \text{Ligning 2.16}$$

Strekfasthet

$$f_t(M) = f_{t28} \cdot e \left[ s \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{28}{M/24 - t_0/24}} \right) \right]^{n_t} \quad \text{Ligning 2.17}$$

E-modul

$$E_c(M) = E_{c28} \cdot e \left[ s \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{28}{M/24 - t_0/24}} \right) \right]^{n_e}$$

**Ligning 2.18**

M – modenhet [t]

 $f_c$  – trykkfasthet [MPa] $f_{28}$  – 28-døgns trykkfasthet [MPa]

s – kurve-tilpasningsparameter [-]

 $t_0$  – avbindingstiden [t] $f_t$  – strekkfasthet [MPa] $f_{28}$  – 28-døgns strekkfasthet [MPa] $n_t$  – Kurve-tilpasningsparameter [-] $E_c$  – E-modul [MPa] $E_c$  – 28-døgns E-modul [MPa] $N_E$  – kurve-tilpasningsparameter [-]

## 2.10 Rissindeks

Risikoen for at riss kan oppstå uttrykkes som forholdet mellom strekkspenningen og betongens utviklete strekkapasitet. Forholdstallet mellom disse kalles rissindeks og uttrykkes på følgende måte: [12]

$$C(t) = \frac{\sigma(t)}{f_t(t)}$$

**Ligning 2.19**

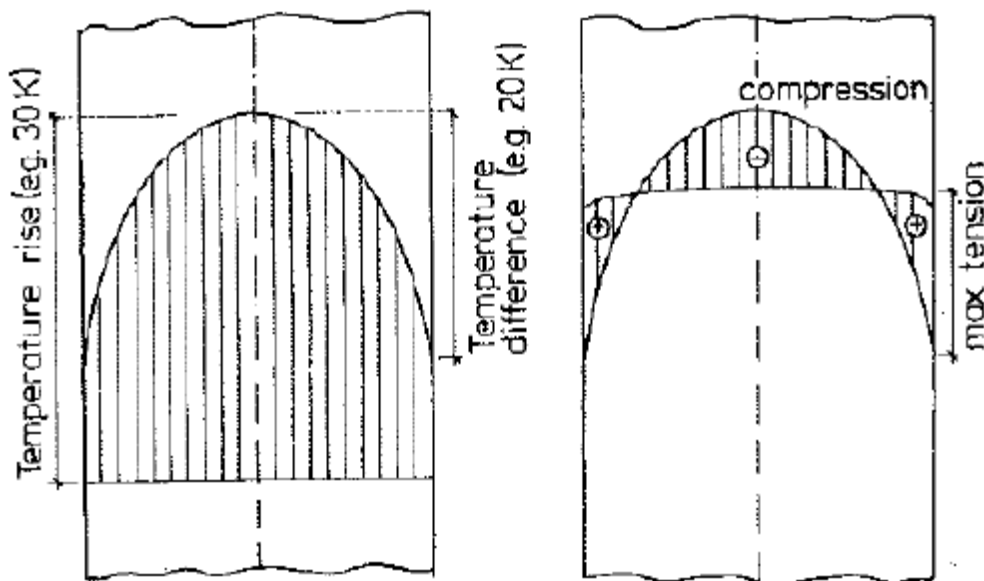
C(t) – Rissindeks

 $f_t(t)$  – strekkfasthet $\sigma(t)$  – strekkspenning

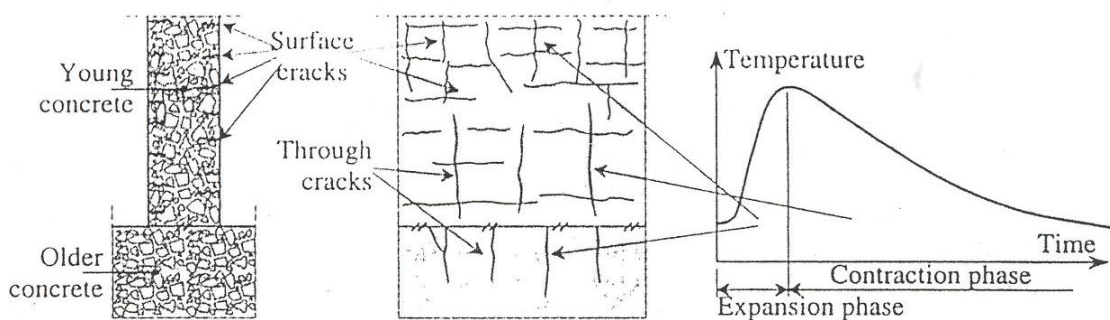
Rissindeks på én eller høyere indikerer rissutvikling i betongen. Av praktiske hensyn er det hensiktsmessig å si at rissindeks under beregninger ikke skal overstige 0,75. Grunnen til dette er at beregninger ikke er 100 % korrekte og man ønsker en sikkerhetsfaktor.

## 2.11 Indre og ytre fastholdning

”Indre fastholdning” er et fenomen som oppstår i en herdende betongkonstruksjon. Flatene som eksponeres for omgivelsene ved fjerning av forskaling, vil kjøles hurtigere enn den indre kjernen, se Figur 18. Overflateriss kan da oppstå slik man ser i Figur 19. Disse rissene blir ikke sett på som spesielt skadelig siden de har en tendens til å lukke seg etter hvert som kjernen også kjøles ned. Likevel er det ikke ønskelig med slike riss. Dette fordi de har en tendens til å opptre som svake punkter hvis betongen blir utsatt for volumendringer på et senere stadium, samt at de kan føre til eksponering av armeringen i en kortere periode.



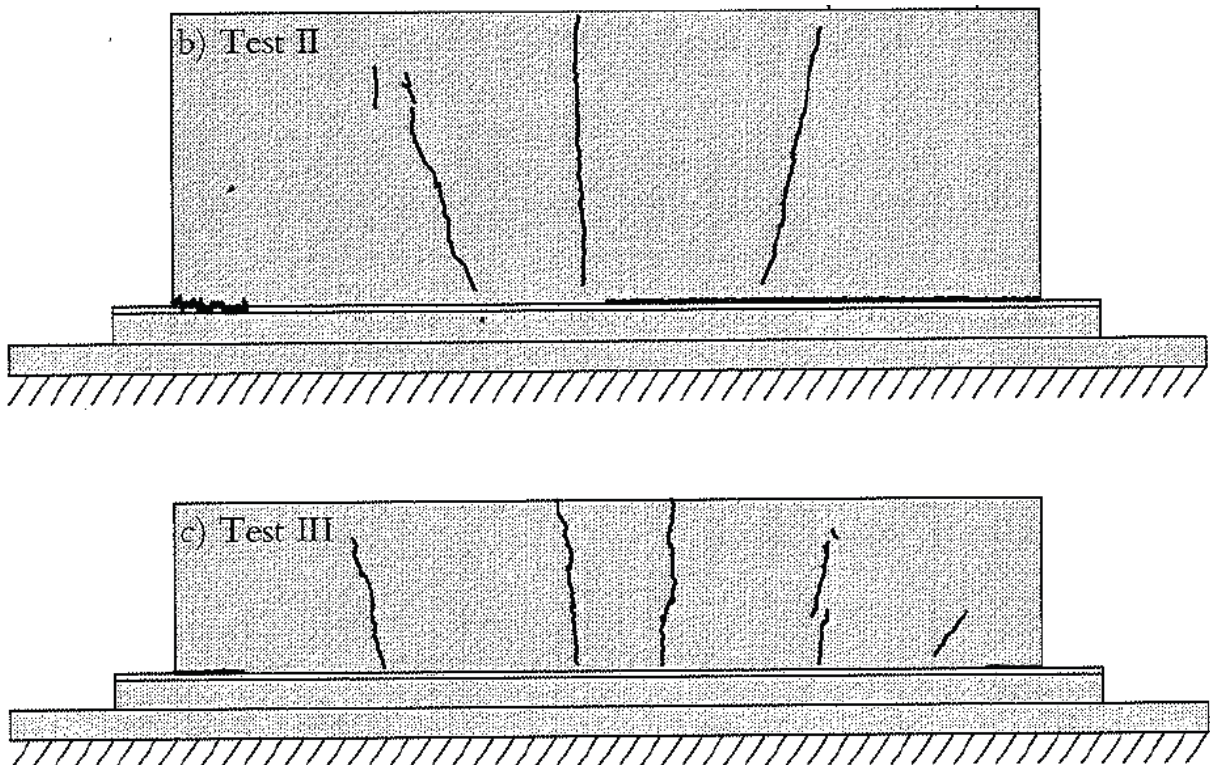
Figur 18 Illustrasjon av indre fastholdning [12]



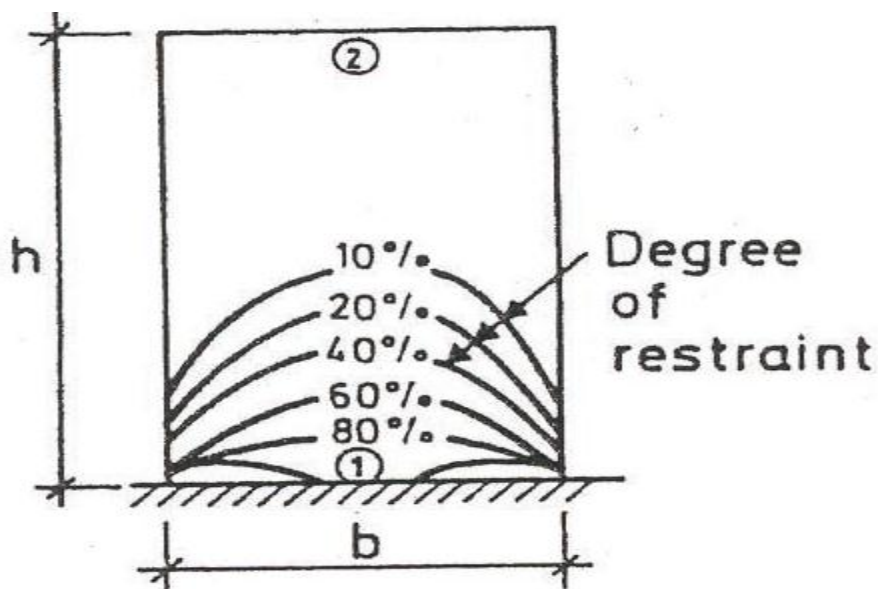
Figur 19 Eksempel på riss i en vegg på grunn av indre og ytre fastholdning [3]

Fenomenet ”ytre fastholdning” skyldes fastholdning fra tilstøtende konstruksjoner. Et klassisk eksempel er en ny vegg støpt på et gammelt og kaldt betongfundament, eller fjell. I dette tilfellet vil spesielt de lavere delene av betongveggen være utsatt for fastholdning. Riss som oppstår på grunn av ytre fastholdning begynner å forplante seg under avkjølingsfasen. Slike riss oppstår fordi den stadig varmere betongen utvider seg, nærmest fritt, da betongen enda ikke har fått noe vesentlig stivhet. Etter noen dager har betongen utviklet fasthet og begynt å feste seg i tilstøtende konstruksjoner. Ettersom betongen nå kjøles ned vil den

prøve å trekke seg sammen. Resultatet er at det oppstår strekkspenninger i veggen, se Figur 20. Hvis betongens strekkfasthet ikke er tilstrekkelig vil det dannes gjennomgående riss som er svært uheldige. [3]



Figur 20 Eksempel på rissmønster i to vegger pga ytre fastholdning fra underlaget [3]



Figur 21 Grad av fastholdning [3]

For veggen i Figur 21 vil spenningen være høyest i en avstand fra fundamentet som tilsvarer cirka en veggtykkelse. Her opptrer som oftest den mest ugunstige kombinasjonen av høy herdetemperatur og fastholdning. [26]



## 3 Laboratorieprogram

### 3.1 Hensikt

Rescon Mapei har utviklet en herdingsakselerator for betong, Mapefast HA. Tilhørende datablad beskriver produktet på følgende måte:

*«Mapefast HA er en unik sammensetning av ulike komponenter som gir betongen vesentlig høyere tidligfastheter også når temperaturen i betongen faller. Spesielt fremtredende blir denne egenskapen i betonger som inneholder blandingssementer (som flygeaske, slagg). Hydrasjonsvarmen frigjøres på et tidligere tidspunkt, noe som fører til økt tidligfasthet, uten at maksimumstemperaturen i massen øker...[.]» (Datablad Mapefast HA, Vedlegg C - Datablad)*

Hensikten med laboratorieprogrammet var å undersøke aktiveringsenergi, trykkfasthets- og varmeutviklingen til betonger som inneholdt Mapefast HA. For videre å se hvordan disse faktorene påvirket egenskapene i forbindelse med rissutvikling i herdende betongkonstruksjoner. Det er også undersøkt om det kan være noen fordelaktige kombinasjonseffekter ved bruk av både Mapefast HA og Mapefast SA. Som nevnt i forrige avsnitt, uttrykker databladet til Mapefast HA at den skal øke tidligfastheten til betongen uten å påvirke temperatur. Om dette stemmer vil det være fordelaktig med tanke på rissutvikling i massive betongverrsnitt.

### 3.2 Betongreseptene

De syv forskjellige betongene som er testet skilte seg fra hverandre ved å ha forskjellig mengde flygeaske, herde- og størkningsakselerator, se Tabell 1. Alle betongene inneholdt sementtypen Norcem Anlegg FA. Det ble støpt terninger fra alle syv betongreseptene, som ble lagt i vannbad på 5-, 20- og 35 °C. Ved testing av trykkfastheten ble to terninger testet fra samme vannbad og betong. Det ble gjort for å redusere usikkerheten til hver måling. For hver betongresept ble trykkfastheten målt ved 7-10 forskjellige tidspunkt. Hensikten med å herde betongen ved tre forskjellige temperaturnivåer er å kunne beregne aktiviseringsenergien. Trykktestingen vil også fortelle noe om fasthetsutviklingen til betongene med hensyn på tid og modenhet. Temperaturen i terningene ble logget den første uken. Etter dette er temperaturen antatt å fortsette som et gjennomsnitt av de siste døgnene. Herdekasser ble også støpt for å gi informasjon om betongenes varmeutvikling over tid. Det ble også foretatt slump-, tetthet- og luftmålinger. Dette for å kontrollere at betongene hadde relativt lik bearbeidbarhet og sammenlignbar styrke.

Ut av resultatene fra laboratorieprogrammet kan man blant annet bestemme aktiveringsenergi, modenhet og effekt av tilsetningsstoffer og flygeaske. Disse dataene skulle videre benyttes i CrackTest COIN for å beregne rissutvikling i noen av betongene som er testet.

Betongreseptene er detaljert beskrevet i Vedlegg A - Resepter.

**Tabell 1 Oversikt over reseptene støpt i laboratoriet**

	Anlegg FA	Anlegg FA +10 % FA	Anlegg FA +20 % FA
	Resept 1	Resept 3	Resept 2
<b>Middels dose HA</b> 4 liter HA per kubikkmeter betong eller omtrent 1 % av bindemiddel	-	-	Resept 4
<b>Høy dose HA</b> 8 liter HA per kubikkmeter betong eller omtrent 2 % av bindemiddel	Resept 5	-	Resept 6
<b>Høy dose HA + SA</b> 8 liter HA per kubikkmeter betong eller omtrent 2 % av bindemiddel 4 liter SA per kubikkmeter betong eller omtrent 1 % av bindemiddel	-	-	Resept 7



### 3.3 Trykkfasthetsutvikling og aktiveringsenergi

Trykkprøvingen ble foretatt etter standarden «NS 12390-3:2009 Prøvning av herdet betong» [27]. En Losenhausen-maskin ble benyttet, se Figur 22, hvor man lastet på 0,8 MPa/s til brudd intr traff. Et typisk brudd for en terning kan ses i Figur 23.



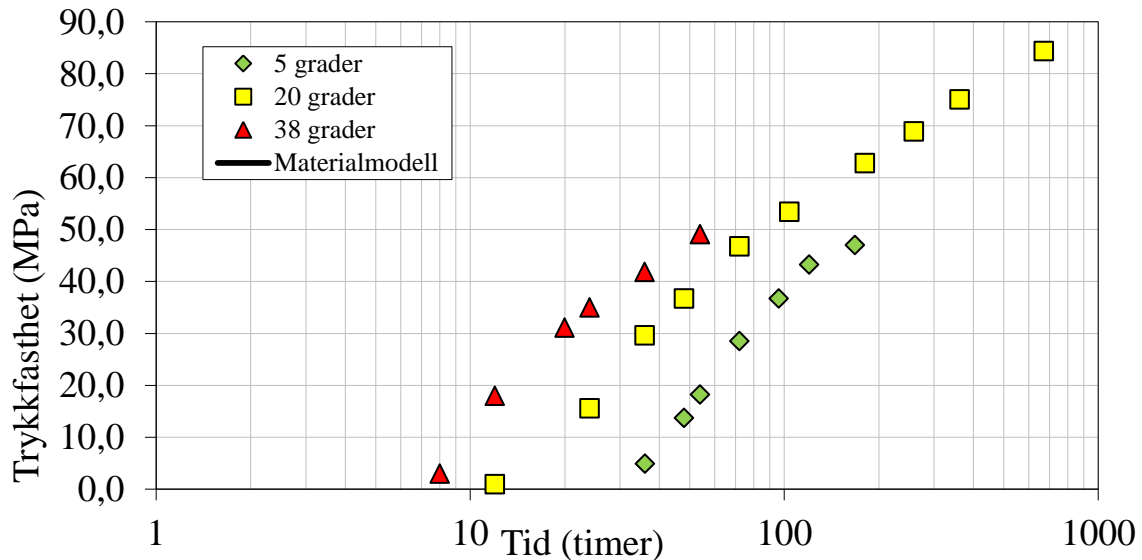
Figur 22 Losenhausen-maskin for trykktesting



Figur 23 Terning i brudd under forsøk

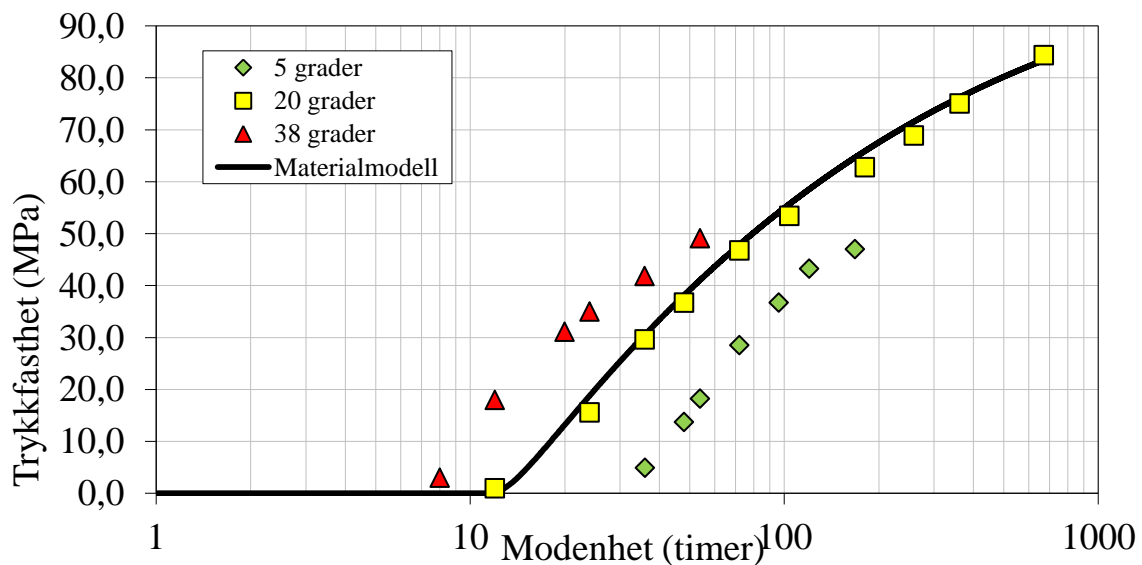
Aktiveringsenergien i de forskjellige betongene er funnet ved hjelp av standarden «NS 3656:1993 Betongprøving – reaksjonshastighetens – temperaturavhengighet» [28].

Beregning av aktiveringsenergi blir gjort ved at man benytter prinsippet om at lik modenhet gir lik fasthet. I Figur 24 til Figur 27 vises fremgangsmåten for å beregne parameterne for aktiveringsenergi. Første steg er å plote alle verdiene inn i et skjema mot tid som vist i Figur 24.



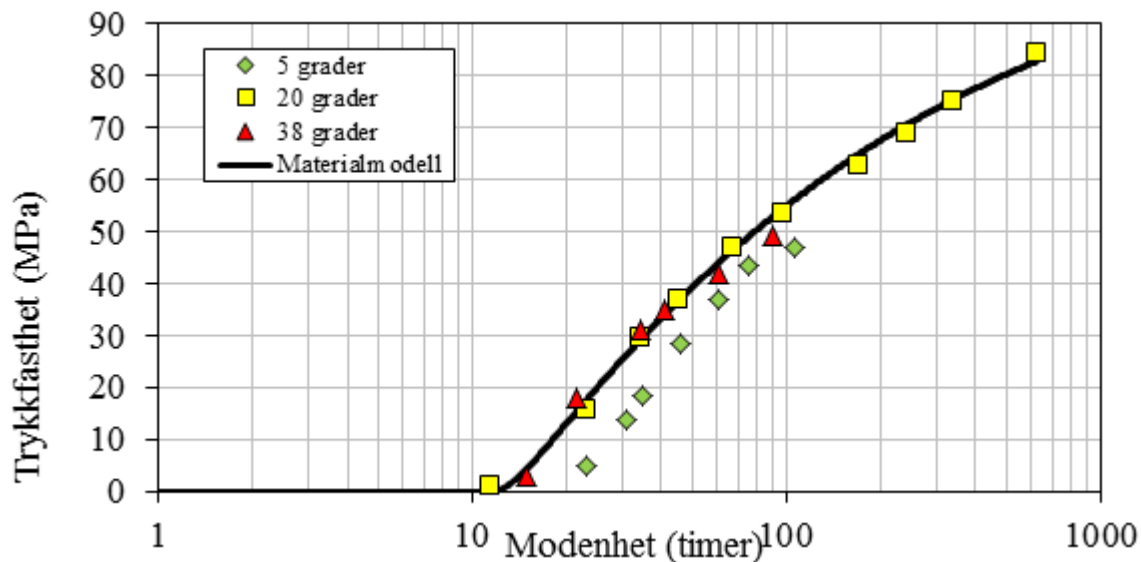
Figur 24 Alle trykktestene ble plottet mot tiden de ble utført

Videre tilpasses egenskapsfunksjonen til verdiene fra betongen som herdet under 20 °C, vist i Figur 25. Denne funksjonen, kalt materialmodellen i figuren, er hentet fra Ligning 2.16.



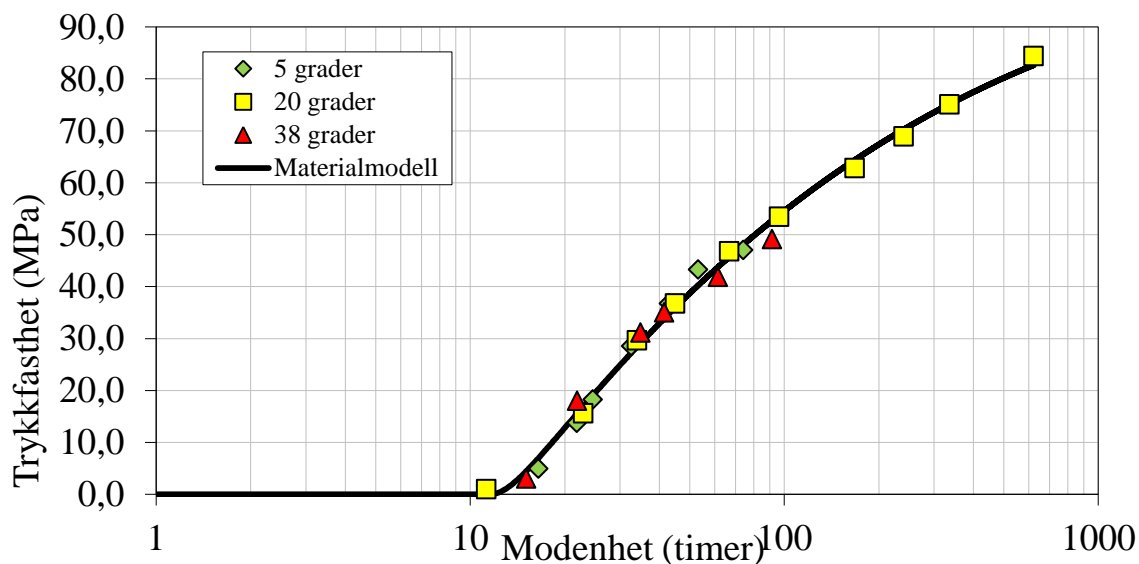
Figur 25 Tilpassing av egenskapsfunksjonen

Neste steg er å tilpasse A-verdien fra Ligning 2.4, som igjen påvirker modenheten. Dette gjør at 38 °-serien legger seg inntil egenskapsfunksjonen, se Figur 26. Kun A-verdien gjelder for betonger som har temperatur over 20 °C, derfor beregnes den først. B-verdien påvirker når temperaturen er under 20 °C.



Figur 26 A-verdien tilpasses

Siste steg er å optimalisere B-verdien fra Ligning 2.3. Slik at også 5° havner tett inntil egenskapsfunksjonen, se Figur 27. På denne måten har både aktiviseringsenergien og formfunksjonen blitt kartlagt.



Figur 27 B-verdien tilpasses

### *3.4 Resultater fra trykktestingen*

I dette avsnitt følger resultater fra trykktestingen og kort diskusjon rundt de syv forskjellige betongene beskrevet i Tabell 1. Ved hjelp av iterasjon i Excel har verdier for aktiveringsenergi(A og B) og parameterne i egenskapsfunksjonen( $t_0$ ,  $f_{c28}$  og  $s$ ) blitt funnet. Data for aktiveringsenergi og egenskapsfunksjonene er samlet opp i Tabell 9 og Tabell 10 i neste delkapittel.

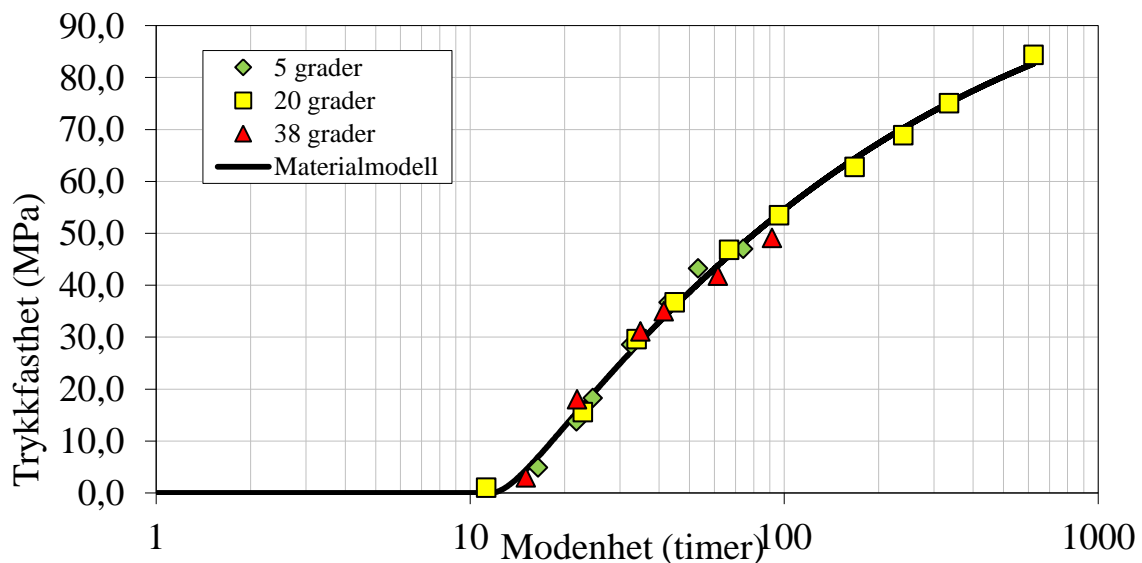
### Referansebetongen med Anlegg FA(Resept 1):

I Tabell 2 vises resultater fra trykktestingen ved bestemmelse av aktiveringsenergi. To av testene er foretatt ved at forsøket ble gjentatt ved et senere tidspunkt. Testene dette gjelder er 240- og 336 modenhetstimers testene ved 20 °C. De opprinnelige testene samsvarte dårlig med egenskapsfunksjonen og for å øke kvaliteten på målingene ble disse gjort om igjen.

**Tabell 2 Trykkfasthet Resept 1**

5 °C vannbad			20 °C vannbad			35 °C vannbad		
T	M	fc	T	M	fc	T	M	fc
[t]	[t]	[MPa]	[t]	[t]	[MPa]	[t]	[t]	[MPa]
36,0	16,5	4,9	12,0	11,3	1,0	8,0	15,1	3,0
48,0	21,9	13,8	24,0	22,9	15,6	12,0	21,9	18,0
54,0	24,6	18,3	36,0	34,0	29,7	20,0	34,9	31,1
72,0	32,6	28,6	48,0	44,9	36,7	24,0	41,5	35,0
96,0	43,0	36,7	72,0	66,8	46,8	36,0	61,6	41,9
120,0	53,3	43,3	103,8	96,4	53,5	54,0	91,5	49,1
168,0	74,1	47,0	180,9	167,9	62,8			
			258,7	240,0	68,9			
			362,2	336,0	75,1			
			672,0	623,4	84,4			

Trykkfastheten blir vist i Figur 28, etter at man har justert for modenheten. Materialmodellen i figuren tilsvarer egenskapsfunksjonen. Figuren viser en relativt god samling om denne. Det hadde vært ønskelig med flere testresultat etter 100 modenhetstimer fra betongene som holdt 5- og 38 °C. Dette for å øke troverdigheten til parameterne i egenskapsfunksjonen og aktiveringsenergien.



**Figur 28 Trykkfasthet plottet mot modenhet for Resept 1**

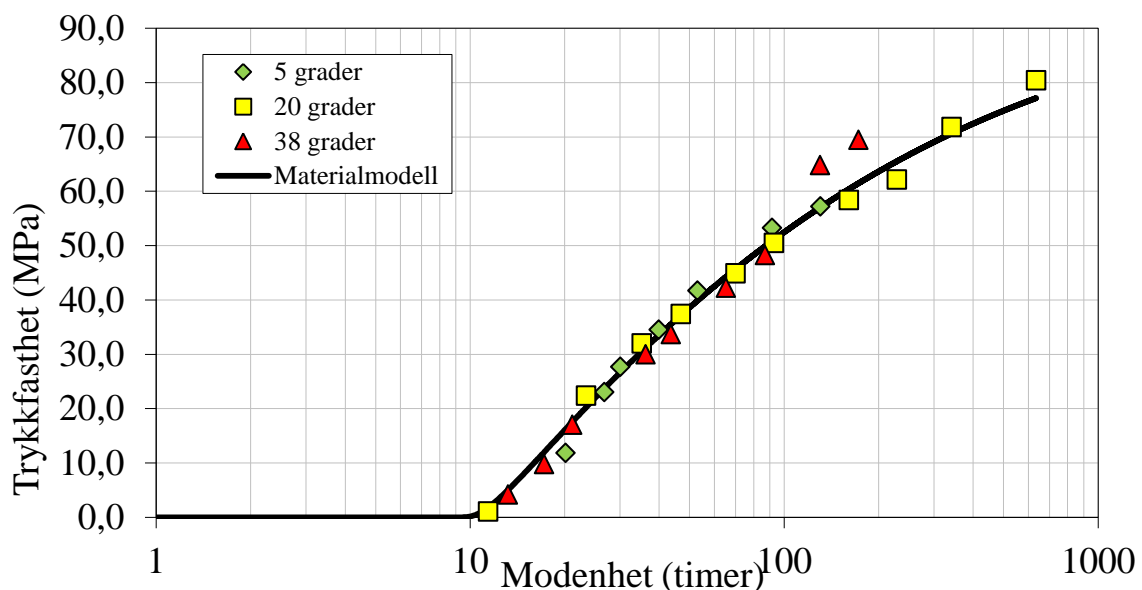
### Anlegg FA og høy dose HA(Resept 5):

I Tabell 3 vises resultater fra trykktestingen ved bestemmelse av aktiveringsenergi. Det er en antydning til at denne betongen, som inneholder høy dose HA, får en litt høyere tidligfasthet under herding ved 5 °C. Dette vises ved at modenheten etter 36 timer er mye høyere for Resept 5 enn for Resept 1, til tross for et relativt jevnt temperaturforløp. Denne tendensen ser man ikke på samme måte under herding ved høyere temperatur. Her er trykkfasthetene ganske jevne i forhold til tid. Begge betongen får en 28-døgnsfasthet på litt i overkant av 80 MPa.

**Tabell 3 Trykkfasthet Resept 5**

5 °C vannbad			20 °C vannbad			35 °C vannbad		
T	M	fc	T	M	fc	T	M	fc
[t]	[t]	[MPa]	[t]	[t]	[MPa]	[t]	[t]	[MPa]
36	20,2	11,8	12	11,9	1	8	13,2	4,1
48	26,8	23	24	23,4	22,3	10	17,2	9,7
54	30,1	27,6	36	35,3	31,9	12	21,2	17
72	40	34,5	48	47	37,4	20	36,3	29,9
96	53	41,7	72	70,2	44,8	24	43,6	33,6
168	91,8	53,2	96	93	50,4	36	65,4	42,2
240	130,8	57,1	168	161	58,4	48	87,1	48,2
360	195,8	63,5	240	228,7	62,1	72	130,3	64,7
			360	341,7	71,8	96	172,6	69,4
			672	635,5	80,4			

I Figur 29 vises trykkfasthetsresultatene plottet mot modenhet. Det er relativt god samling om egenskapsfunksjonen, selv om enkelte av resultatene avviker endel etter 100 modenhetstimer. Som nevnt i avsnitt 2.6.1 kan modenhetsprinsippet være upresist etter lang tid.



**Figur 29 Trykkfasthet plottet mot modenhet for Resept 5**

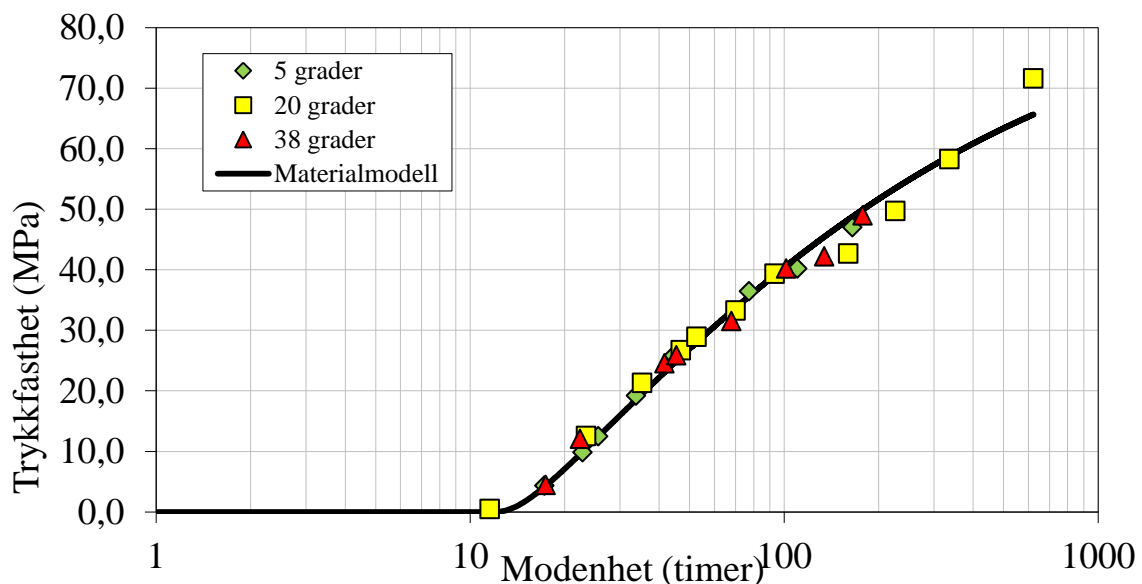
### Anlegg FA med 10 % ekstra FA(Resept 3):

I Tabell 4 vises resultater fra trykktestingen ved bestemmelse av aktiveringsenergi for betongen med 10 % ekstra flygeaske. Legg merke til at 28-døgnsfastheten har gått ned med 15 % i forhold til Resept 1. Ifølge Bjøntegaard [22] og Atis [23] er det forventet at fastheten går ned med økt mengde FA.

**Tabell 4 Trykkfasthet Resept 3**

5 °C vannbad			20 °C vannbad			35 °C vannbad		
T	M	fc	T	M	fc	T	M	fc
[t]	[t]	[MPa]	[t]	[t]	[MPa]	[t]	[t]	[MPa]
36	17,2	4,4	12	11,5	0,5	9,5	17,4	4,5
48	22,9	9,9	24	23,4	12,6	12	22,4	12,1
54	25,6	12,5	36	35,3	21,3	22	41,7	24,6
72	33,8	19,2	48	46,9	26,7	24	45,5	25,9
96	44,5	25,8	54	52,6	28,9	36	68,1	31,5
168	77,3	36,4	72	70,1	33,2	54	101,6	40,2
240	110,2	40,2	96	93,2	39,3	72	134,5	42,2
360	165	47	168	160	42,7	96	178,3	49
			240	225,9	49,7			
			360	335,7	58,3			
			672	621,5	71,6			

I Figur 30 vises trykkfasthetsresultatene plottet mot modenhet. Kan se ut som egenskapsfunksjonen burde hatt en mindre s-formet kurve. Siden 28-døgnsfastheten havner et godt stykke over modellen.



**Figur 30 Trykkfasthet plottet mot modenhet for Resept 3**

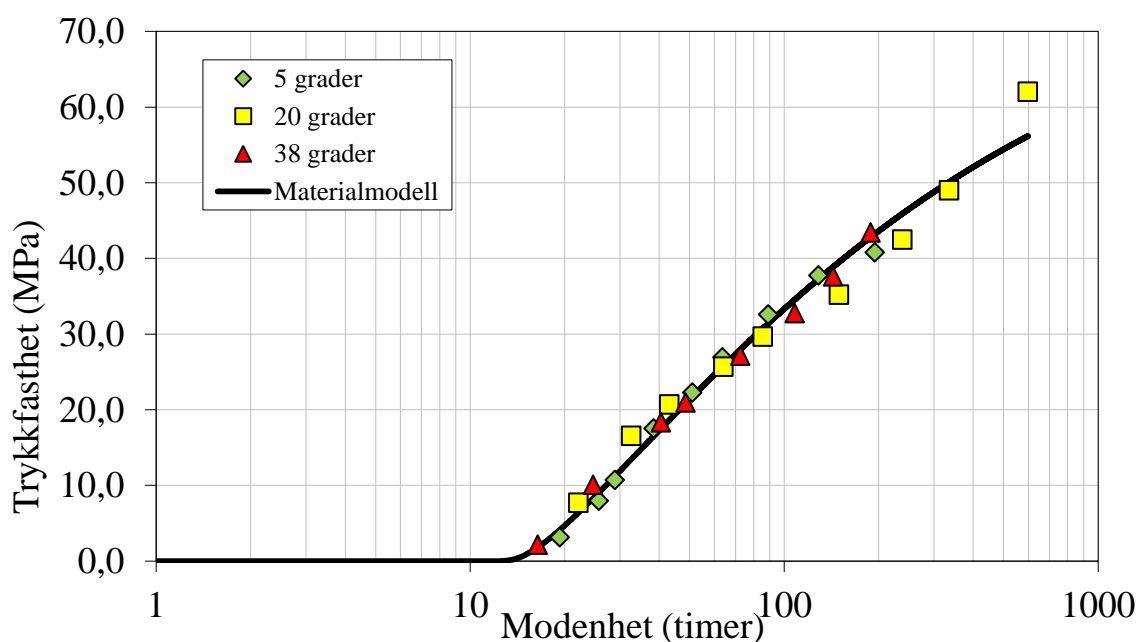
### Anlegg FA med 20 % ekstra FA(Resept 2):

I Tabell 5 vises resultater fra trykktestingen ved bestemmelse av aktiveringsenergi. To av testene er foretatt ved at forsøket ble gjentatt ved et senere tidspunkt. Testene dette gjelder er 149- og 336 modenhetstimers testene ved 20 °C. 28-døgnsfastheten har gått ned omtrent 26 % sammenlignet med Resept 1. På samme måte som i Resept 3 var dette forventet.

**Tabell 5 Trykkfasthet Resept 2**

5 °C vannbad			20 °C vannbad			35 °C vannbad		
T	M	fc	T	M	fc	T	M	fc
[t]	[t]	[MPa]	[t]	[t]	[MPa]	[t]	[t]	[MPa]
36,0	19,3	3,1	24,0	22,1	7,7	8,0	16,4	2,2
48,0	25,7	8,0	36,0	32,6	16,5	12,0	24,7	10,1
54,0	28,9	10,7	48,0	43,1	20,7	20,0	40,6	18,3
72,0	38,5	17,5	72,0	64,1	25,7	24,0	48,6	20,9
96,0	51,1	22,3	96,0	85,5	29,7	36,0	72,6	27,1
120,0	63,7	26,9	168,0	149,5	35,2	54,0	108,2	32,8
168,0	89,2	32,6	267,3	238,0	42,5	72,0	143,5	37,6
240,0	128,8	37,8	377,4	336,0	49,0	96,0	189,0	43,4
360,0	194,8	40,8	672,0	598,4	62,0			

I Figur 31 vises trykkfasthetsresultatene plottet mot modenhet. Også betongene med 20 % ekstra flygeaske burde nok hatt en mindre s-formet egenskapsfunksjon, siden 28-døgnsfastheten havner over egenskapsfunksjonen. Bortsett fra dette er samlingen relativt god.



**Figur 31 Trykkfasthet plottet mot modenhet for Resept 2**



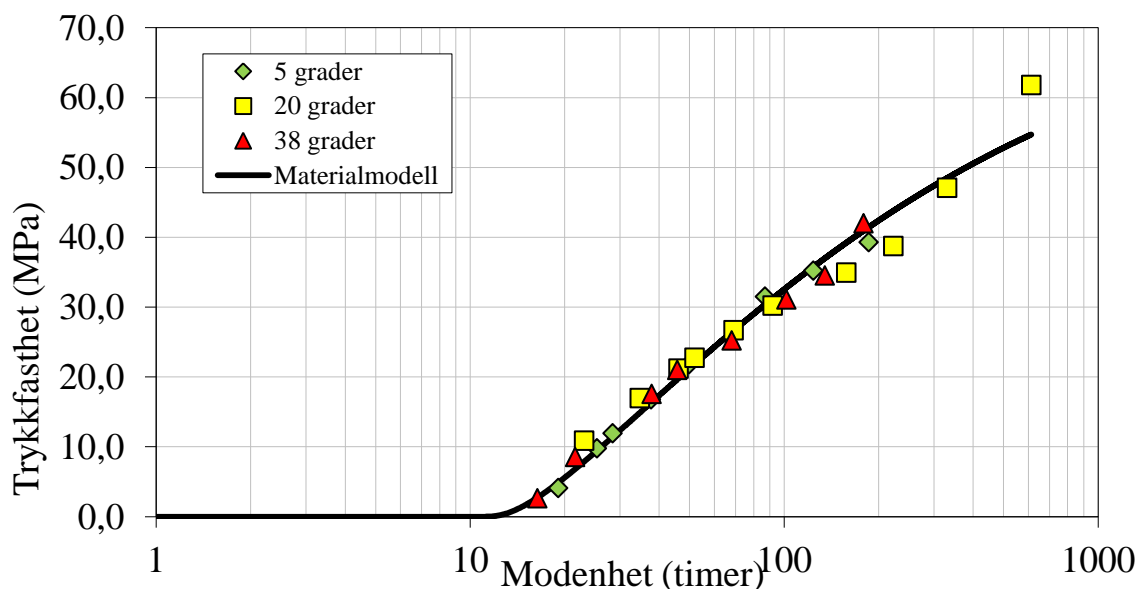
### Anlegg FA med 20 % ekstra FA og moderat mengde HA(Resept 4):

I Tabell 6 vises resultater fra trykktestingen ved bestemmelse av aktiveringsenergi. Fasthetene samsvarer godt med betongen uten HA(Resept 2). Tidligfastheten til betongen som herdet under 5 °C er riktignok litt høyere, men ikke mer enn at dette kan skyldes usikkerhet i målingene.

**Tabell 6 Trykkfasthet Resept 4**

5 °C vannbad			20 °C vannbad			35 °C vannbad		
T	M	fc	T	M	fc	T	M	fc
[t]	[t]	[MPa]	[t]	[t]	[MPa]	[t]	[t]	[MPa]
36	19,1	4,1	24	23,1	10,9	9,5	16,4	2,6
48	25,4	9,8	36	34,7	17	12	21,6	8,5
54	28,5	11,9	48	46,1	21,2	20	37,9	17,6
72	37,7	16,8	54	51,8	22,8	24	45,7	21
96	49,9	21,8	72	69,1	26,7	36	68,2	25,2
168	87	31,5	96	92,9	30,2	54	101,8	31,1
240	124,1	35,2	168	157,5	34,9	72	135,1	34,5
360	186,1	39,3	240	222	38,7	96	179,4	42
			360	331,2	47,1			
			672	613	61,8			

I Figur 32 vises trykkfasthetsresultatene plottet mot modenhet. Det er relativt god samling de første 100 modenhetstimene.



**Figur 32 Trykkfasthet plottet mot modenhet for Resept 4**

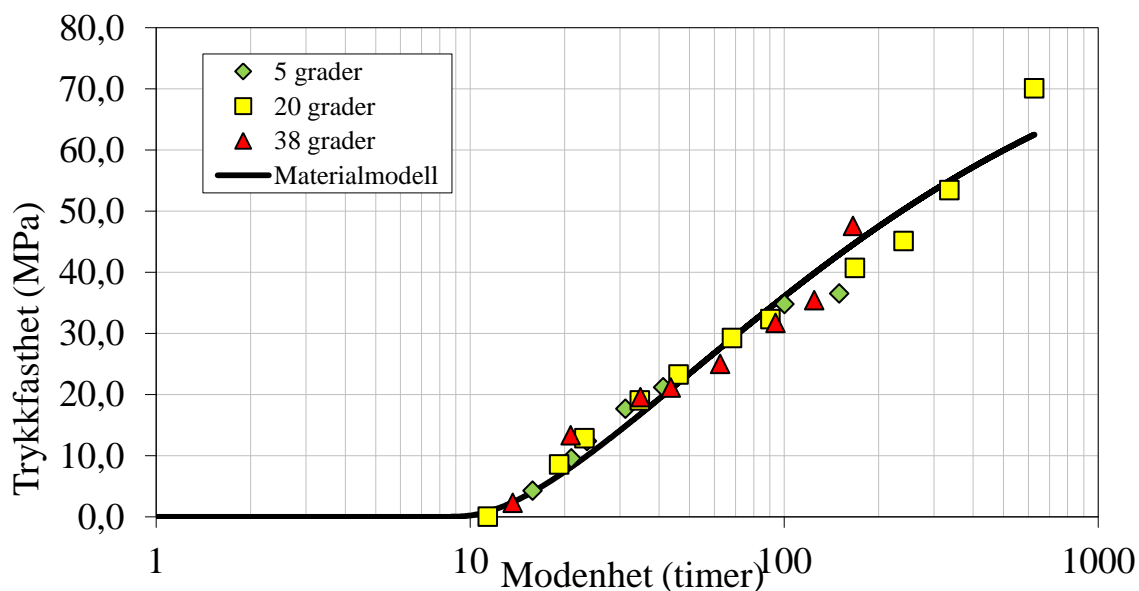
### Anlegg FA med 20 % ekstra FA og høy mengde HA(Resept 6):

I Tabell 7 vises resultater fra trykktestingen ved bestemmelse av aktiveringsenergi. Tre av testene er foretatt ved at forsøket ble gjentatt på et senere tidspunkt. Testene det gjelder er 178,9-, 256,5- og 359,9 timers testene på 20 °C. Denne betongen fikk over 10 % høyere 28-døgnsfasthet enn Resept 2,4 og 7. Noe som tyder på at det har oppstått en feil. Det er ingen god forklaring på dette avviket.

**Tabell 7 Trykkfasthet Resept 6**

5 °C vannbad			20 °C vannbad			35 °C vannbad		
T	M	fc	T	M	fc	T	M	fc
[t]	[t]	[MPa]	[t]	[t]	[MPa]	[t]	[t]	[MPa]
36,0	15,8	4,3	12,0	11,4	0,0	8,0	13,7	2,3
48,0	21,0	9,5	20,0	19,2	8,5	12,0	20,9	13,3
54,0	23,6	12,4	24,0	23,1	12,9	20,0	34,9	19,5
72,0	31,3	17,7	36,0	34,8	19,0	25,0	43,6	21,1
96,0	41,3	21,2	48,0	46,1	23,2	36,0	62,7	25,0
240,0	100,4	34,8	72,0	68,4	29,2	54,0	94,0	31,7
360,0	150,0	36,5	96,0	90,7	32,3	72,0	124,9	35,4
			178,9	168,3	40,7	96,0	165,9	47,6
			256,5	240,4	45,1			
			359,9	336,6	53,5			
			672,0	626,7	70,1			

I Figur 33 vises trykkfasthetsresultatene plottet mot modenhet. Samlingen rundt egenskapsfunksjonen er dårligere her sammenlignet med de andre betongene.



**Figur 33 Trykkfasthet plottet mot modenhet for Resept 6**

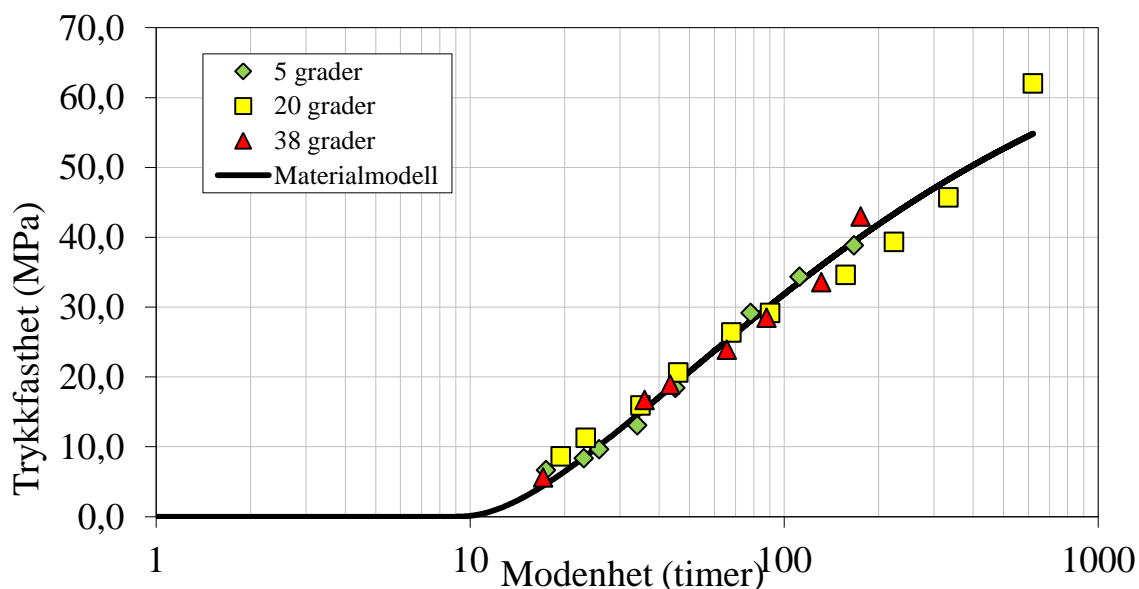
### Anlegg FA med 20 % ekstra FA, høy mengde HA og SA(Resept 7):

I Tabell 8 vises resultater fra trykktestingen ved bestemmelse av aktiveringsenergi. Enkelte av trykkfasthetstestene skiller seg ut fra Resept 2, 4 og 6. Blant annet er styrken noe høy etter 36 timer i 5 °C vannbad. Det er likevel ikke noe tydelig mønster.

**Tabell 8 Trykkfasthet Resept 7**

5 °C vannbad			20 °C vannbad			35 °C vannbad		
T	M	fc	T	M	fc	T	M	fc
[t]	[t]	[MPa]	[t]	[t]	[MPa]	[t]	[t]	[MPa]
36	17,5	6,7	20	19,5	8,6	10	15,9	5,6
48	23	8,3	24	23,4	11,3	20	33,3	16,7
54	25,8	9,6	36	35	15,9	24	40,2	18,9
72	34,1	13	48	36	20,7	36	60,7	23,9
96	45,1	18,4	72	68	36,3	48	81,2	28,4
168	78,4	29,1	96	90,3	29,1	72	121,4	33,6
240	112,1	34,3	168	157,1	34,6	96	162,1	43
360	167,1	38,9	240	224,3	39,3			
			360	333,9	45,7			
			672	621,2	62			

I Figur 34 vises trykkfasthetsresultatene plottet mot modenhet. God samling de første 100 modenhetstimene, etter dette litt mer avvik. Vi ser et tilsvarende mønster på samlingen som i de foregående betongene med lik andel FA.



**Figur 34 Trykkfasthet plottet mot modenhet for Resept 7**

### 3.5 Parameterne for aktiviseringsenergi og egenskapsfunksjon

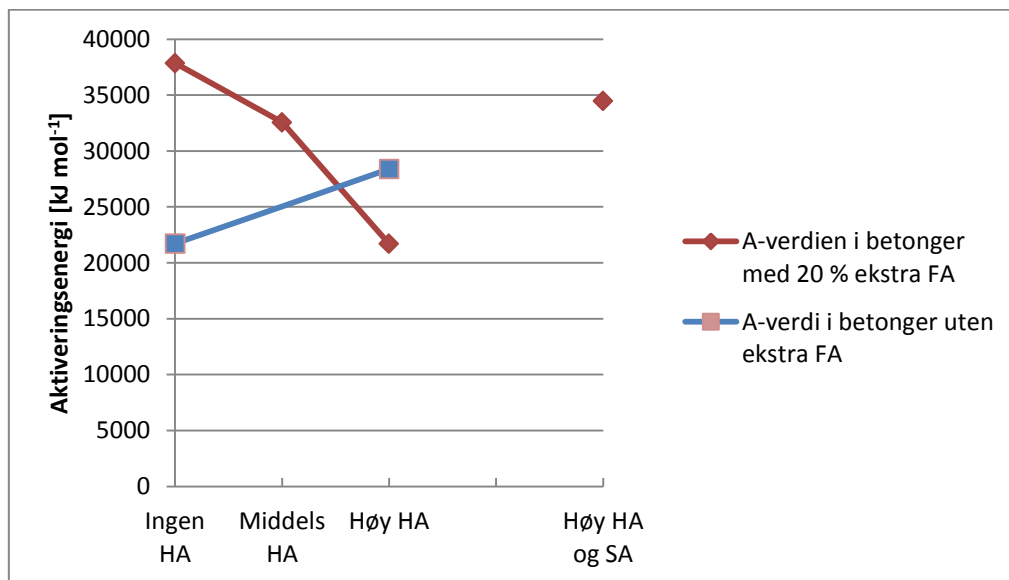
Parameterne fra beregningen av aktiviseringsenergi- og egenskapsfunksjonen ble videre brukt som input i CrackTeSt COIN og herdekasseskjemaet.

**Tabell 9 Parameterne for aktiviseringsenergi iterert fram ved hjelp av Excel**

Parametere til aktiviseringsenergi			
	Anlegg FA	Anlegg FA + 10 %	Anlegg FA + 20 %
Ingen HA eller SA	Resept 1	Resept 3	Resept 2
	A 21719	A 24642	A 37124
	B 1083	B 751	B -562
Middels dose HA	-	-	Resept 4
			A 31339
			B -109
Høy dose HA	Resept 5	-	Resept 6
	A 28387		A 21248
	B -27		B 1210
Høy dose HA + SA	-	-	Resept 7
			A 29061
			B 389

Resultatene fra Tabell 9 varierer voldsomt og er ikke helt som forventet. Det kan nevnes at betongen i CrackTeSt COIN som tilsvarer Resept 1 hadde en A-verdi på 35000 og en B-verdi på 500. Mens betongen som tilsvarer Resept 2 hadde en A-verdi på 37000 og en B-verdi på 500. At enkelte av betongen får en negativ B-verdi tyder på at temperaturfølsomheten øker ved lavere temperatur. Dette er uventet og stor usikkerhet i forhold til om dette er korrekt. Det har likevel ikke stor betydning for rapportens videre databeregninger. Siden temperaturen i de aktuelle områdene, og i de mest kritiske fasene, stort sett kommer til å befinne seg over 20 °C. Det er heller ikke mulig å føre inn B-verdiene i CrackTeSt COIN som negative, og disse må derved settes lik 0 ved inntasting.

I Figur 35 vises A-verdien for betonger med 20 % ekstra FA, plottet mot mengde tilsetningsstoffer. Tilsvarende er gjort for betonger uten ekstra FA. Det ser ut som det er et mønster i sammenheng mellom mengden HA og aktiveringsenergien. Aktiveringsenergien, for betongen med 20 % ekstra FA, går først ned med middels dose HA og siden videre ned med høy dose. Betongene uten ekstra FA øker A-verdien fra ingen til høy dose HA. Betongen med kombinasjonen av HA og SA vises i punktet til høyre i figuren.

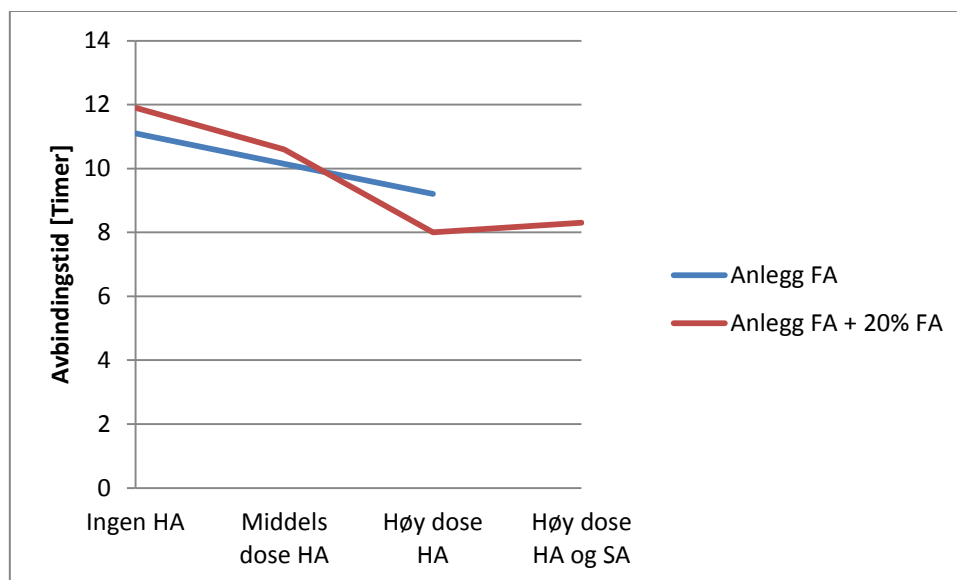


Figur 35 A-verdi i E(θ) plottet mot dose HA

Tabell 10 Parameterne for egenskapsfunksjonen iterert fram ved hjelp av Excel

Parameterne til egenskapsfunksjonen						
	Anlegg FA		Anlegg FA + 10 %		Anlegg FA + 20 %	
Ingen HA eller SA	Resept 1		Resept 3		Resept 2	
	$t_0$	11,1	$t_0$	11,4	$t_0$	11,9
	$s$	0,25	$s$	0,29	$s$	0,31
	$f_{c28}$	84,7	$f_{c28}$	66,6	$f_{c28}$	58
Middels dose HA	-		-		Resept 4	
					$t_0$	10,6
					$s$	0,31
Høy dose HA	Resept 5		-		Resept 6	
	$t_0$	9,2			$t_0$	8
	$s$	0,23			$s$	0,33
	$f_{c28}$	77,8			$f_{c28}$	63,4
Høy dose HA + SA	-		-		Resept 7	
					$t_0$	8,3
					$s$	0,27
					$f_{c28}$	49,2

Tabell 10 viser en oversikt over parameterne i egenskapsfunksjonen, se Ligning 2.16. Parameterne ble iterert fram ved hjelp av Excel. Resultatene tyder på at det er et mønster mellom HA og avbindingstiden. Verdien  $t_0$  synker når HA tilsettes, for så å synke videre når dosen økes ytterligere, se Figur 36. Dette kan tyde på at HA har en størkningsakselererende effekt på betongen. Videre kan man av Tabell 10 se at 28-dagsfastheten synker når mengden FA øker. Noe som er i tråd med rapporten til Atis [23]. Egenskapsfunksjonen viser en markant lavere 28-døgnsfasthet enn hva som ble målt for reseptene 2,4 og 7. Dette kan skyldes at betonger med mye FA egentlig skal ha en mindre s-formet egenskapsfunksjon. Det vil si at materialmodell er upresis ved tilsatt FA, se kapittel 2.6.1. Noe som ville gitt høyere  $f_{c28}$ .



Figur 36 Avbindingstid mot dose HA

### 3.6 Varmeutvikling i betong

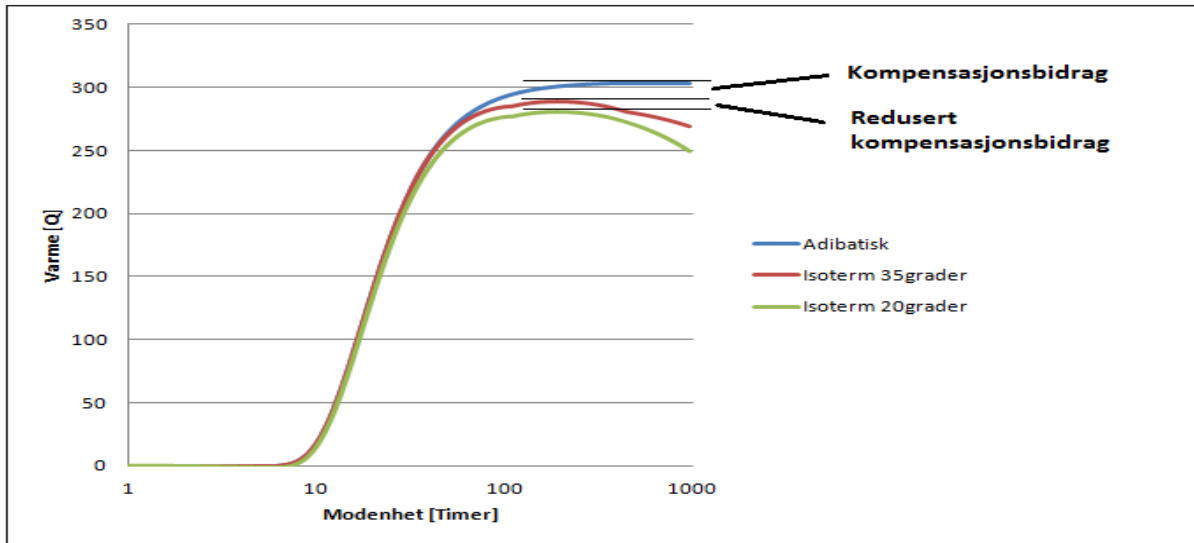
For å kartlegge varmeutviklingen og temperaturstigningen i betong ble det gjort herdekasseforsøk, forsøk i semi-adiabatiske kalorimetre [29]. Parameterne til varmfunksjonen som ble funnet her, er svært viktig for å kunne simulere og bestemme utviklingen av varme og temperaturstigning i betongene, som diskutert i avsnitt 2.6.1.

Måling av herdevarme i herdekassene ble gjort etter standarden «NS 3657:1993 Måling av varmeutvikling» [30]. Prinsippene ved herdekasseforsøk er å kartlegge varmeutviklingen med så lite varmetap til omgivelsene som mulig. Varmetapet vil påvirke kvaliteten til parameterne i varmfunksjonen. Som herdekasse benyttes bokser av forskalingsplater med 10 cm isopor som isolasjon. Kassene har et innvendig volum på omtrent 14 liter. Sikkerheten i beregningene vil øke med høyere isolasjonsgrad og betongmengde, det vil si avtakende varmetap til omgivelsene. Temperaturforløpet ble registrert både i betongen og omgivende luft ved hjelp av termoelementer og en loggeenhet. Videre ble kassene satt inn på et varmerom som holdt en konstant temperatur på 38 °C. Dette for å minske varmetapet fra kassene og for å redusere kompensasjonsbidraget, som er nærmere forklart på neste side. Underveis ble temperatur i kassene samt fra omgivelsene logget ved hjelp av en Almemo datalogger. I Figur 37 kan man se tre herdekasser stablet oppå hverandre, mens temperaturen i kassene og rommet blir logget. Temperaturforløpet i betongen ble registrert i minst 5 døgn, eller 250 modenhetstimer.



Figur 37 Tre herdekasser og Almemo datalogger

I herdekasseforsøk utført i denne oppgaven ble det benyttet en konstant omgivelsestemperatur på 38 °C. I Figur 38 vises en prinsippskisse som illustrerer varmeforløpet til en betong under adiabatisk forhold, samt varmeforløpet under herding i varmekasse med ambient temperatur på 20- og 35 °C. Kompensasjonsbidraget kan forstås som varmetapet i forhold til adiabatisk omgivelser og vil reduseres dersom omgivelsestemperaturen øker. Dette vises ved at varmeforløpet ved 35 °C er høyere enn ved 20 °C for samme betong. Differansen mellom maksimal varmemengde for 20- og 35 °C er det reduserte kompensasjonsbidraget. Redusert kompensasjonsbidrag bidrar til større nøyaktighet i herdekassemålingene.



Figur 38 Illustrasjon på kompensasjonsbidraget

### 3.7 Resultater fra herdekassene

All data fra temperaturloggingen i og rundt betongen ble brukt som input i Herdekasse-regnearket. Data om aktiveringsenergi fra Tabell 9 og data om bindemiddelet er også informasjon som brukes som input i Herdekasseskjemaet for å beregne parameterne i varmefunksjonen, vist i ligning 2.7. En oversikt over parameterne i varmefunksjonen fra forsøkene, er gitt i Tabell 12.

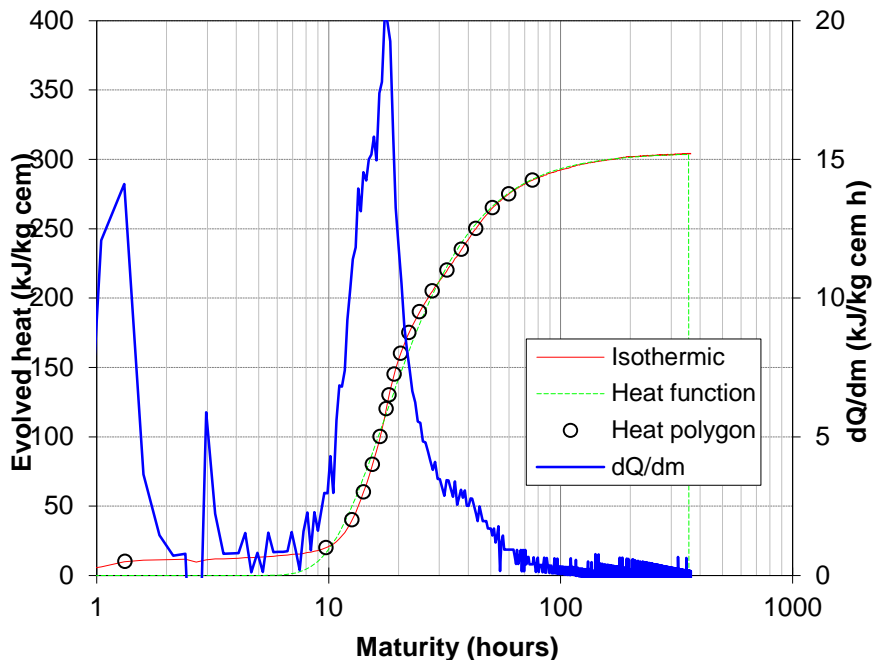
En feilkilde til alle temperaturmålingene er at det tok 15-20 min fra betongene ble blandet til de sto inne på varmerommet, og temperaturloggingen kunne starte. Betongen holder cirka 20 °C da den ble blandet. Disse 15-20 minuttene er altså før tidspunkt null i påfølgende figurer.

En kort diskusjon følger etter at resultatene er presentert.

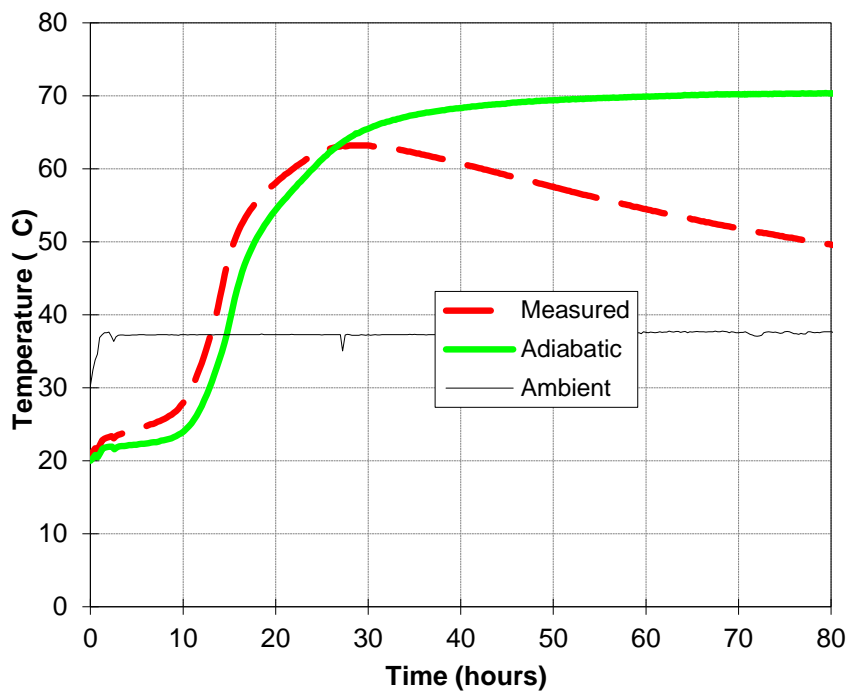


### Referansebetongen med Anlegg FA (Resept 1):

I Figur 39 presenteres varmeutviklingen plottet mot modenheten. Figur 40 viser målt temperaturutvikling og kalkulert adiabatisk temperaturutvikling.



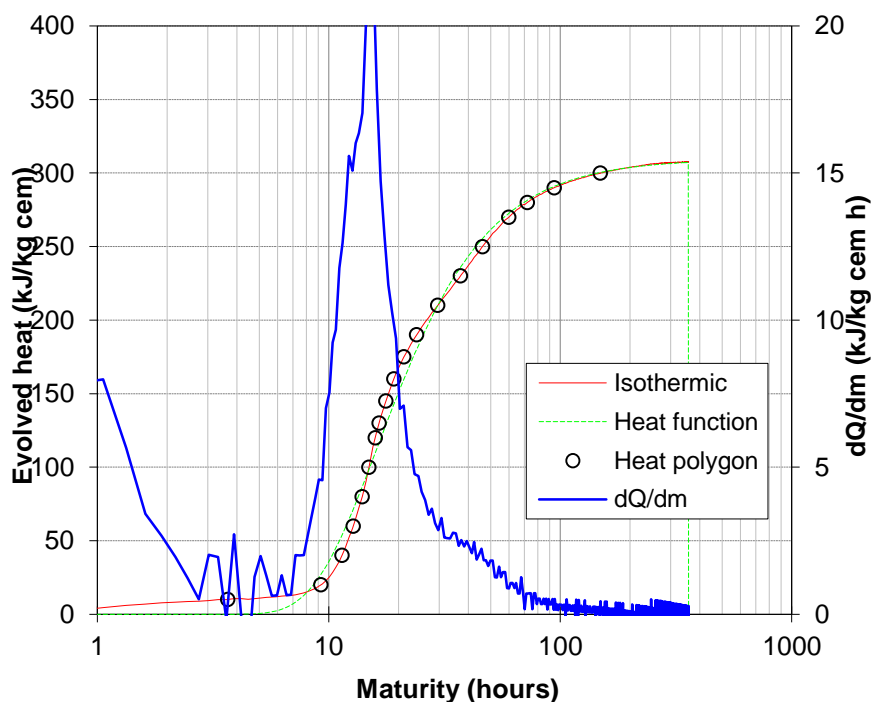
Figur 39 Utviklet varme(Isothermic) og stigningstallet til kurven( $dQ/dm$ ) plottet mot modenheten til betongen



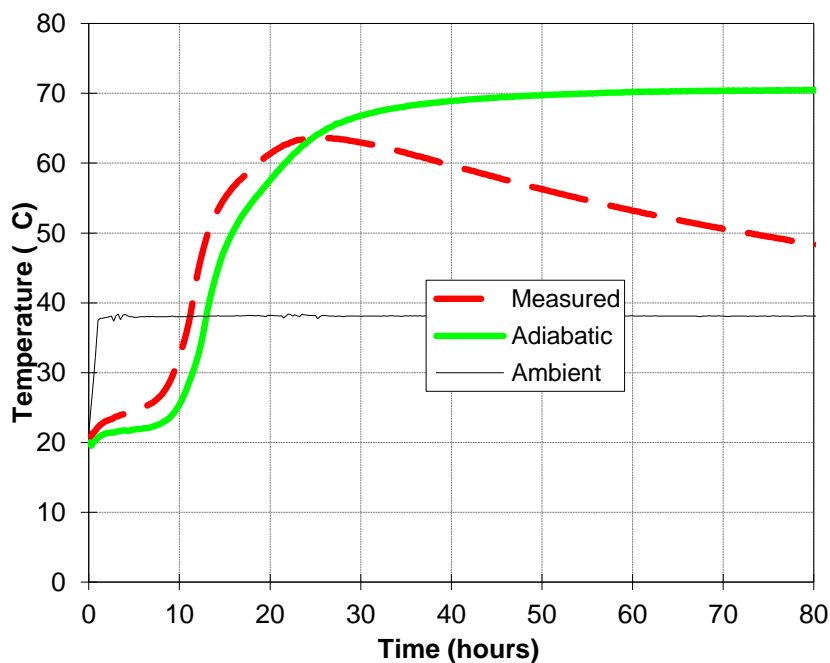
Figur 40 Målt temperatur(Measured) i herdekasse, omliggende temperatur(Ambient) og Adiabatisk temperatur(Adiabatic)

### Anlegg FA og høy dose HA (Resept 5):

I Figur 41 er det vist isothermisk varmetvikling og stigningstall til denne kurven. Figur 42 viser målt temperaturutvikling og adiabatisk temperaturutvikling.



Figur 41 Utviklet varme (Isothermic) og stigningstallet til kurven ( $dQ/dm$ ) plottet mot modenheten til betongen.

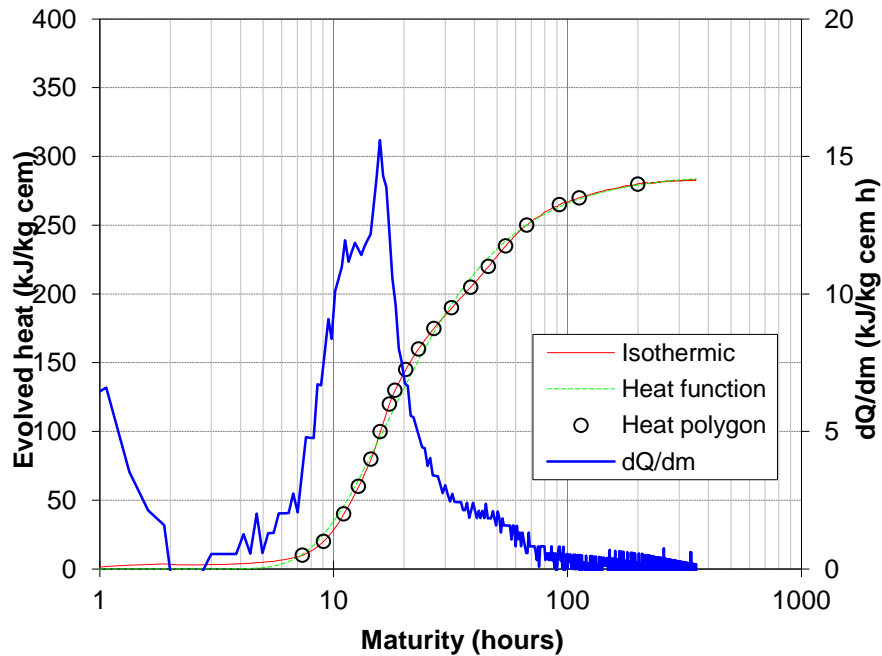


Figur 42 Målt temperatur i herdekasse, omliggende temperatur(Ambient) og Adiabatisk temperatur

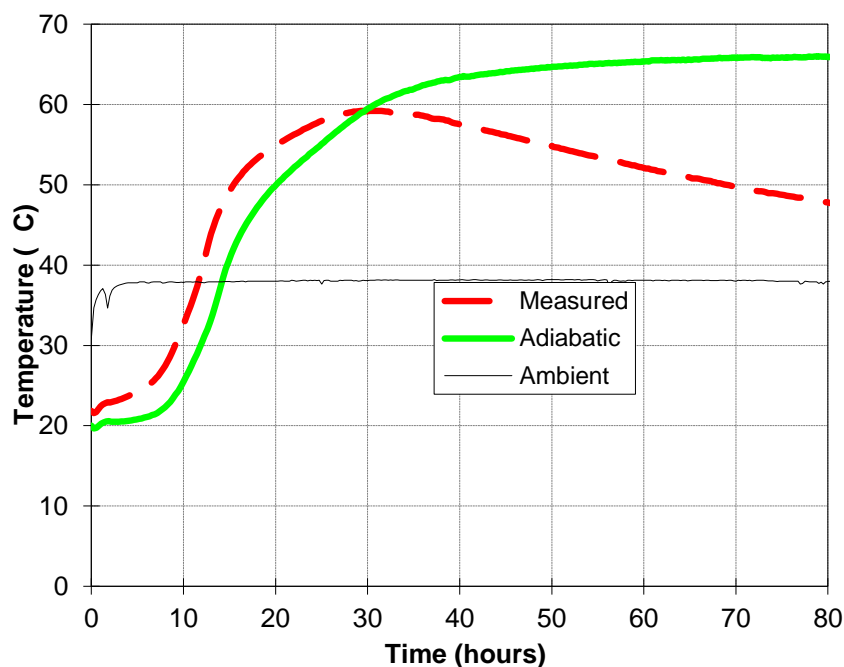
En forskjell fra referansebetongen er at både den adiabatisk- og den målte temperaturen har et litt høyere toppunkt. Dette skyldes nok HA, som er eneste forskjell mellom reseptene.

### Anlegg FA med 10 % ekstra FA (Resept 3):

I Figur 43 er det vist isotermisk varmeutvikling og stigningstall til denne kurven. Figur 44 viser målt temperaturutvikling og adiabatisk temperaturutvikling.



Figur 43 Utviklet varme (Isothermic) og stigningstallet til kurven ( $dQ/dm$ ) plottet mot modenheten til betongen.

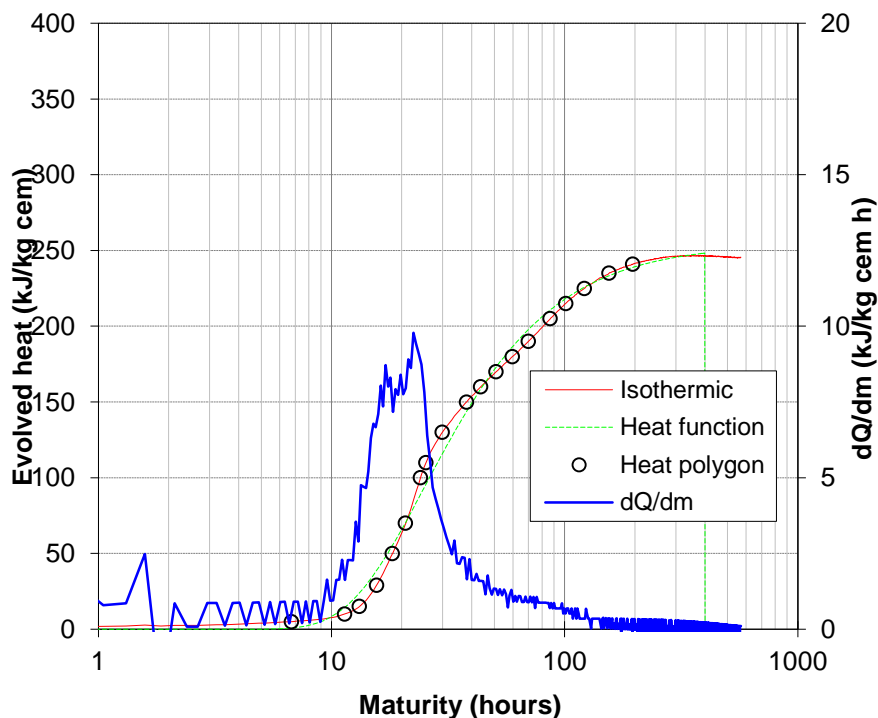


Figur 44 Målt temperatur (Measured) i herdekasse, omliggende temperatur og Adiabatisk temperatur

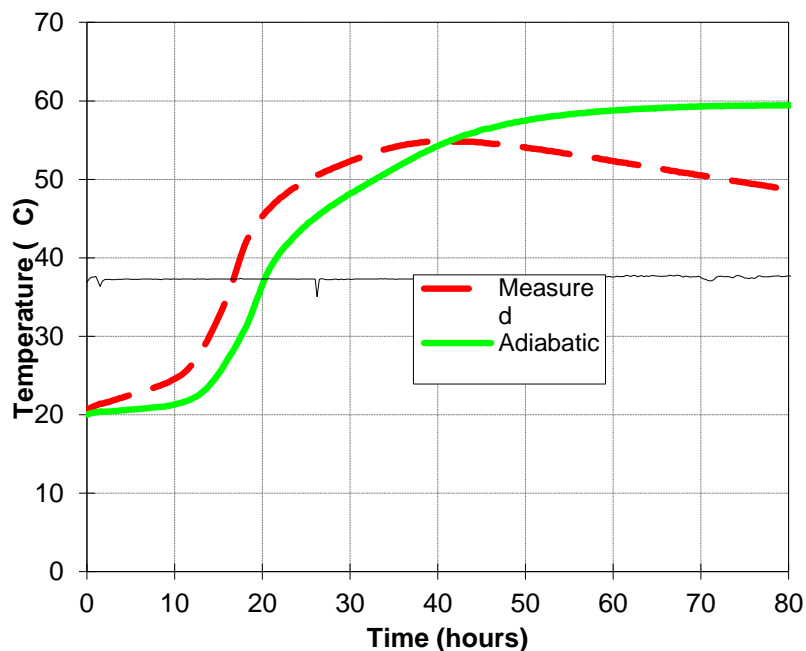
Denne betongen har mer FA enn de to første, lavere maksimumstemperatur og langsommere varmeutvikling.

### Anlegg FA med 20 % ekstra FA (Resept 2):

I Figur 45 er det vist isothermisk varmeutvikling og stigningstall til denne kurven (intensiteten). Figur 46 viser målt temperaturutvikling og adiabatisk temperaturutvikling.



Figur 45 Utviklet varme (Isothermic) og stigningstallet til kurven ( $dQ/dm$ ) plottet mot modenheten til betongen



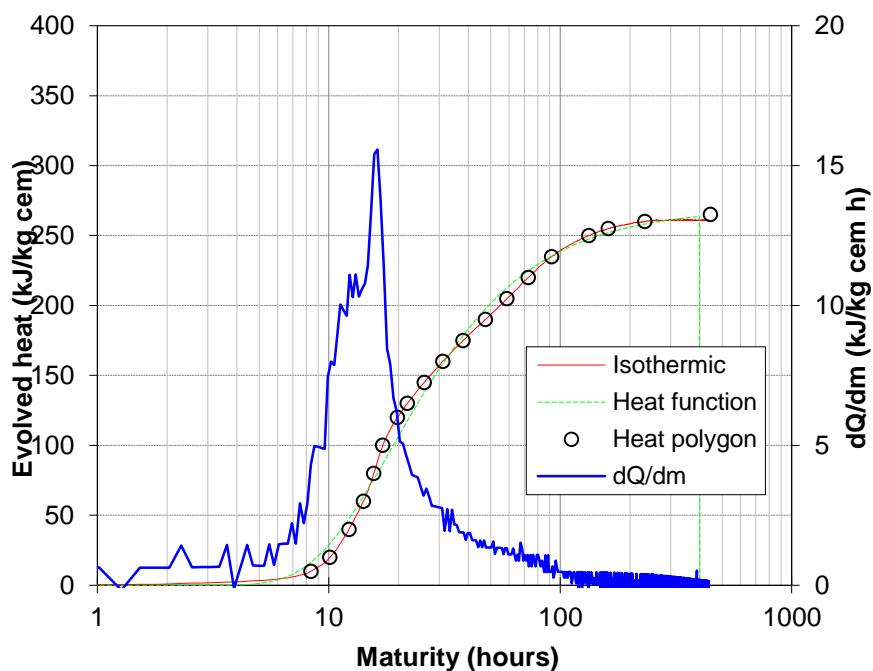
Figur 46 Målt temperatur (Measured) i herdekasse, omliggende temperatur og Adiabatisk temperatur

Legg merke til intensiteten til varmeutviklingen i Figur 45, varmeutviklingen går mye langsommere her enn i referansebetongen. Som skyldes høyere andel FA, se kapittel 2.8.

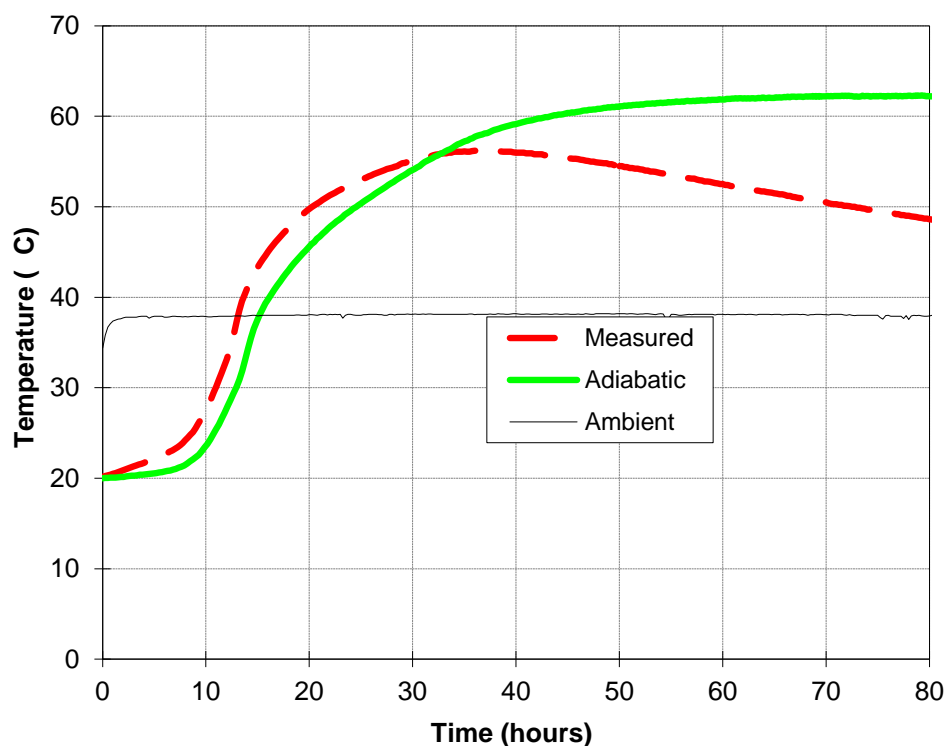
*Effekten av lavvarmebetong på fasthetsutviklingen og rissrisiko i anleggskonstruksjoner utsatt for fastholding*

### Anlegg FA med 20 % ekstra FA og middels dose HA (Resept 4):

I Figur 47 er det vist isotermisk varmeutvikling og stigningstall til denne kurven. Figur 48 viser målt temperaturutvikling og adiabatisk temperaturutvikling.



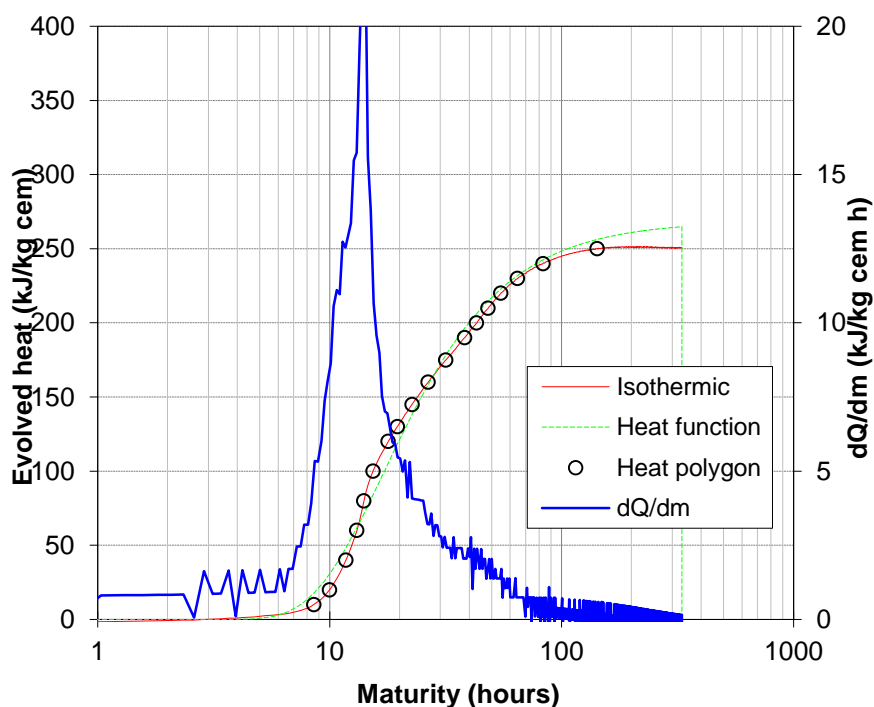
Figur 47 Utviklet varme (Isothermic) og stigningstallet til kurven ( $dQ/dm$ ) plottet mot modenheten til betongen.



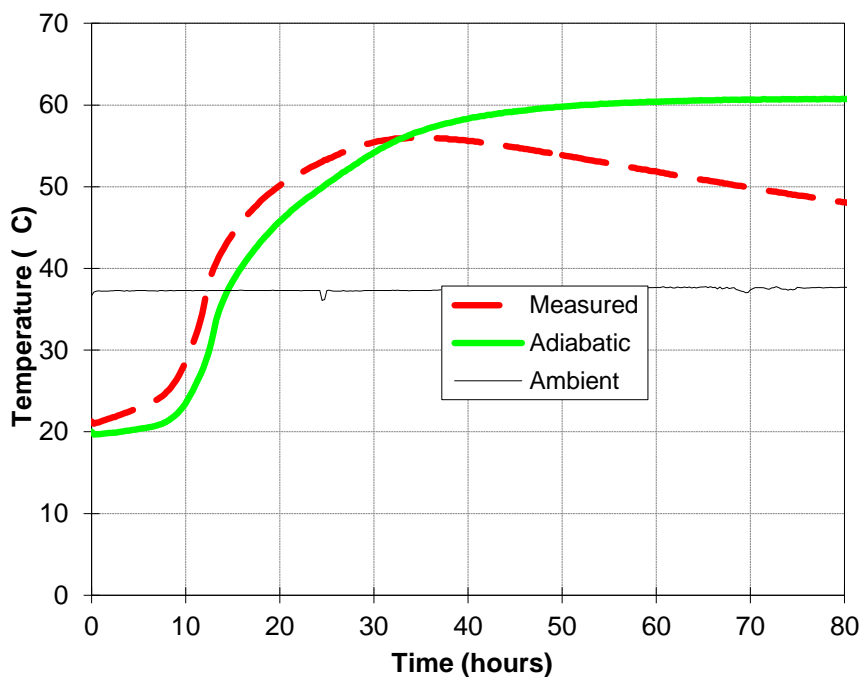
Figur 48 Målt temperatur(Measured) i herdekasse, omliggende temperatur(Ambient) og Adiabatisk temperatur(Adiabatic)

### Anlegg FA med 20 % ekstra FA og høy dose HA (Resept 6):

I Figur 49 er det vist isotermisk varmetvikling og stigningstall til denne kurven. Figur 50 viser målt temperaturutvikling og adiabatisk temperaturutvikling.



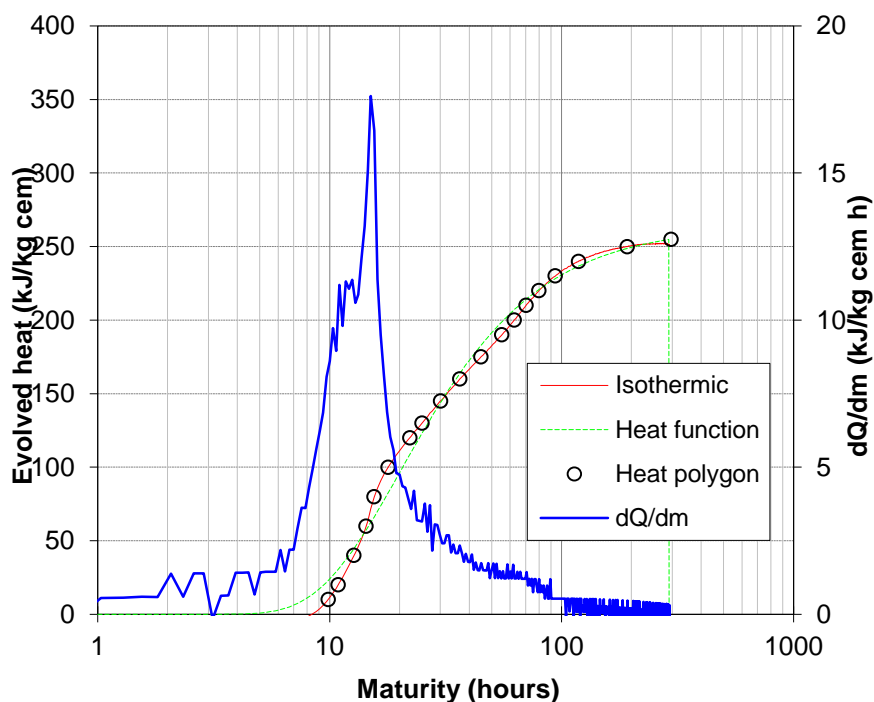
Figur 49 Utviklet varme(Isothermic) og stigningstallet til kurven( $dQ/dm$ ) plottet mot modenheten til betongen



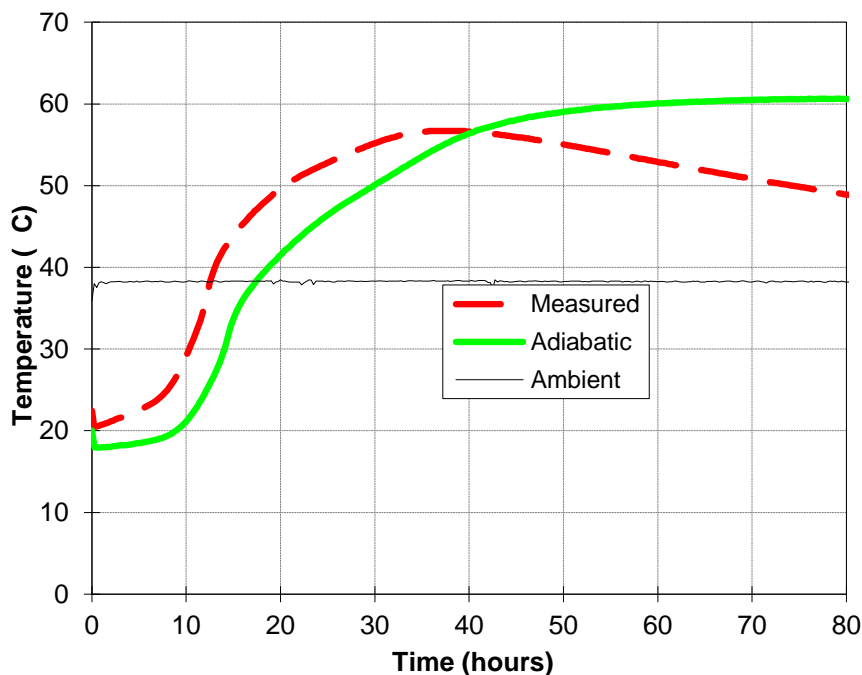
Figur 50 Målt temperatur(Measured) i herdekasse, omliggende temperatur(Ambient) og Adiabatisk temperatur(Adiabatic)

### Anlegg FA med 20 % ekstra FA, SA og høy dose HA (Resept 7):

I Figur 51 er det vist isothermisk varmetvikling og stigningstall til denne kurven. Figur 52 viser målt temperaturutvikling og adiabatisk temperaturutvikling.



Figur 51 Utviklet varme (Isothermic) og stigningstallet til kurven ( $dQ/dm$ ) plottet mot modenheten til betongen.



Figur 52 Målt temperatur(Measured) i herdekasse, omliggende temperatur(Ambient) og Adiabatisk temperatur(Adiabatic)

I de tre siste betongen (Resept 4, 6 og 7) med 20 % ekstra FA, kan man tydelig se at HA påvirker varmeutviklingen, se Tabell 11. Ikke bare får man en høyere varmeutvikling ( $Q_{300}$ ) i disse betongene, i forholdt til Resept 2, men det er også en langt høyere intensitet på varmeutvikling ( $dQ/dM$ ) mellom 10 og 20 modenhetstimer. Intensiteten til varmeutviklingen øker med i overkant av 70 % fra betongen uten HA (Resept 2) til den med middels dose HA (Resept 4). Tilsvarende øker den med omtrent 140 % fra Resept 2 til betongen med høy dose HA (Resept 6). Videre fører dette til at Resept 2 får en langt slakere varmeutviklingskurve enn betongene med lik andel FA som er tilsatt HA.

Det er også forskjell mellom referansebetongen (Resept 1) og Anlegg FA med høy dose HA (Resept 5), når det kommer til varmeutvikling og dens intensitet. Samme tendensen vises her, HA øker den totale varmeutviklingen samt intensiteten til varmeutviklingen mellom 10- og 20 modenhetstimer.

En annen trend som kan leses ut av Tabell 11, er at tidspunktet for når intensiteten er størst påvirkes av HA. Samtlige betonger uten HA får toppunktet for varmeutviklingens intensitet ved et senere tidspunkt enn tilsvarende betonger med HA. Det ser ikke ut til at tidspunktet varierer med størrelsen på dosen i særlig stor grad.

Dataen fra Figur 39 til Figur 52 er troverdige, siden kurven som sier noe om varmeutviklingens hastighet ( $dQ/dm$ ) er såpass jevn.



Tabell 11 Nøkkeltall fra herdekassene

	Anlegg FA	Anlegg FA + 10 %	Anlegg FA + 20 %
Ingen HA eller SA	Resept 1	Resept 3	Resept 2
	$Q_{300}$ [kJ/kg sem] 302	$Q_{300}$ [kJ/kg sem] 270	$Q_{300}$ [kJ/kg sem] 245
	$\Delta\theta_{\text{adiabatisk}}$ [°C] 51	$\Delta\theta_{\text{adiabatisk}}$ [°C] 47	$\Delta\theta_{\text{adiabatisk}}$ [°C] 39
	$dQ/dM_{\text{max}}$ [kJ/kg sem t] 20	$dQ/dM_{\text{max}}$ [kJ/kg sem t] 16	$dQ/dM_{\text{max}}$ [kJ/kg sem t] 9
	Tidspunkt for $dQ/dM_{\text{max}}$ 18	Tidspunkt for $dQ/dM_{\text{max}}$ 17	Tidspunkt for $dQ/dM_{\text{max}}$ 23
Middels dose HA	-	-	Resept 4
	-	-	$Q_{300}$ [kJ/kg sem] 260
	-	-	$\Delta\theta_{\text{adiabatisk}}$ [°C] 42
	-	-	$dQ/dM_{\text{max}}$ [kJ/kg sem t] 16
Høy dose HA	Resept 5		Resept 6
	$Q_{300}$ [kJ/kg sem] 305		$Q_{300}$ [kJ/kg sem] 252
	$\Delta\theta_{\text{adiabatisk}}$ [°C] 52	-	$\Delta\theta_{\text{adiabatisk}}$ [°C] 42
	$dQ/dM_{\text{max}}$ [kJ/kg sem t] 22		$dQ/dM_{\text{max}}$ [kJ/kg sem t] 22
	Tidspunkt for $dQ/dM_{\text{max}}$ 16		Tidspunkt for $dQ/dM_{\text{max}}$ 15
Høy dose HA + SA	-	-	Resept 7
	-	-	$Q_{300}$ [kJ/kg sem] 252
	-	-	$\Delta\theta_{\text{adiabatisk}}$ [°C] 43
	-	-	$dQ/dM_{\text{max}}$ [kJ/kg sem t] 17,5
			Tidspunkt for $dQ/dM_{\text{max}}$ 16

### 3.8 Parameterne for varmemengden

Resultater fra herdekassene som brukes til input i Cracktest COIN er vist i Tabell 12. Tabell 13 viser maksimumstemperaturen i betongene. Parameterne for varmemengden er funnet gjennom Excel-arket herdekasseskjema, utviklet av Sverre Smeplass. Disse er basert på forsøkene vist i Figur 39 til Figur 52.

**Tabell 12 Varmemengde og parametere til varmemengden, se Ligning 2.7**

Parameterne til varmemengden						
	Anlegg FA		Anlegg FA + 10 %		Anlegg FA + 20 %	
Ingen HA eller SA	Resept 1		Resept 3		Resept 2	
	$Q_{\infty}$	305	$Q_{\infty}$	287	$Q_{\infty}$	254
	$\tau$	17,34	$\tau$	16,86	$\tau$	25,01
	$\alpha$	1,86	$\alpha$	1,43	$\alpha$	1,34
Middels dose HA	-		-		Resept 4	
					$Q_{\infty}$	269
					$\tau$	18,83
					$\alpha$	1,27
Høy dose HA	Resept 5		-		Resept 6	
	$Q_{\infty}$	310			$Q_{\infty}$	269
	$\tau$	16,24			$\tau$	17,09
	$\alpha$	1,58			$\alpha$	1,44
Høy dose HA + SA	-		-		Resept 7	
					$Q_{\infty}$	264
					$\tau$	20,17
					$\alpha$	1,25

Varmemengde i Resept 1 og 3 korresponderer veldig bra overens med herdekassedata fra Bjørvika tunnelen. Vi får en reduksjon i varmemengde på i overkant av 20 % fra referansebetongen til betongen med 20 % ekstra FA. Dette stemmer også bra med erfaringer gjort i Bjørvika. [31]

Et viktig resultat fra forsøkene er at varmemengden ( $Q_{\infty}$ ) øker når betongene blir tilsatt HA, noe som ikke er fordelaktig med tanke på temperaturøkning. Dette vil påvirke rissindeksen i negativ retning under analysen i CrackTeSt COIN. Det er ingen tydelig forskjell mellom størrelse på dosen av HA og varmeutviklingen.

**Tabell 13 Maksimumstemperatur i betongene fra herdekasseforsøk**

Maks temperatur						
	Anlegg FA		Anlegg FA + 10 %		Anlegg FA + 20 %	
Ingen HA eller SA	Resept 1	63,2 °C	Resept 3	59,2 °C	Resept 2	54,9 °C
Middels dose HA	-		-		Resept 4	56,2 °C
Høy dose HA	Resept 5	63,7 °C	-		Resept 6	56 °C
Høy dose HA + SA	-		-		Resept 7	56,7 °C

Ifølge målingene i Tabell 13 er det en klar trend at den målte maksimumstemperaturen øker når HA blir tilsatt. Dette er i strid med databladet til betongen, som hevder at maksimumstemperaturen ikke skal øke (Vedlegg C - Datablad).



## 4 Bruk av rissanalyseprogram

### 4.1 Hensikt

I dette kapittelet blir det gitt en helhetlig innføring i bruken av rissanalyseverktøy for herdende betongkonstruksjoner. Videre blir resultater fra temperatur- og spenningsutvikling i aktuelle betongtverrsnitt presentert.

Det vil bli gjennomgått valg av antagelser for analysens geometri og rammevilkår, samt hvilke parametere som er brukt i beregningene. Dataverktøyet CrackTeSt COIN ble benyttet.

### 4.2 Bruken av Rissanalyseverktøy

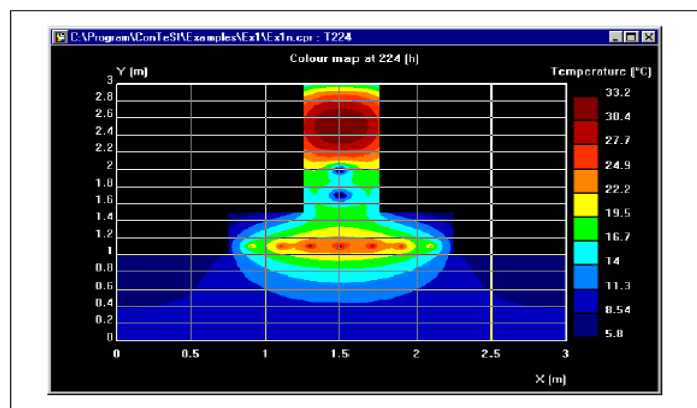
Frem til 1980-tallet har flere forsøkt å utvikle generelle modeller for effekt av temperatur og styrke i betongkonstruksjoner. Det ble prøvd å lage fremgangsmåter for å behandle fastholdings- og rissproblemer med viskoelastisk oppførsel fra temperaturmålinger og -gradienter med grafiske håndberegninger. Disse tok utgangspunkt i prinsippene til Saul [32] om modenhet.

På 70-tallet ble det i Skandinavia startet et arbeid med å utvikle dataverktøy, for å kunne beregne temperatur- og spenningstilstand i herdende betongkonstruksjoner. Etter flere utbedringer og oppdateringer ble programmene 4C-Temp & Stress(Danmark) og ConTeSt Pro(Sverige) utgitt i 1992 og 1995 [12].

Problematikken rundt rissdannelse i herdende betongkonstruksjoner har hatt svært lite fokus i Norge. Det er ytterst få med kompetanse innenfor dette fagområdet. Noe som er svært uheldig siden disse verktøyene på en enkel måte kan benyttes i prosjektering, slik at det på lang sikt oppnås estetiske og vanntette konstruksjoner. Derfor ble senketunnelen i Bjørvika en milepel i den forstand. For å sørge for rissfrie konstruksjoner måtte de involverte aktørene utføre eksperimenter på herdende betong. Det ble satt som et mål at rissindeksen ikke skulle overstige 0,75, ved beregninger av spenningsutvikling på grunn av fastholdt termisk og autogen dilatasjon. Dette prosjektet har satt standarden for fremtidens rissanalyse. [33]

### 4.3 CrackTeSt COIN Ver.2011

Temperatur- og spenningsverktøyet CrackTeSt COIN er en modifisert versjon av det svenske programmet ConTeSt Pro (2½D) 2008, justert for norsk modelleringstradisjon og betong design. Programmet er FEM-basert. Utgivelsen ble gjort som et initiativ i form av et COIN-prosjekt i 2011.



Figur 53 Illustrasjonsbilde fra ConTeSt Pro 2008 [34]

ConTeSt Pro ble utarbeidet for å beregne temperatur, styrke og rissrisiko i herdende betongkonstruksjoner. Derfor er programmet ment som et verktøy til å forutse rissdannelse før støping. Programmet har applikasjoner med kjølerør og varmekabler, som gjør det mulig å studere eventuelle tiltak for å redusere rissindeksen. Programmet er et såkalt 2½D som betyr at forutsetningene for konstruksjonens rotasjons- og tøyingsfrihet kan angis. Dette vil påvirke spenningsfordelingen [12]. Alle temperaturer i CrackTeSt COIN blir beregnet i 2D(xy-planet), se Figur 54. Her forutsettes det at konstruksjonen er lang nok i z-retning til at varmestrøm kan neglisjeres, som betyr at følgende tilnærming er gjeldende: [34]

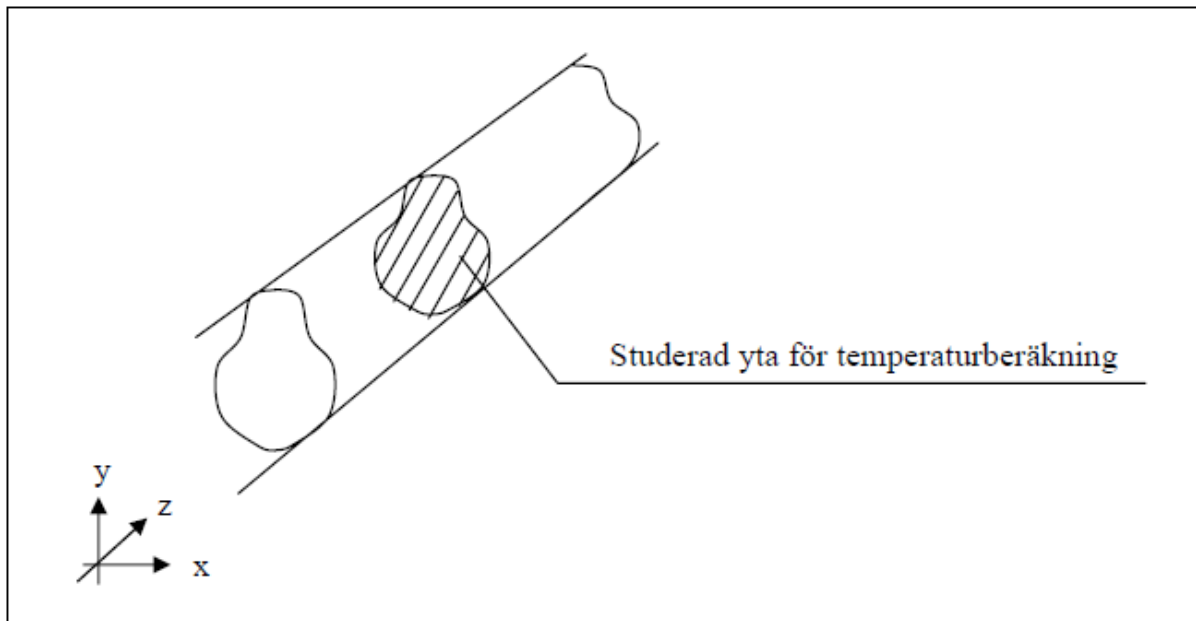
$$q_z = -k_z \frac{\partial T}{\partial z} \approx 0$$

Ligning 4.1

$q_z$  - Varmestrøm i z-retning [ $\text{W m}^{-2}$ ]

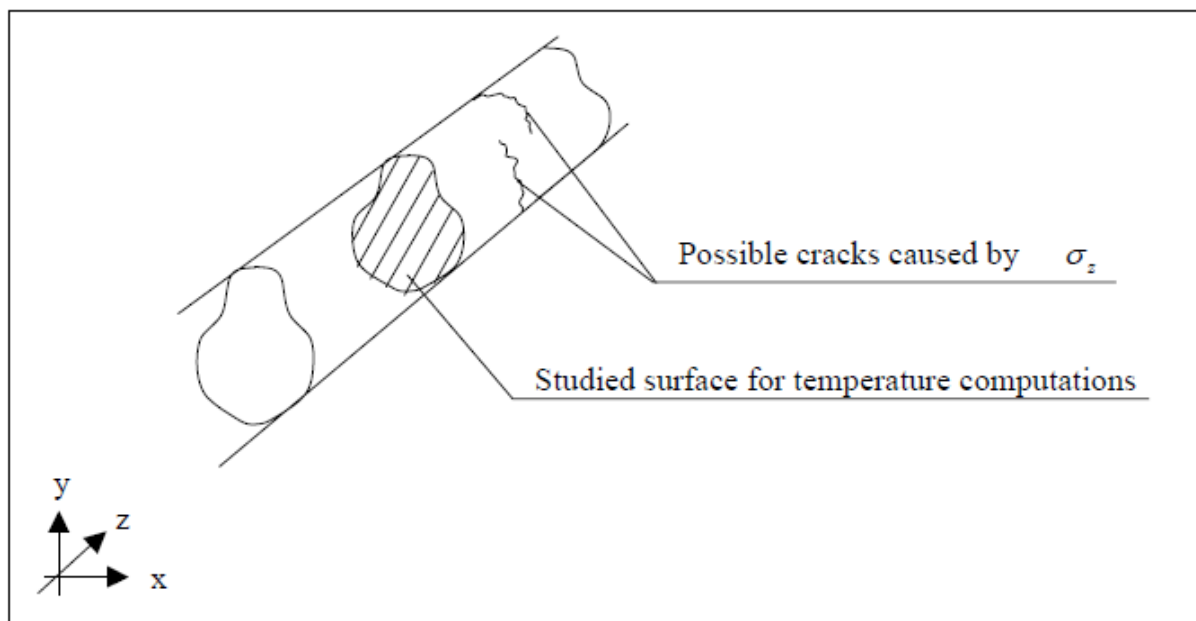
$k_z$  - konduktivitet for varmestrøm i z-retning [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]

T - Temperatur i konstruksjon [ $^{\circ}\text{C}$ ]



Figur 54 Illustrasjon av område for beregning av varme [34]

Alle spenningskalkuleringene i CrackTeSt COIN består av spenninger i den ortogonale retningen til der hvor temperaturene ble beregnet. Dette medfører at spenningene i z-retning gir rissdannelse normalt som vist i Figur 55. I programmet vil rissdannelse bli vist som rissindeks i x- eller y-retningen. [34]



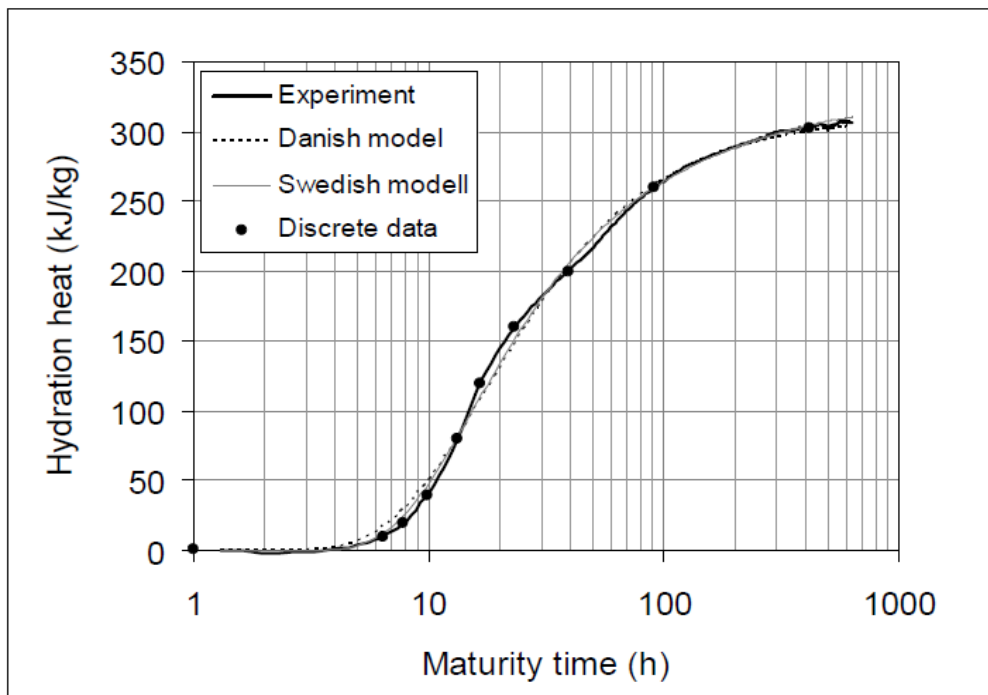
Figur 55 Illustrasjon av rissdannelse normalt på z-retning [34]

#### 4.4 Simulering av varmeutvikling

Databaserte herdingsprogrammer trenger informasjon om varmeutvikling i betong for å beregne temperatur- og spenningstilstanden. Målingene av betong fra herdekassene ble lagt inn i regneark som beregnet den adiabatisk og isothermiske varmeutviklingen samt betongens temperaturtransmisjonskoeffisient. For å kunne nyttiggjøre informasjonen fra herdekassene ble parameterne i Ligning 2.7 kalibrert slik at de stemmer overens med de empiriske verdiene fra herdekassene. Ligningen ble introdusert av Freiesleben-Hansen [35] i Danmark og benyttes i analyseverktøyet 4C Temp&Stress.

Ekspontialfunksjonen som blir benyttet i Sverige og i ConTeSt Pro er gitt i Ligning 2.8. Den norske versjonen CrackTeSt COIN har også denne funksjonen implementert.

Som det fremgår av de forskjellige ligningene innehar den svenske egenskapsfunksjonen for varmeutvikling fem faktorer, mens den danske kun har tre. Forskjellen skyldes at de ulike uttrykkene har blitt utledet uavhengig av hverandre, men med felles utgangspunkt i modenheten.



Figur 56 Eksempel med isotherm varmeutvikling for betong(CEM II/AV) og beste tilnærming av de to modellene, samt diskrete data [12]

Som det fremgår av Figur 56 passer den svenske og danske modellen svært godt overens. Figuren tar utgangspunkt i en betong med flygeaske(CEM II/AV). Som det fremkommer av Figur 56 vises det at modellene har noe avvik fra de diskrete verdiene. Disse avvikene er typiske ved bruk av den svenske og danske modellen for betonger med innhold av pozzolaner. Dette skyldes at modellene er utarbeidet for betonger uten pozzolaner hvor kurveforløpet har en mer S-formet natur. Det bør bemerkes at unøyaktigheter i temperatursimuleringene vil ha et direkte utslag på videre simuleringer av spenningene [12]. Avvikene vil ha mest å si for varmeutviklingen, og ikke verdien til maksimal temperatur. For å



eliminere disse unøyaktighetene er det ønskelig å benytte de diskrete dataene direkte fra varmeutviklingen til spenningssimulering. Den nye versjonen av CrackTeSt COIN som blir utviklet våren 2012 tar høyde for nettopp dette [36].

For å kunne benytte parameterne i egenskapsfunksjonen for varmeutvikling ble den svenske modellen kalibrert opp mot den danske. Dermed var det mulig å få parametere for den svenske modellen som stemte overens med varmeutviklingen. Parameterne ble så benyttet i CrackTeSt COIN 2011.

## 4.5 Bakgrunn for bruk parametere og input for analyse

### 4.5.1 Generelle beregningsforutsetninger/randbetingelser

Under analysen er det brukt betonger fra laboratorieforsøkene. Enkelte parametere ble ikke undersøkte, disse er antatt. For å finne realistiske verdier har man sammenlignet de ulike betongreseptene med eksisterende betonger i Cracktest COIN. Følgende parametere er hentet på denne måten:

- E-modul
- Strekkfasthet
- Varmekonduktivitet
- Koeffisient for termisk utvidelse
- Kryp
- Autogent svinn
- Tverrkontraksjonstall

Strekkfastheten er antatt ut fra hvilken 28-døgnsfasthet betongene har. Dette har gjort at betongene med 20 % ekstra flygeaske har fått endel lavere strekkfasthet enn betongene som kun har Anlegg FA sement, siden trykkfastheten for disse er en del høyere. Ifølge Skjølsvik [37] er den viktigste parameteren som gir utslag på rissindeksen, nettopp strekkfasthet. Dette gjør at man burde være forsiktig med å sammenligne rissindeksen til betonger med ulik mengde FA, når man antar strekkfastheten. De forskjellige reseptene med lik mengde flygeaske oppnådde omtrentlig lik 28-døgnsfasthet, og derved tilnærmet lik strekkfasthet. I fundamentet og de "gamle" konstruksjonsdelene som er forbundet med de herdende betongkonstruksjonene, er det benyttet godt modne standardbetonger fra dataprogrammet. De mekaniske egenskapene står som 28-dagersverdier. Dersom de eldre konstruksjonsdelene ikke var ferdig avkjølte, ville dette vært fordelaktig i forhold til spenningstilstanden. Antagelsene vil derfor være konservative i så måte.

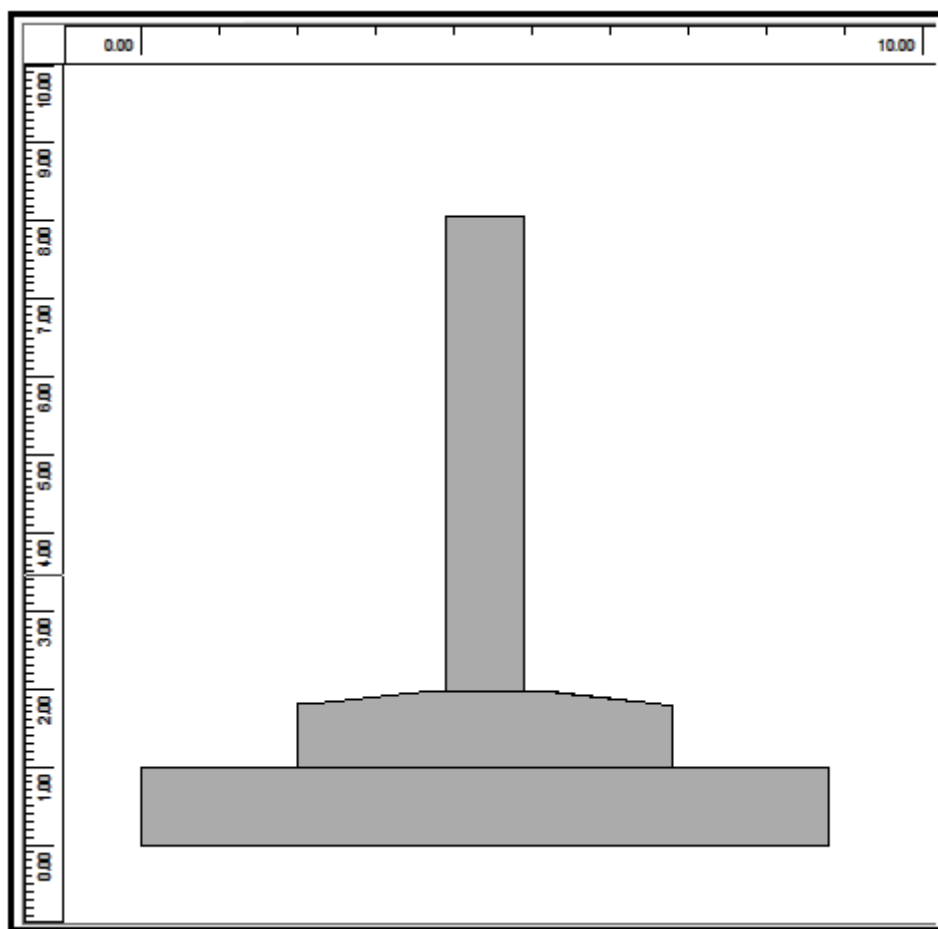
Parametere som er bestemt gjennom forsøk er:

- Aktiveringsenergi, se Ligning 2.3 og Ligning 2.4
- Parameterne til egenskapsfunksjonen for styrkeutvikling, se Ligning 2.16, Ligning 2.17 og Ligning 2.18
- Parameterne til varmeutviklingen, se Ligning 2.7

Noen av B-verdiene for aktiveringsenergien er funnet å være negative fra laboratorieprogrammet. Disse verdiene er satt til 0 i programvaren CrackTeSt COIN. Dette vil ikke ha noen stor praktisk betydning for rissutviklingen i tverrsnittene, grunnen til dette er at B-verdien kun har noe å si når betongen har en temperatur lavere enn 20 °C. Derfor har ikke dette så mye å si med tanke på rissutviklingen.

#### 4.5.2 Forutsetninger for geometri

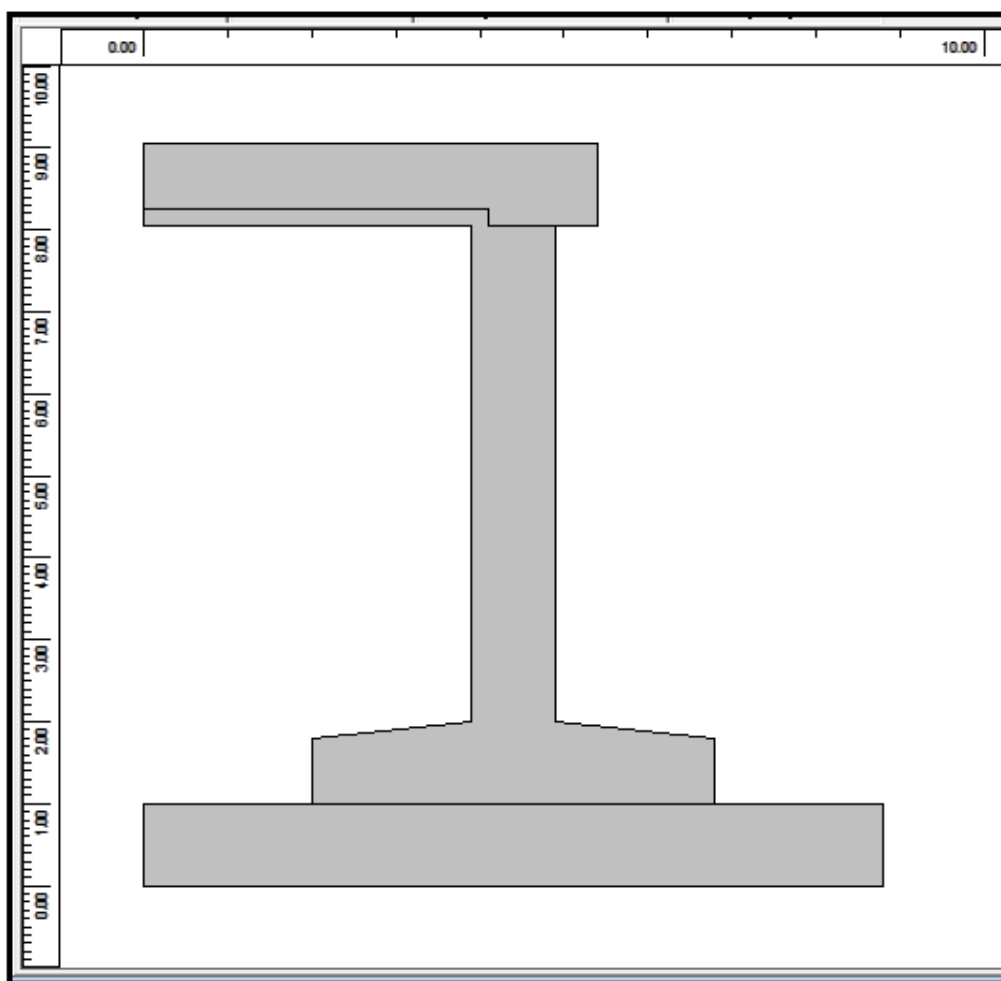
I Figur 57 vises en modell av tverrsnittet for den 1 meter tykke veggen i kulverten under flystripa på Værnes. Den midterste delen er fundamentet, mens den nederste delen er bakken, se Vedlegg D – Plantegninger Værnes.



Figur 57 Illustrasjon av vegg for analyse

Definering av de aktuelle tverrsnittene (2D) har blitt gjort på bakgrunn av detaljtegningene fra Figur 2. Tverrsnittenes utstrekning i lengderetning ansees som tilfredsstillende i henhold til forutsetningene i analyseverktøyet; 9 meter.

Ved skjøt mellom vegg og takbjelke, som vist i Figur 58, er det gjort endel antagelser. Blant annet at veggen henger sammen med nederste delen av takplata og er gammel og herdet betong. Den nederste delen av takplata er egentlig en t-bjelke som delvis (omtrent 20 cm) ligger oppå veggen, altså er det egentlig ikke heft mellom denne og veggen. Denne antagelsen er konservativ i så måte. Det er også full fastholding av rotasjon og tøyning. Ut fra detaljtegningene er det antatt at takplate er 1 meter tykk og utkrageren stikker ut en halv meter. T-bjelken har fått en tykkelse på 25 cm, dette for å kompensere for steget. Til høyre for veggen vil det i virkeligheten ligge pukkmasser under støping av takplata. Dette vil ikke påvirke våre beregninger i stor grad, siden pukkmassene ikke vil være i kontakt med den nystøpte takplata.



Figur 58 Illustrasjon av takplate

#### 4.5.3 Forutsetninger klimavariasjoner

I analysen er det valgt konstant omgivelsestemperatur på 5 °C i luft, bakke og fundament, samt konstant vindstyrke på 2 m/s. Klimaet er likt i alle simuleringer, og vil ikke ha noen påvirkning ved sammenligning av de ulike simuleringene med forskjellige betonger. Forskalingen rives 96 timer etter støpestart.

## 4.6 Temperaturutvikling og rissindeks i vegg

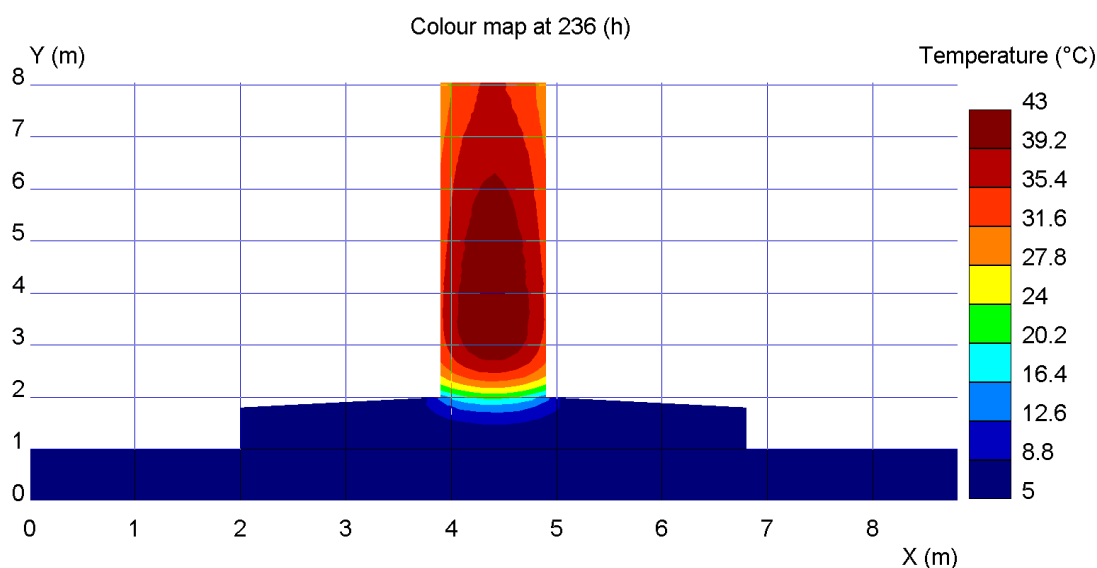
Tabell 14 er en påminner over hva de ulike betongreseptene inneholder.

Tabell 14 Beskrivelse av betongresepter

	Anlegg FA	Anlegg FA +10 % FA	Anlegg FA +20 % FA
	Resept 1	Resept 3	Resept 2
<b>Middels dose HA</b> 4 liter HA per kubikkmeter betong eller omtrent 1 % av bindemiddel	-	-	Resept 4
<b>Høy dose HA</b> 8 liter HA per kubikkmeter betong eller omtrent 2 % av bindemiddel	Resept 5	-	Resept 6
<b>Høy dose HA + SA</b> 8 liter HA per kubikkmeter betong eller omtrent 2 % av bindemiddel 4 liter SA per kubikkmeter betong eller omtrent 1 % av bindemiddel	-	-	Resept 7

### 4.6.1 Støping av vegg på fundament

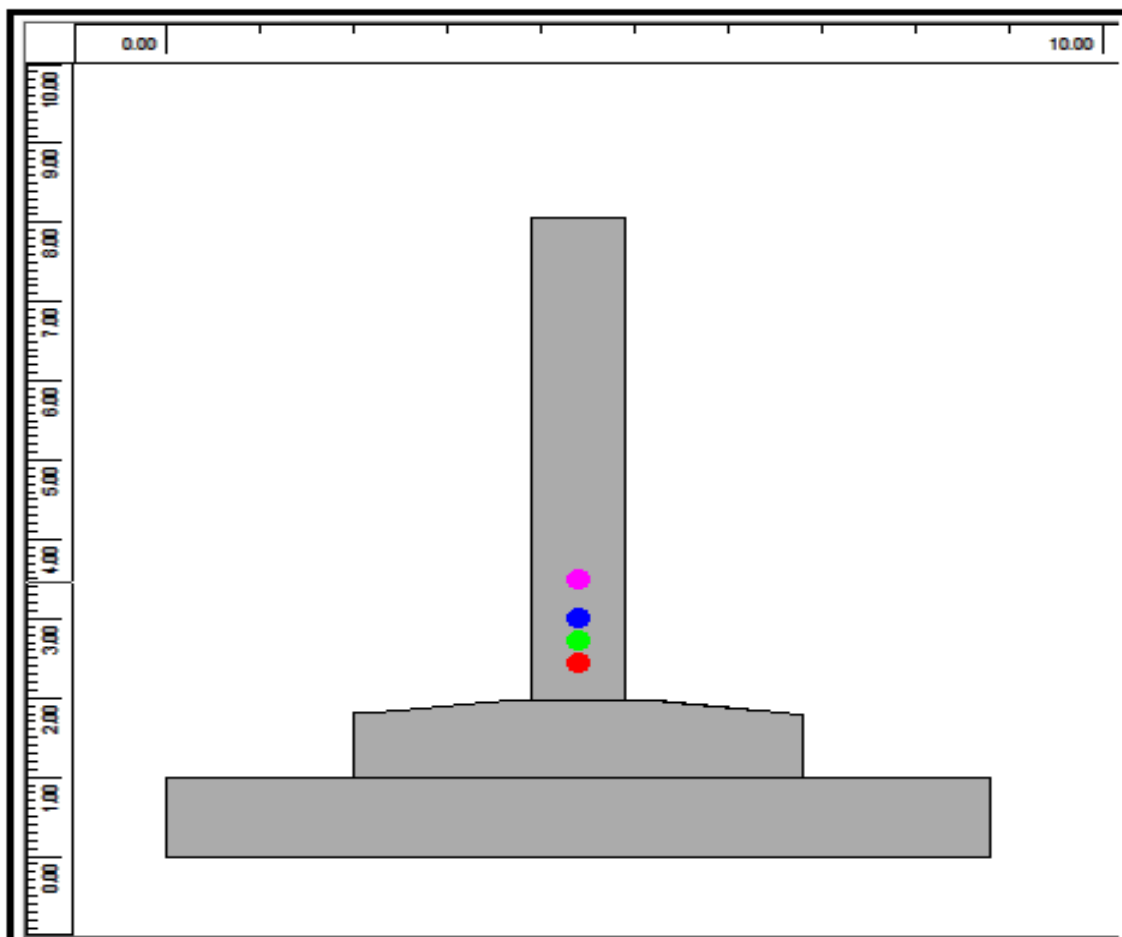
I Figur 61 til Figur 67 vises temperaturutviklingen over tid fra tverrsnittet vist i Figur 60. I Figur 59 vises et illustrasjonsbilde av temperaturløst ved 36 timer etter støp. Betongen som benyttes er med 20 % ekstra FA. Varmeste punkt er midt i vegg og kan tydelig sees i Figur 59. Under herdeperioden vil alltid midten av vegg holde høyest temperatur. Dette har med graden av isolasjon som omliggende betong utgjør, og resulterer i redusert varmetap.



Figur 59 Illustrasjon av temperaturløst 36 timer etter støp

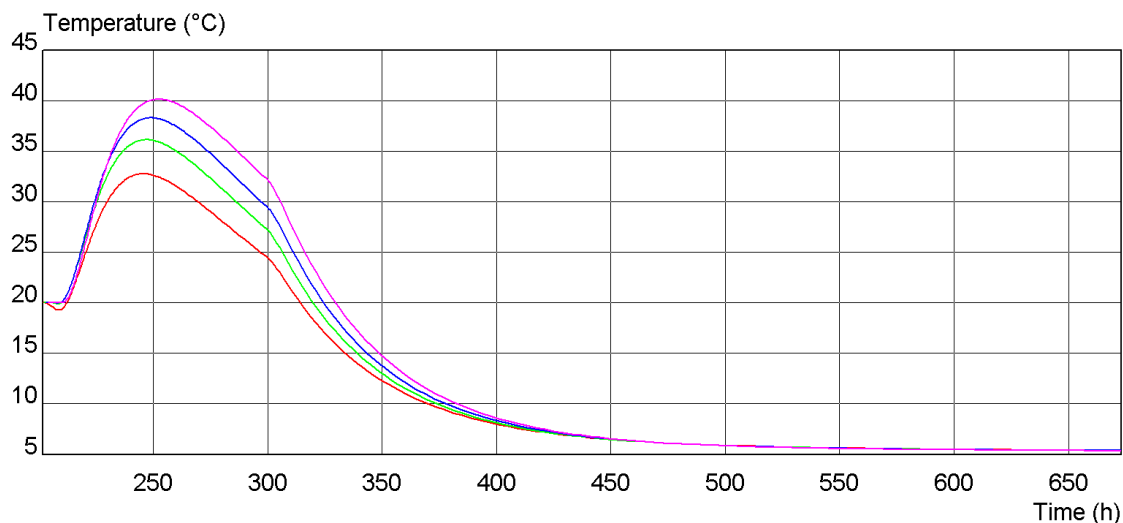
Som en følge av at temperaturen blir høyest i midten og man ønsker å avdekke hvor det er størst fare for gjennomgående riss, er punktene fra Figur 60 valgt. Alle punktene ligger midt i veggene med følgende høyde fra fundamentet:

- 0,5m - rød
- 0,75m - grønn
- 1,0m - blå
- 1,5m - lilla



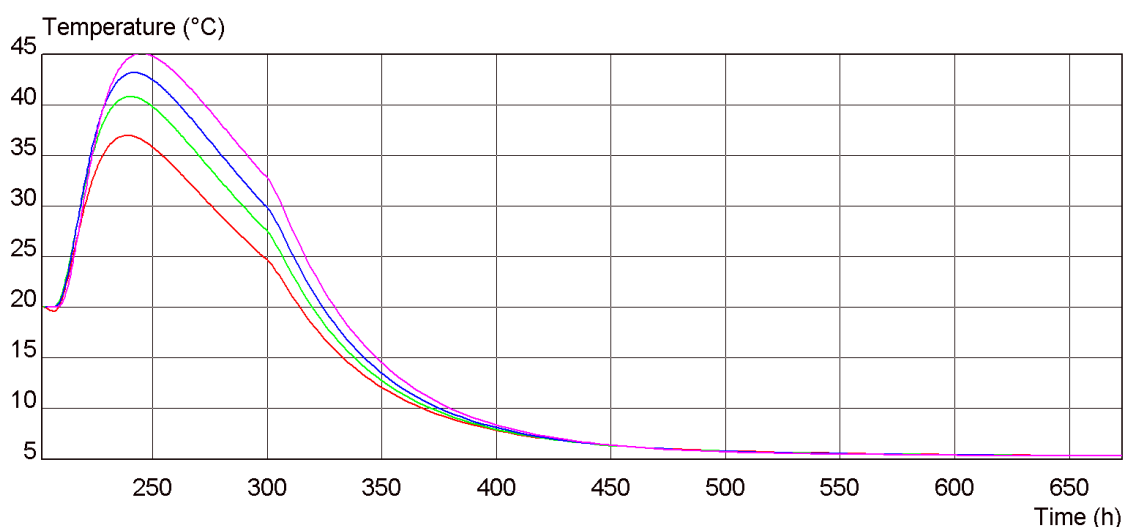
Figur 60 Illustrasjonsbilde over punkter for temperaturberegning

I Figur 61 vises temperaturforløpet til referansebetongen(Resept 1). Maksimumstemperatur ble beregnet til å være 40.1 °C og inntraff cirka 50 timer etter støp.



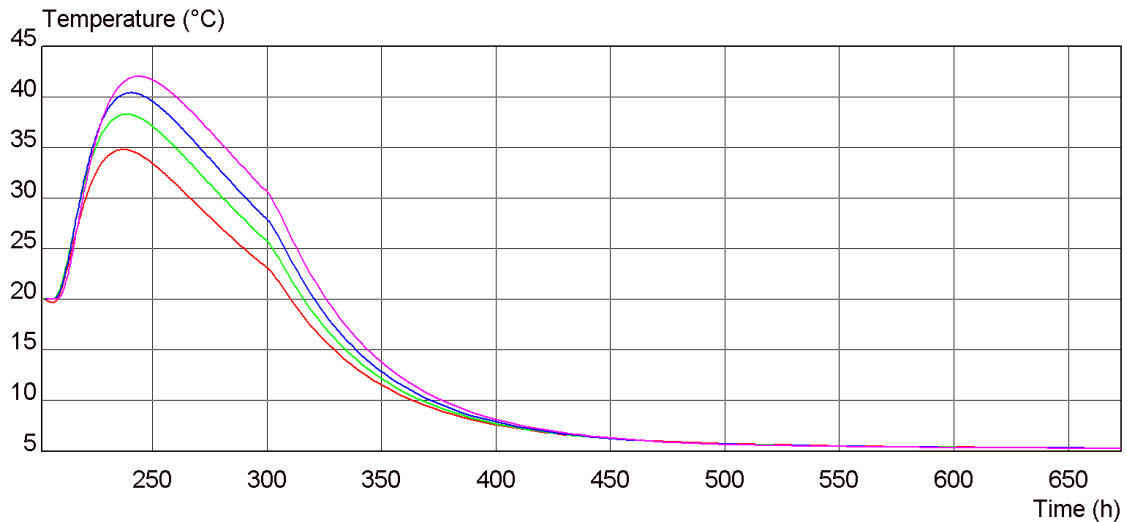
**Figur 61 Temperaturutvikling i vegg for Resept 1**

I Figur 62 vises temperaturforløpet til betongen Anlegg FA med høy mengde HA(Resept 5). Maksimumstemperatur ble beregnet til å være 45,05 °C og inntreffer cirka 45 timer etter støp. Sammenlignet med referansebetongen har betongen nesten 5 °C høyere maksimumstemperatur. Denne økningen er et resultat av at betongen inneholder HA, som diskutert i kapittel 3.8. Ut fra hva som ble observert i herdekassene er det forventet at det skulle være en temperaturredifferanse mellom disse reseptene. At økningen i temperaturen ble såpass stor var ikke forventet ut fra total varmemengde i herdekassene. Resept 1 oppnår veldig lav temperatur i denne analysen. I alle fall når man sammenligner alle reseptenes målte varmemengde kontra temperatur i analysen.



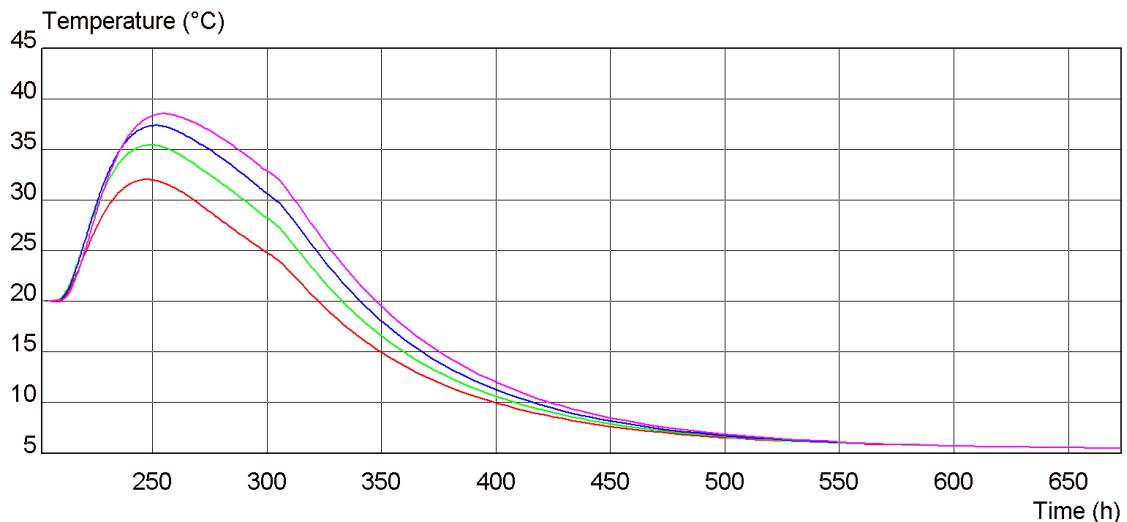
**Figur 62 Temperaturutvikling i vegg for Resept 5**

I Figur 63 vises temperaturforløpet til betong med 10 % ekstra FA(Resept 3). Maksimumstemperaturen ble beregnet til å være 42,00 °C og inntreffer cirka 45 timer etter støp. Det vil si cirka 2 °C lavere enn referansebetongen, det stemmer bra at betong med mer FA får en lavere maksimumstemperatur. Ut ifra referansebetongen og Resept 5 er det ikke mulig å kunne se noen endring i tidspunkt for maksimumstemperatur, selv om det er forventet at denne betongen skal ha langsommere varmeutvikling.



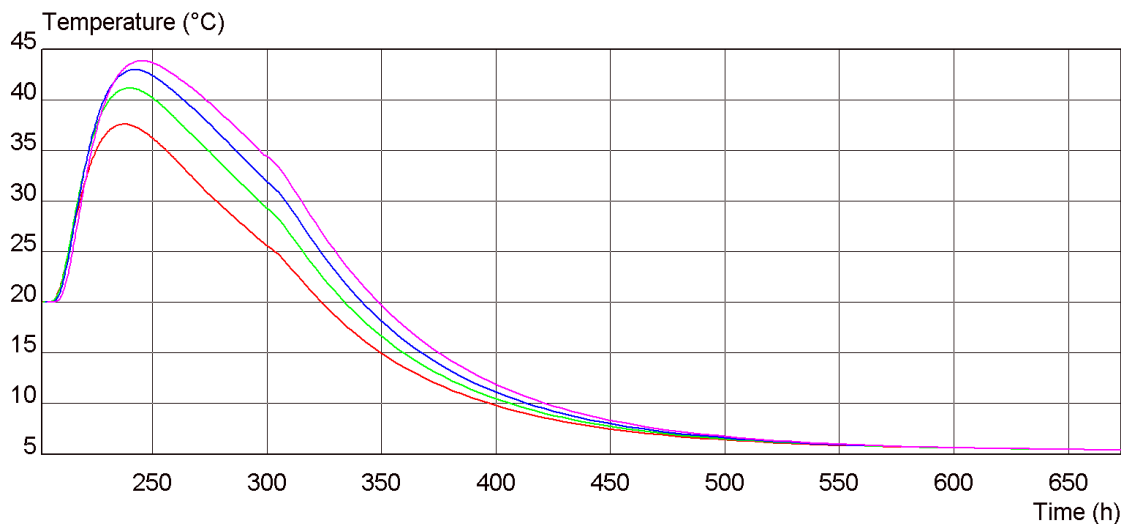
**Figur 63 Temperaturutvikling i vegg for Resept 3**

I Figur 64 vises temperaturforløpet til betong med 20 % ekstra FA(Resept 2). Maksimumstemperaturen er på 38,5 °C og inntreffer omtrent 55 timer etter støp. Dette er cirka 6 °C lavere enn referansebetongen og passer bra siden betongen inneholder 20 % mer FA. Tidspunktet for maksimumstemperatur er cirka 10 timer senere, og skyldes nok at denne type betong har en mer langsom varmeutvikling.



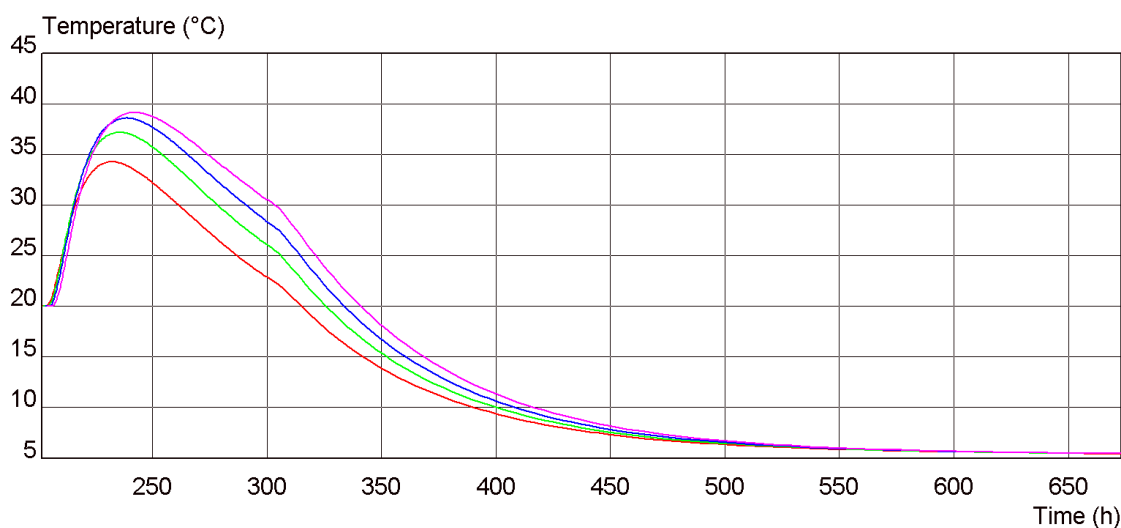
**Figur 64 Temperaturutvikling i vegg for Resept 2**

I Figur 65 vises temperaturforløpet til betong med 20 % ekstra FA og moderat dose HA (Resept 4). Maksimumstemperaturen ble beregnet til å være 43,83 °C og inntreffer cirka 45 timer etter støp. Dette er en del tidligere enn for tilsvarende betong uten HA, og har sammenheng med raskere varmeutvikling. Det at temperaturen både blir høyere og inntreffer på et tidligere tidspunkt skyldes nok bruken av HA. Fra Tabell 11 kunne man se at HA både øker den totale varmemengden og intensiteten til varmeutviklingen.



**Figur 65 Temperaturutvikling i vegg for Resept 4**

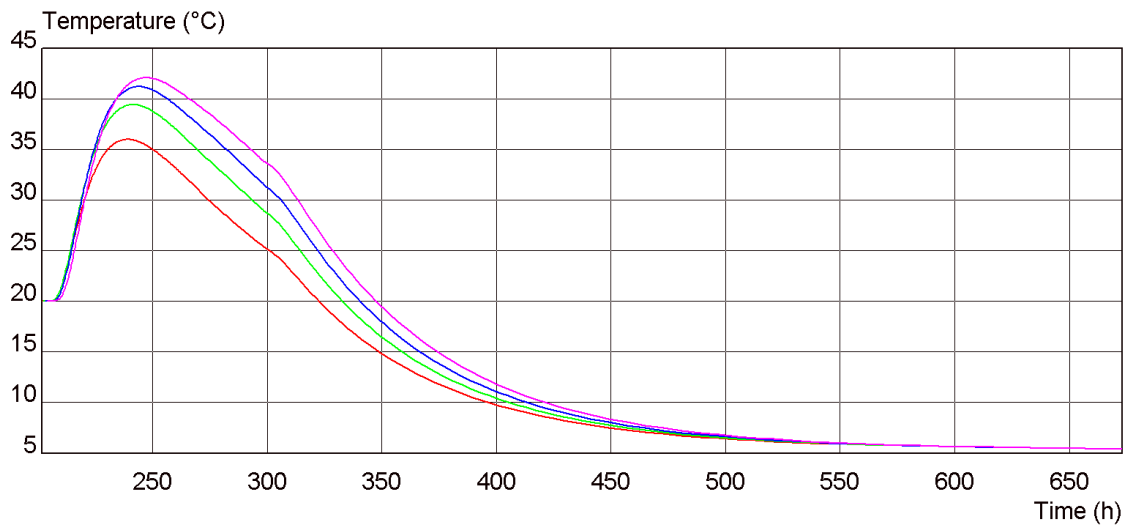
I Figur 66 viser temperaturforløpet til betong med 20 % FA og høy mengde HA (Resept 6). Maksimumstemperaturen ble beregnet til å være 39,13 °C omtrent 40 timer etter støp. Denne betongen når maksimumstemperaturen enda tidligere enn Resept 4. Det kan skyldes at varmeutviklingens intensitet var høyere på et tidlig stadium i herdekassene. Hvorfor maksimumstemperaturen blir såpass mye lavere har vi ingen god forklaring på. Total varmemengde var ikke omtrent lik mellom Resept 4 og 6 i herdekassene.



**Figur 66 Temperaturutvikling i vegg for Resept 6**



I Figur 67 vises temperaturforløpet til betong med 20 % ekstra FA med høy mengde HA og SA (Resept 7). Maksimumstemperaturen ble beregnet til å være 42,06 °C omtrent 45 timer etter støp.

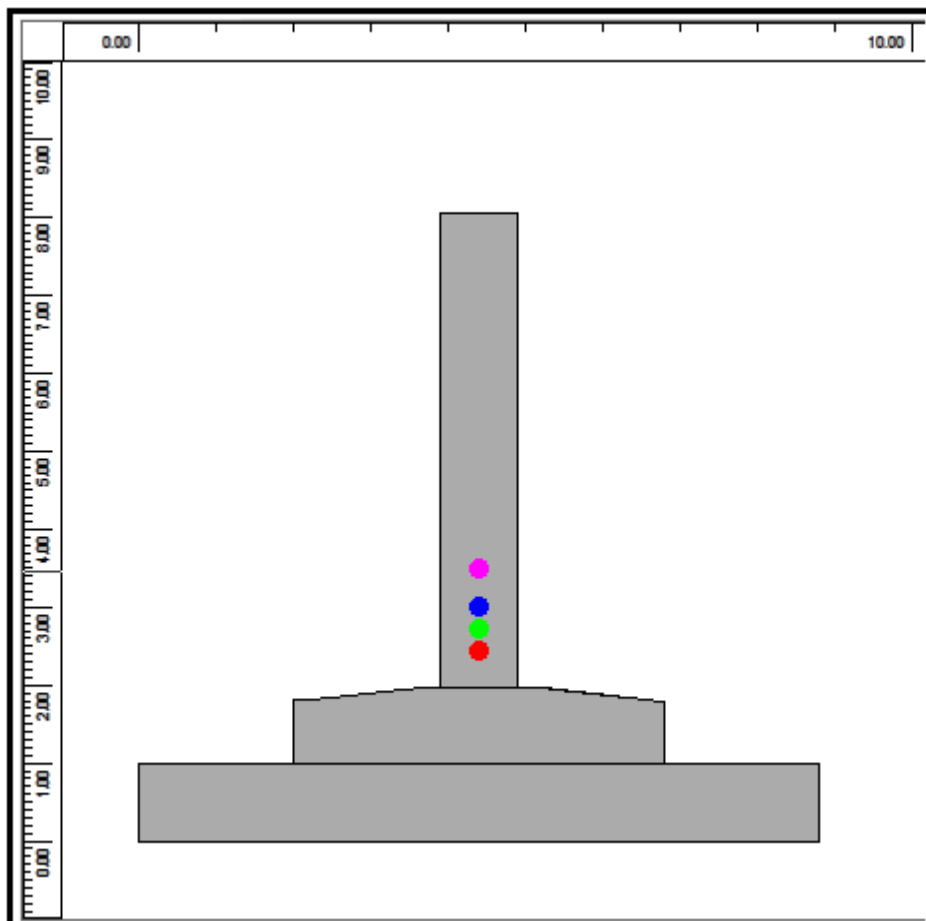


**Figur 67** Temperaturutvikling i vegg for Resept 7

Det er to trender man observerer av temperatursimuleringene i veggen. Den ene er at betongene med HA oppnår høyere maksimumstemperatur. Den andre er at tidspunktet for maksimumstemperaturen kommer tidligere. Dette har sammenheng med hva som ble observert i herdekassene. Betongne med HA fikk høyere total varmemengde, samtidig som intensiteten til varmeutviklingen var høy ved et tidlig tidspunkt.

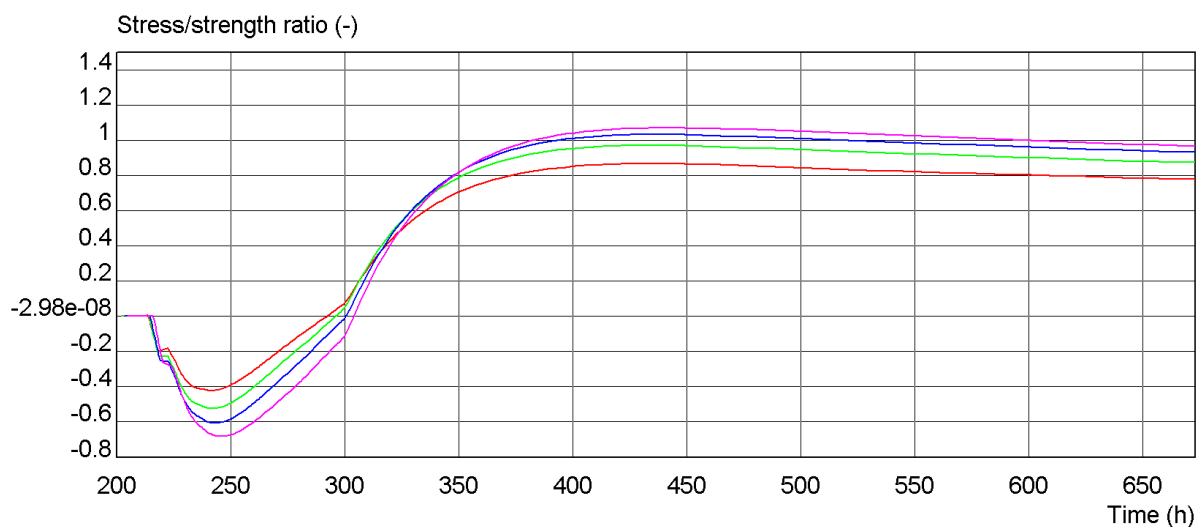
### 4.6.2 Rissindeks i vegg

I Figur 68 vises en illustrasjonsskisse over plassering av punkter for kartlegging av rissindeks. Figuren er den samme som ble benyttet i Kapittel 4.6.1



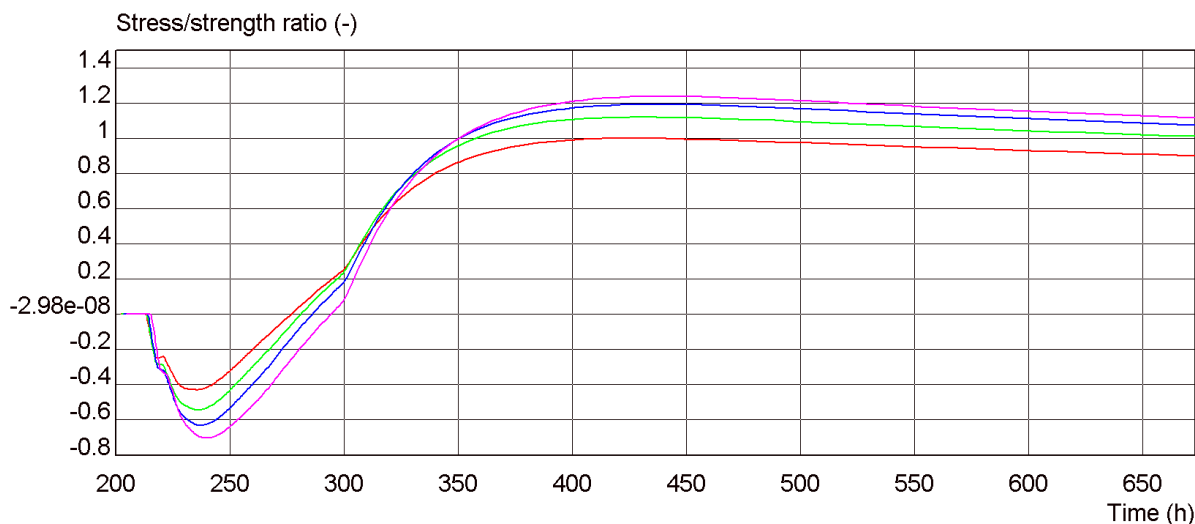
Figur 68 Illustrasjonsbilde av plassering av punkter for kartlegging av rissindeks

I Figur 69 vises forløpet av rissindeks for Referansebetongen med Anlegg FA(Resept 1). Høyest rissindeks for betongresepten er på 1,06 og forekommer omlag 245 timer etter støp. Støp starter ved 200 timer i figuren. Høyest rissindeks ble funnet 1,5 meter over fundament, som tilsvarer 1,5 veggykkelser. Grunnen til at det mest kritiske punktet befinner seg relativt høyt oppe, kan skyldes at veggene er såpass tykk og bidrar til ekstra stivhet.



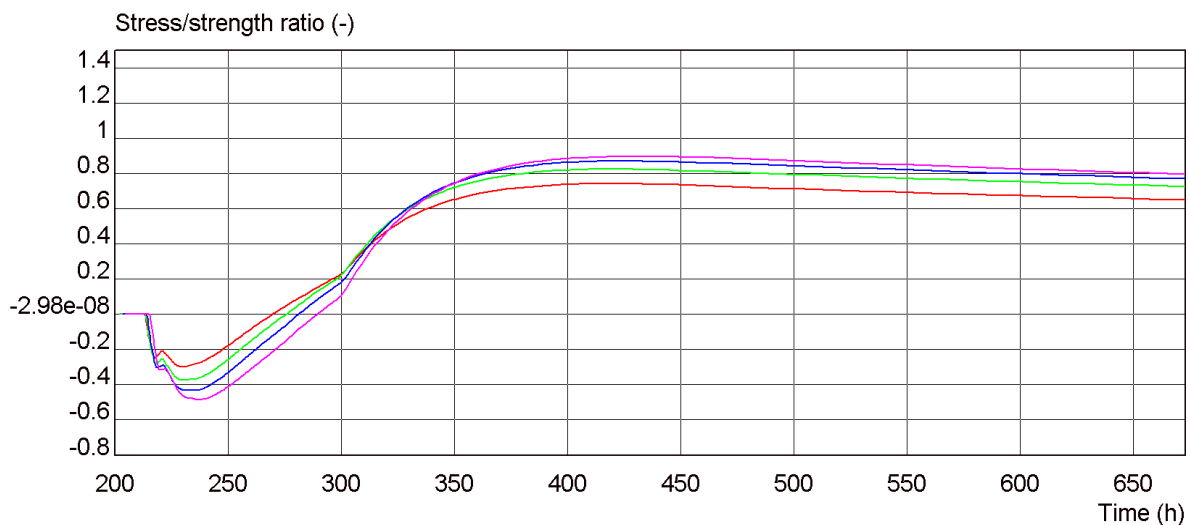
**Figur 69 Rissindeks i vegg for Resept 1**

I Figur 70 vises forløpet av rissindeks for Referansebetongen tilsatt høy dose HA(Resept 5). Mest kritisk rissindeks er på 1,264 og forekommer cirka 245 timer etter støp.



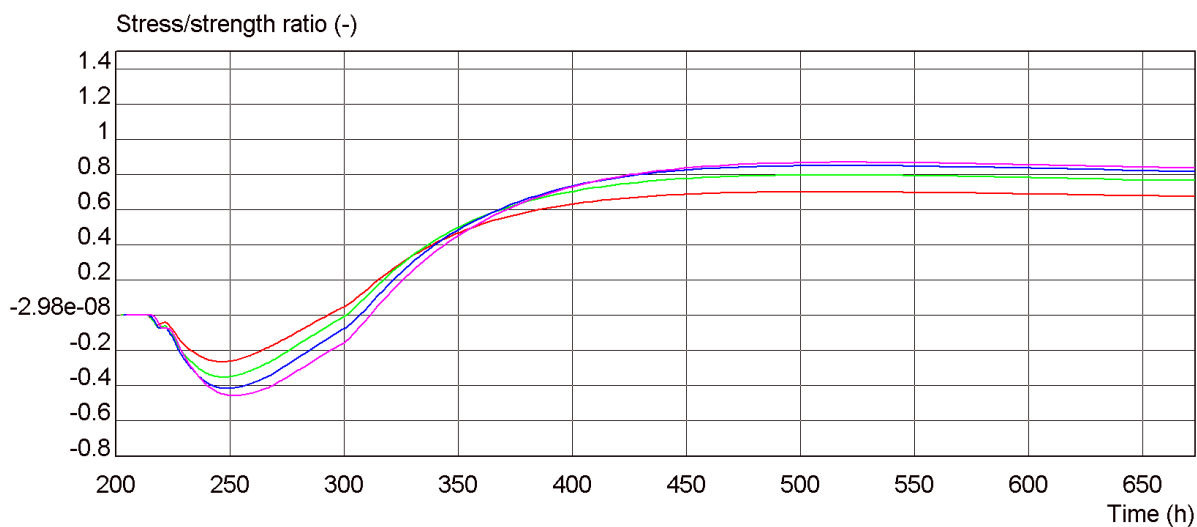
**Figur 70 Rissindeks i vegg for Resept 5**

I Figur 71 vises forløpet av rissindeks for betongen med 10 % ekstra FA(Resept 3). Høyest rissindeks for betongresepten er på 0,895 og forekommer omlag 230 timer etter støp.



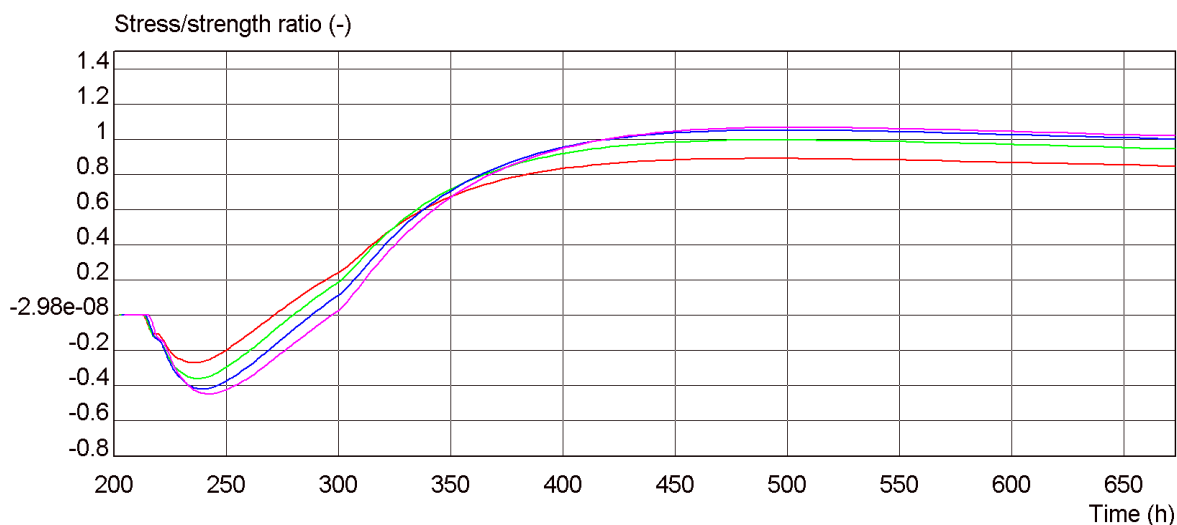
**Figur 71 Rissindeks i vegg for Resept 3**

I Figur 72 vises forløpet av rissindeks for betongen med 20 % ekstra FA(Resept 2). Mest kritisk rissindeks er på 0,868 og forekommer cirka 325 timer etter støp.



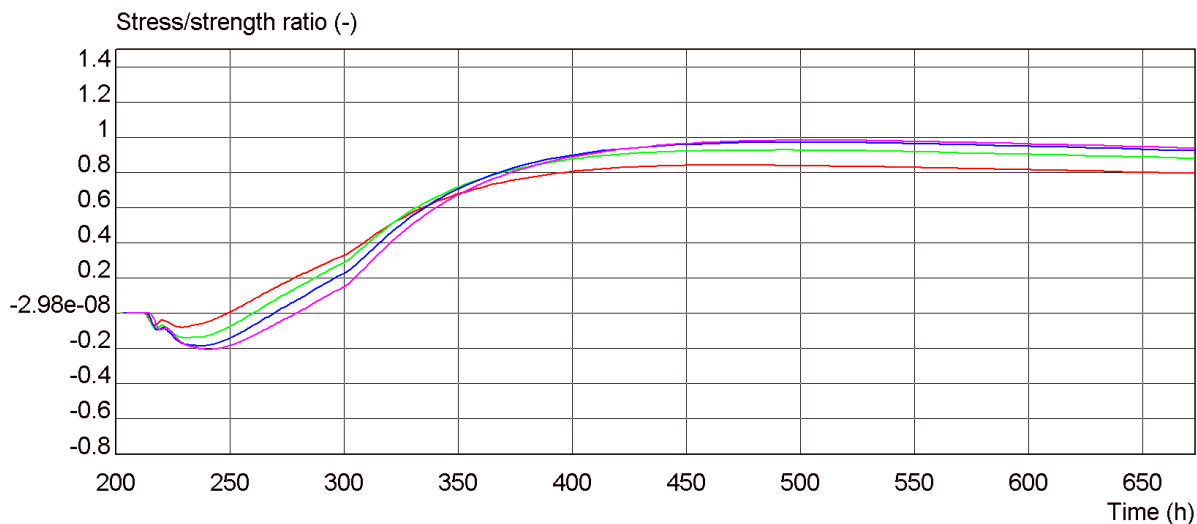
**Figur 72 Rissindeks i vegg for Resept 2**

I Figur 73 vises forløpet av rissindeks for betongen med 20 % ekstra FA med middels dose HA(Resept 4). Høyest rissindeks for betongresepten er på 1,06 og forekommer cirka 300 timer etter støp.



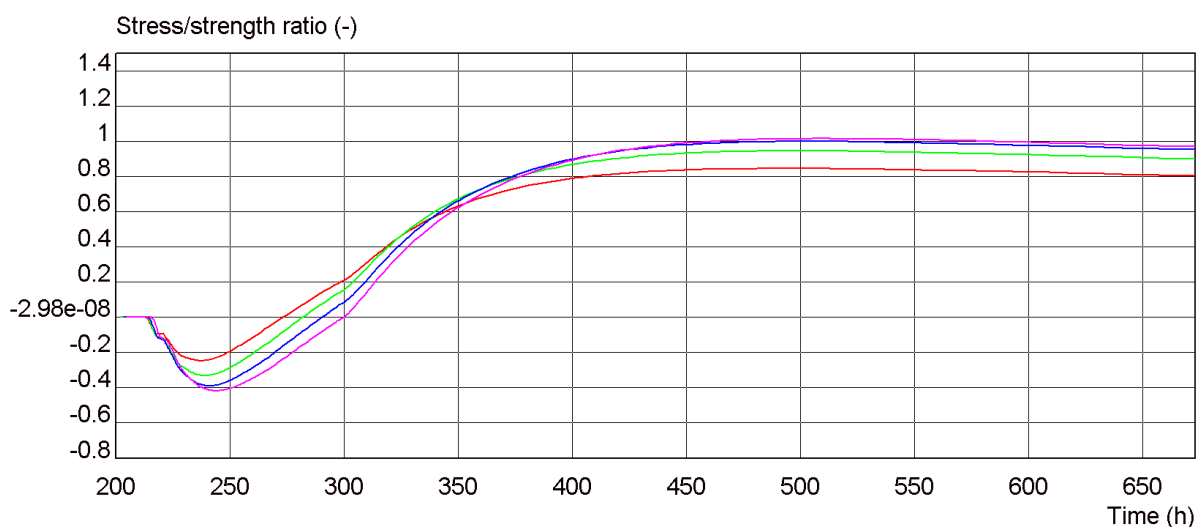
**Figur 73 Rissindeks i vegg for Resept 4**

I Figur 74 vises forløpet av rissindeks for betongen med 20 % ekstra FA med høy dose HA(Resept 6). Mest kritisk rissindeks er på 0,983 og forekommer cirka 310 timer etter støp



**Figur 74 Rissindeks i vegg for Resept 6**

I Figur 75 vises forløpet av rissindeks for betongen med 20 % ekstra FA med høy mengde HA og SA (Resept 7). Høyest rissindeks for betongresepten er på 1,014 og forekommer cirka 300 timer etter støp.



**Figur 75 Rissindeks i vegg for Resept 7**

Som man kan se av oppsummeringen i Tabell 15, er det tydelig at HA ikke har en fordelaktig virkning på betongenes rissindeks. Rissindeksen har økt i reseptene med HA i forhold til de uten. Tendensen er ganske tydelig men ikke uventet ut fra hva man så under temperaturutviklingen i tverrsnittene.

**Tabell 15 Oppsummering av maksimums rissindeks i veggen**

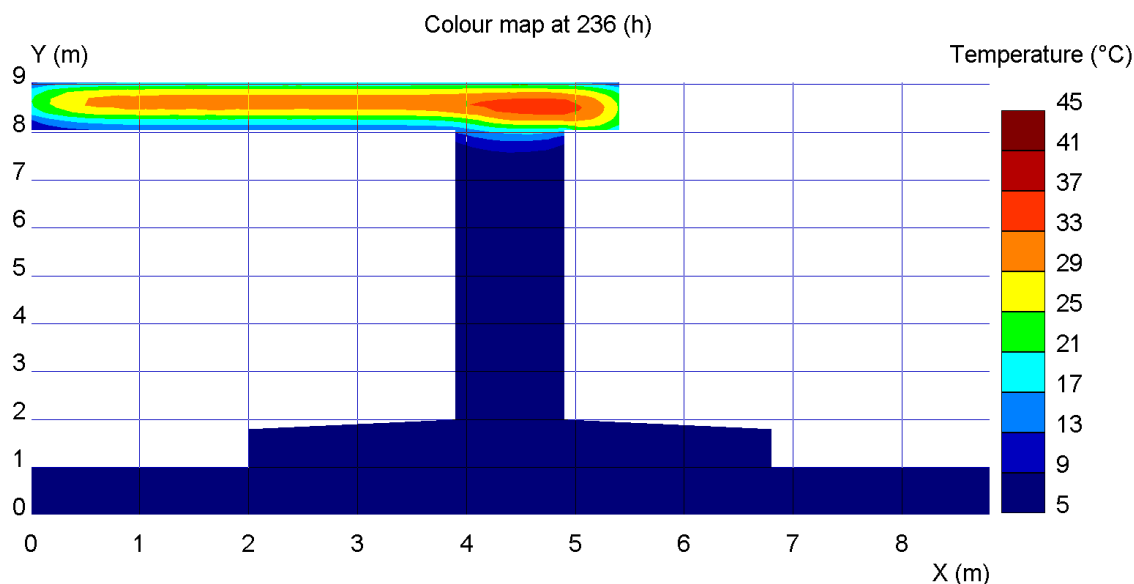
	Anlegg FA		Anlegg FA + 10 %		Anlegg FA + 20 %	
Ingen HA eller SA	Resept 1	1,06	Resept 3	0,895	Resept 2	0,868
Middels dose HA	-		-		Resept 4	1,006
Høy dose HA	Resept 5	1,264	-		Resept 6	0,983
Høy dose HA + SA	-		-		Resept 7	1,014

Som nevnt tidligere er en del av parameterne for å beregne rissindeks antatt. Dette gjelder blant annet strekkfasthet og E-modul, se mer om dette i kapittel 4.5.1. Antagelsene er basert på betonger som allerede eksisterer i CrackTeST COIN, samt erfaringsrapporten fra Bjørvika.

## 4.7 Temperaturutvikling og rissindeks i takplata

### 4.7.1 Støping av takplate

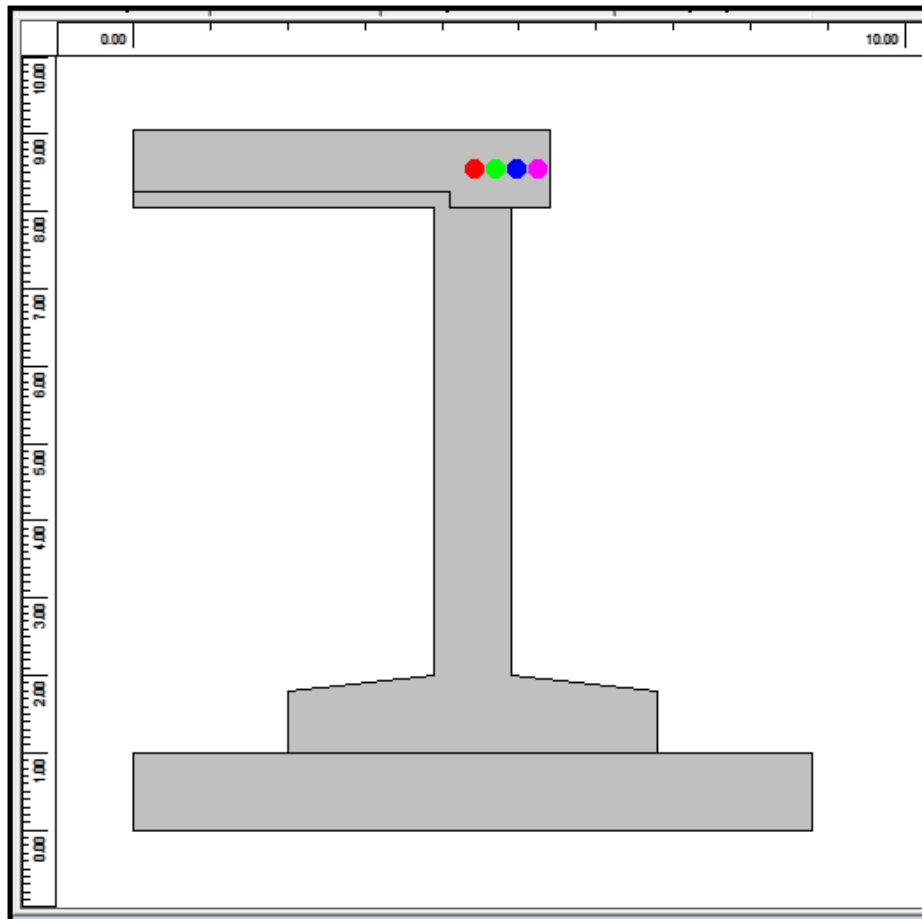
I Figur 76 vises et illustrasjonsbilde av temperaturlstanden i skjøten vegg – takplate ved tidspunkt 36 timer etter støp. Som det fremgår vil maksimumstemperatur forekomme til høyre i takplata. Valget av punkter i Figur 77 har også sammenheng med at kritisk rissindeks vil opptre på samme sted. For denne støpen er det kun valgt å vise temperaturutvikling av Resept 1 og Resept 5. Grunnen til dette er at disse betongene var mest kritisk under støping av vegg. Tverrsnittet som skal støpes i takplata er litt slankere enn veggen, samtidig som underliggende t-bjelke nok vil kjøle ned en del. Analysen av takplate er mindre kritisk og vil derfor få mindre oppmerksomhet.



Figur 76 Illustrasjonsbilde av temperaturlstand ved skjøt vegg - takplate, 36 timer etter støp

På bakgrunn av temperaturløststanden i Figur 76 har man valgt å konsentrere seg om de valgte punktene i Figur 77. Disse punktene ligger midt i takplate med en avstand fra senterlinjen av vegg:

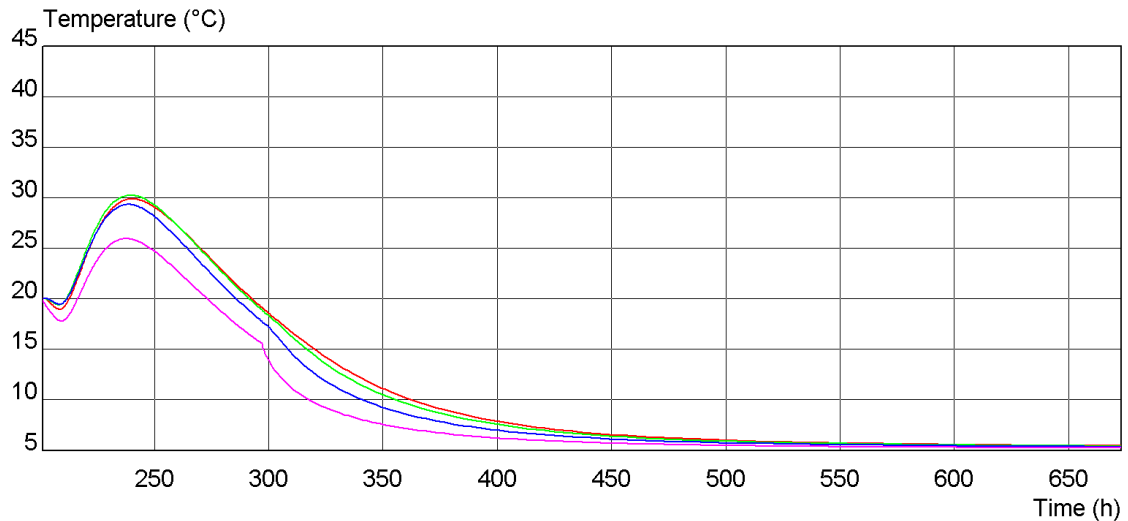
- 0 m - rødt
- 0,3 m - grønt
- 0,6 m - blå
- 0,9 m - lilla



Figur 77 Illustrasjon av plassering av punkter for temperaturforløp

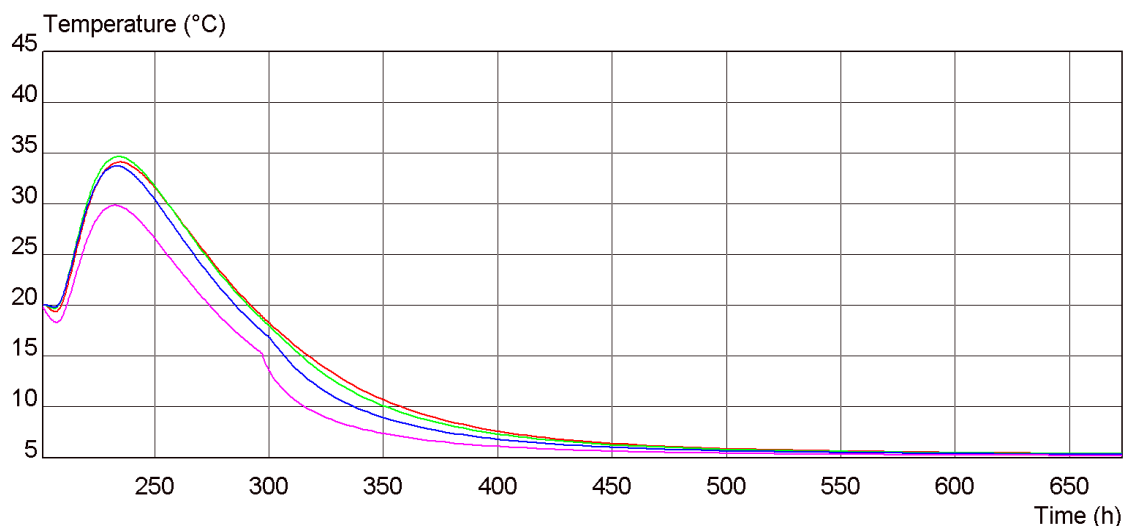


I Figur 78 vises temperaturforløpet til referansebetongen uten ekstra FA(Resept 1). Maksimumstemperaturen er 30,24 °C og inntreffer cirka 40 etter støp. På grunn av geometri vil takplata bli avkjølt raskere enn vegg, og dermed oppnå lavere maksimumstemperatur.



**Figur 78 Temperaturutvikling i takplate for Resept 1**

I Figur 79 vises temperaturforløpet til betong med 20 % FA med høy mengde HA(Resept 5). Maksimumstemperaturen er 34,63 °C og inntreffer cirka 35 timer etter støp.

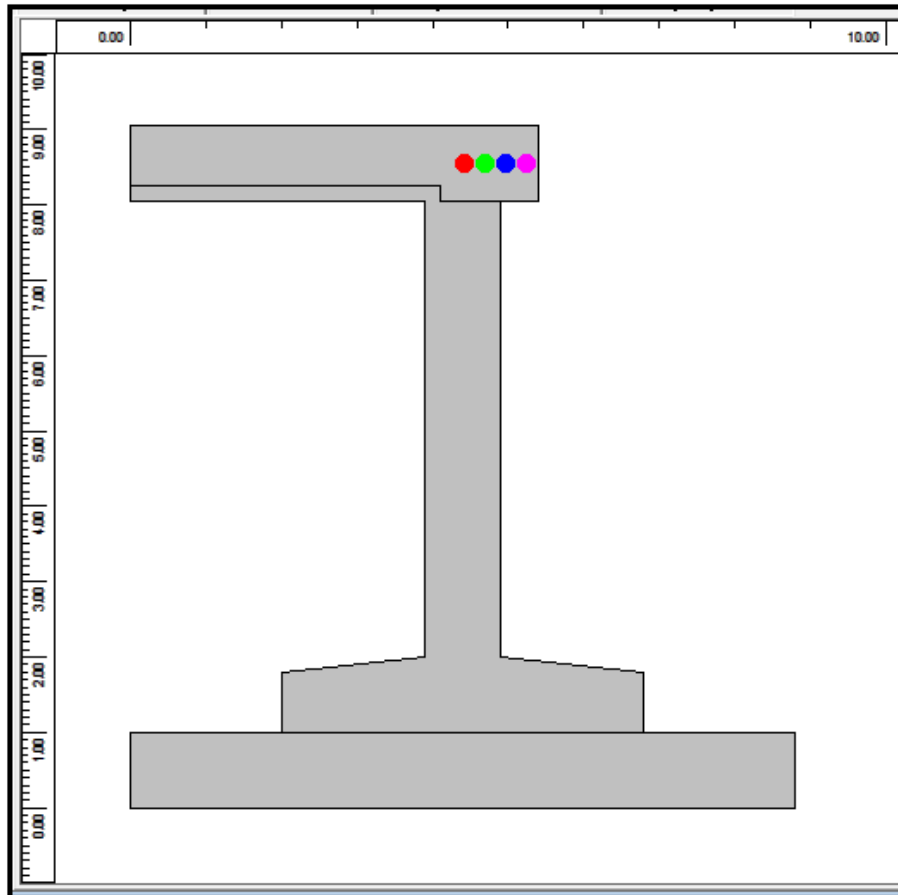


**Figur 79 Temperaturutvikling i takplate for Resept 5**

Temperaturen i vegg er langt høyere sammenlignet med takplata. Det må likevel poengteres at maksimums veggtemperatur vil inntreffe ved et senere tidspunkt, da betongen har fått mer styrke. Ellers ser det ut som at HA bidrar til litt raskere varmeutvikling og høyere maksimumstemperatur.

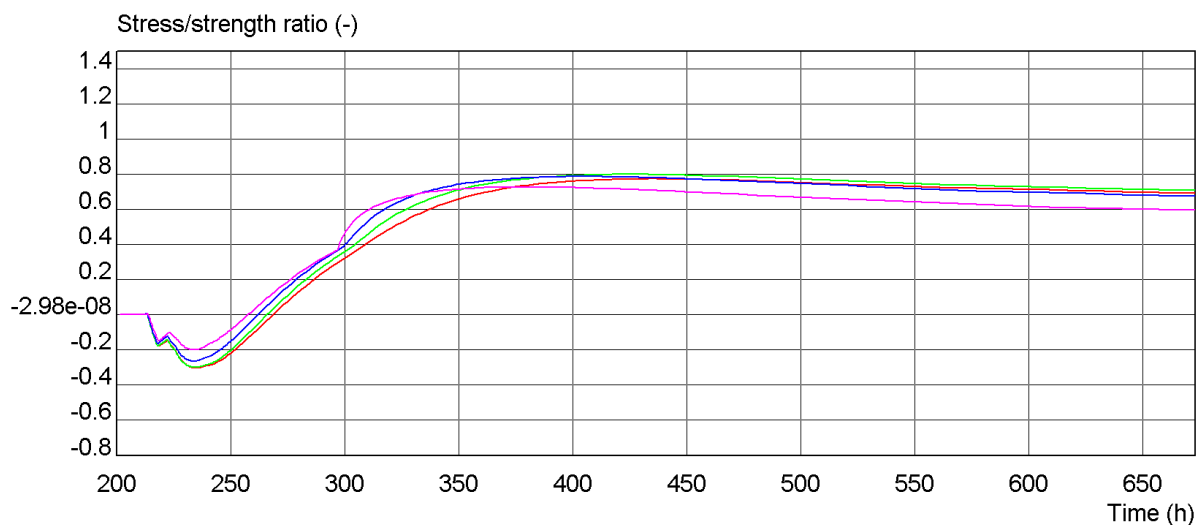
### 4.7.2 Rissindeks i takplate

I Figur 80 vises en illustrasjonsfigur over plasseringen til punktene valgt for kartlegging av rissindeksen. Figuren er den samme som i Kapittel 4.6.2



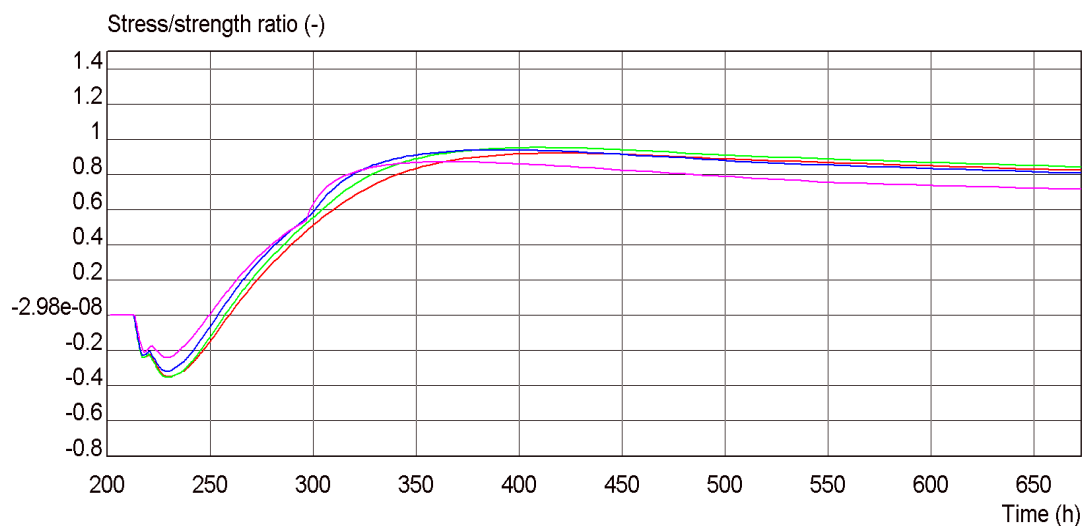
Figur 80 Illustrasjonsfigur for plassering av punkter for kartlegging av rissindeks

I Figur 81 vises forløpet til rissindeks for Referansebetongen(Resept 1) for skjøten vegg – takplate. Høyest rissindeks for betongresepten er på 0,8 og forekommer cirka 220 timer etter støp.



**Figur 81 Rissindeks i takplate for Resept 1**

I Figur 82 vises forløpet til rissindeks for Referansebetongen tilsatt høy dose HA(Resept 5) for skjøten vegg – takplate. Høyest rissindeks for betongresepten er på 0,9515 og forekommer cirka 200 timer etter støp.



**Figur 82 Rissindeks i takplate for Resept 5**

I Tabell 16 vises maksimum rissindeks for betongreseptene 1 og 5 i takplata. På lik linje med hva som ble påvist for rissindeksen i veggen, øker den også takplata med HA.

**Tabell 16 Oppsummering av maksimums rissindeks i takplata**

	Anlegg FA	
Ingen HA eller SA	Resept 1	0,8
Middels dose HA	-	
Høy dose HA	Resept 5	0,95
Høy dose HA + SA	-	

## 5 Diskusjon

*«Mapefast HA er en unik sammensetning av ulike komponenter som gir betongen vesentlig høyere tidligfastheter også når temperaturen i betongen faller. Spesielt fremtredende blir denne egenskapen i betonger som inneholder blandingssementer (som flygeaske, slagg). Hydratasjonsvarmen frigjøres på et tidligere tidspunkt, noe som fører til økt tidligfasthet, uten at maksimumstemperaturen i massen øker...[.]» (Mapefast HA, Vedlegg C - Datablad)*

Under herding på 5 °C kan det se ut til at noen betonger med HA oppnår en litt høyere tidligfasthet. Dette er riktignok ingen klar trend. Under herding på 20- og 35 °C er det ikke noe som tyder på økt fasthet. For massive betongtverrsnitt vil temperaturene stort sett være over 20 °C de første dagene, og tendensen til økt tidligfasthet ved lave temperaturer vil derfor påvirke lite. 28-døgnsfastheten er tilnærmet lik for alle betongene med samme nivå av flygeaske. Verdien  $f_{c28}$  fra egenskapsfunksjonen ligger lavere enn de målte verdiene. Dette kan skyldes at betonger med mye FA har en relativt høy herderate, selv etter 200 modenhetstimer. Modenhetsprinsippet er også unøyaktig etter 100 modenhetstimer, som kan forklare noe av avviket.

Etter å ha iterert fram parameterne i egenskapsfunksjonen kunne vi også se at avbindingstiden gikk ned for betonger med HA, se Tabell 10. Det vil si at betongene størkner ved et tidligere tidspunkt. Ifølge Mortensvik [9] skal ikke Mapefast HA påvirke avbindingstidspunktet. Om betongene ved 5 °C herder raskere eller om de størkner hurtigere er vanskelig å si. Uansett kan det tyde på at noen betonger med HA får en litt høyere tidligfasthet ved lave herdetemperaturer. Det må poengteres at denne tendensen ikke er veldig tydelig.

Figur 35 viser modeller av aktiveringsenergiens A-verdi for betongreseptene mot doseringen av HA. Ut fra denne kan man ikke se noen klar sammenheng mellom mengden HA og betongens aktiveringsenergi. A- og B-verdiene fra Tabell 9 er også sprikende og viser ingen sammenheng. Det er til og med noen betonger som har negative B-verdier, som i realiteten betyr at de får redusert temperaturfølsomhet. I praksis betyr dette at det ikke vil være problematisk å støpe betong ved lave temperaturer, siden sementreaksjonene vil gå lettere. Støp under kalde forhold vil derfor være mindre risikofylte og kreve færre tiltak. Dette er et uventet resultat, men likevel ikke en umulighet. På forhånd hadde vi regnet med at B-verdien skulle falle litt ved høyere andel FA, men ikke under 0. Noen av reseptene oppfører seg nesten som forventet, men resultatene spriker voldsomt, som det kommer fram i Tabell 9.

Fra herdekasseforsøkene beskrevet i avsnitt 3.7 ser man at maksimumstemperaturen i herdekassene øker i betongene med HA. Dette motstrider sitatet øverst på denne siden. Samtlige betonger som ble tilsatt HA økte maksimumstemperaturen, se Tabell 13. Den totale varmemengden gikk også opp i herdekassene med HA. Spesielt i tidsrommet mellom 10 og 20 modenhetstimer ser man at betongene med HA generer varme raskere. I betongene som inneholdt 20 % ekstra FA, og fikk tilsatt HA, steg den totale varmemengden med 4-6 %, se Tabell 12. Dette vil være ugunstig i forhold til riss når betongen skal brukes i massive tverrsnitt.

Det kan nevnes at betongene uten HA oppførte seg mer eller mindre som forventet med tanke på varmeutvikling. Resept 1 oppnådde en total varmeutvikling på 305 kJ/kg sement,

Resept 3 oppnådde 287 kJ/kg sement og Resept 2 oppnådde 254 kJ/kg sement. Dette er veldig likt de forhåndsprogrammerte betongene fra CrackTeSt COIN og erfaringene fra Senketunnelen i Bjørvika [33].

Vi ser liten forskjell mellom høy og middels dose HA når det kommer til styrke- og varmeutvikling. Det har blitt spekulert i at en kombinasjon av HA og SA skal kunne påvise en ekstra styrkeutvikling i tidlig fase, dette har uteblitt i våre resultater. Ved å granske betongen med høy dose HA i Tabell 7 og betongen med HA og SA i Tabell 8 kan man ikke påvise noen spesiell styrkeforskjell. Disse dataene fremkommer kun av én testserie, og er derfor ikke omfattende nok til å kunne trekke noen slutning om virkningen av HA og SA sammen.

Det kan virke som at Mapefast HA øker temperaturen i betongen, som indirekte vil føre til en raskere styrkeutvikling. Utsagnet om at tidligfasthet skal økes uten at maksimumstemperaturen i betongen økes, ser ikke ut til å være korrekt. I lavvarmebetong er det ønskelig å holde maksimumstemperaturen lavest mulig, Mapefast HA bidrar ikke til dette.

Simulering av temperaturforløpet i CrackTeSt COIN viser en høyere maksimumstemperatur i resepter med HA. Dette kommer som et resultat av hva som ble påvist i herdekasseforsøkene. Høyere temperaturer vil forårsake høyere termisk utvidelse som igjen vil bidra til høyere rissrisiko. Ifølge Skjølsvik [37] er strekkfastheten til betong den parameteren som er mest utslagsgivende når det kommer til rissindeksen. Andelen FA vil påvirke strekkfastheten og det vil derfor ikke være korrekt å sammenligne betonger med ulik andel FA når det kommer til rissindeks i vår oppgave.

Resultatene fra analysene er entydige om at betonger med Mapefast HA gir høyere rissindeks på grunn av økt maksimumstemperatur. Dette kommer frem ved sammenligning av Resept 1 og Resept 5, hvor rissindeksen steg fra 1,06 til 1,26, altså en økning på omkring 19 %. En økning som er meget ugunstig. Denne tendensen vises også ved sammenligning av Resept 2 med reseptene 4,6 og 7.

I ettertid ser vi at det burde vært gjennomført en hyppigere testing de første 48 modenhetstimene. Dette for på en bedre måte å kartlegge forløpet til styrkeutvikling i tidligfase. Ut ifra hvordan eksperimentene våre ble utført, er det vanskelig å kunne fastslå om påstanden i databladet til Mapefast HA, om tidligfasthet, er korrekt. Utstyret vi benyttet til trykktesting er lite egnet til å avgjøre nøyaktig fasthet ved lav styrke. Det hadde også vært interessant å gjøre forsøk rundt avbindingstiden. Ut fra forsøkene vi har gjort og hvilke verdier vi kom fra til for  $t_0$  i egenskapsfunksjonene, mistenker vi at HA påvirker denne. Det kunne i tillegg blitt lagd flere betongresepter med ulik andel HA, SA og FA. Dette for å påvise tendenser og mønster tydeligere. Det må også nevnes at det er stor usikkerhet rundt Resept 6. Denne betongen gir for eksempel dårlig kurvetilpassing til egenskapsfunksjonen. Samt at verdiene for aktiveringsenergi og fasthetsutvikling etter 28 døgn, ikke er helt som ventet. En ting som ikke er tatt hensyn til i denne rapporten er hvordan dosen av superplastiserende stoffer påvirker størkning og herdning. Disse stoffene vil påvirke fastheten og varme ifølge Atis [23]

## 6 Konklusjon

Basert på eksperimentelle resultater rundt bruken av Mapefast HA i denne studien, er man kommet fram til at herdingsakseleratoren viser ingen eller liten direkte effekt for tidligfastheten. Det er derfor ingen hensikt å benytte herdingsakseleratoren til å kompensere for sen styrkeutvikling i lavvarmebetong. HA ser ut til å øke varmeutviklingen i betongen som indirekte vil føre til raskere styrkeutvikling. I så måte fungerer herdingsakseleratoren som en katalysator for de kjemiske reaksjonene. Denne egenskapen var ikke forespeilet fra produsentens side og er heller ikke gunstig i massive betongtverrsnitt. Forsøkene som er gjort tyder på at HA fører til at spenningsutvikling øker og derved stiger risiko for riss. Dette er observert i de aktuelle betongtverrsnittene fra casestudiet som er utsatt for ytre- og indrefastholding. Kombinasjonen av HA og SA har ikke gitt noen tydelige utslag på resultatene fra forsøkene, så denne kombinasjonen trenger nærmere undersøkelse. Forsøkene viser også at betongens 28-dagersfasthet påvirkes i liten grad av bruken av HA.

Skal vi gi et råd rundt bruken av herdingsakselerator i lavvarmebetong for massive betongtverrsnitt, ville rådet vårt vært, ut fra resultatene i denne rapporten: Mapefast HA er ugunstig å bruke.





## 7 Videre arbeid

Om vi skulle jobbet videre med dette temaet er det noen ting man burde gjøre:

- Det burde vært langt flere tester de første 48 timene. Siden dette er den mest interessante perioden med tanke på størknings- og herdingsakseleratoren. Dessuten hadde det vært interessant å undersøke nøyaktig avbindingstid. Dette for å kartlegge om HA har en størkningsakselererende effekt. Ved hurtigere testing i de 48 første modenhetstimene hadde man også kunne sett tydeligere om det er forskjell på tidligfastheten under herding ved lav og høy temperatur.
- Det hadde vært veldig gunstig og hatt strekkfasthets- og E-modul utviklingen. Strekkfastheten og E-modul er veldig viktig siden disse er så avgjørende når man regner rissindeks i CrackTeSt COIN.
- Gjøre flere tester av betong med SA, og kombinasjonen av HA og SA. For videre å sammenligne disse med styrke- og varmeutviklingen i betongene som allerede er testet.
- Om mulig kan man teste andre herdingsakseleratorer for å se om disse vil ha en mer gunstig effekt på massive tverrsnitt.
- Det hadde også vært interessant å lage langt flere resepter for sammenligning. Slik at man har bredere grunnlag når man skal konkludere.



## Referanser

- [1] S. Smeplass, «Curing technology,» i *Concrete technology 1*, S. Jacobsen, Red., Trondheim, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU, 2003, p. Chapter 11.
- [2] Aas-Jakobsen, *Arbeidstegning, Trondheim Lufthavn Værnes, Apron vest, ENVA-B-202*, Trondheim: Ass-Jakobsen, 2011.
- [3] Ø. Bjøntegaard, «Shrinkage, Cracking,» i *Concrete technology 1*, S. Jacobsen, Red., Trondheim, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU, 2009, p. Chapter 13.
- [4] R. Myrdal, «Sintef report - Accelerating admixtures for concrete. Coin-concrete innovation center,» Sintef, Trondheim, 2007.
- [5] Standard Norge, «EN 934-2:2001 Admixtures for concrete, mortar and grout - Part 2: Concrete,» Norsk Standard, 2001.
- [6] R. Myrdal, Forfatter, *Chemical admixtures for concrete. Forelesningsfoiler i Betongteknologi 1 TKT4215*. [Performance]. NTNU, 2012.
- [7] S. Popovics, «Specifications and testing,» i *Concrete Materials*, Noyes, William Andrew Publishing, 1992, pp. 236-246.
- [8] A. Paillere, «Part one - Admixtures for concrete infrequent use,» i *Application of Admixtures in Concrete*, Paris, E & FN Spon i samarbeid med RILEM, 1995, pp. 34-40.
- [9] Ø. Mortensvik, Interviewee, *Spørsmål om Mapefast HA*. [Intervju]. 8 mai 2012.
- [10] S. Smeplass, Forfatter, *Forelesning betongteknologi - maturity principle*. [Performance]. Skanska, 2011.
- [11] J. Clark, «Chemguide,» 2009. [Internett]. Available: <http://www.chemguide.co.uk/physical/basicrates/arrhenius.html>. [Funnen 21 mars 2012].
- [12] Ø. Bjøntegaard, «Basis for and practical approach to stress calculations and crack risk estimation in hardening concrete structures,» Statens vegvesen, Trondheim, 2011.
- [13] G. Ji, «Cracking risk of concrete structures in the hardening phase: Experiments, material modeling and finite element analysis (Doctor thesis),» Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU, Trondheim, 2008.
- [14] P. Gjerp og M. Opsahl, *Grunnleggende betongteknologi*, Lillestrøm: Byggenæringens Forlag AS, 1998.
- [15] E. J. Sellevold, «Pozzolana,» i *Concrete Tehnology 1*, S. Jacobsen, Red., Trondheim, Institutt for konstruksjonsteknikk, 2008, p. Chapter 7.
- [16] S.-H. Han, J.-K. Kim og Y.-D. Park, «Prediction of compressive strength of fly ash concrete by new apparent activation energy function,» Korea Ocean Research and Development Institute, Sadong Ansan, 2002.
- [17] E. J. Sellevold, «Hydration,» i *Concrete technology 1*, S. Jacobsen, Red., Trondheim, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU, 1990, p. Chapter 6.
- [18] P. Metha, «Influence of fly ash characteristics on the strength of portland-fly ash mixtures,» University of Berkeley, San Francisco, 1985.
- [19] M. Elsageer, S. Millard og S. Barnett, «Strength development of concrete containing coal fly ash under different temperature conditions,» Department of engineering, University of Liverpool, Liverpool, 2009.

- [20] C. D. Atis, «Heat evolution of high volume fly ash concrete,» Department of Civil Engineering, Cukurova University, Adana, 2001.
- [21] Statens Vegvesen, «Statens vegvesen,» 2012. [Internett]. Available: [http://www.vegvesen.no/\\_attachment/275071/binary/485338](http://www.vegvesen.no/_attachment/275071/binary/485338). [Funnen 4 mai 2012].
- [22] Ø. Bjøntegaard, «<http://www.vegvesen.no> Nye sementer med flygeaske, teknologidagene 2009,» 2009. [Internett]. Available: [http://www.vegvesen.no/\\_attachment/111688/binary/197270](http://www.vegvesen.no/_attachment/111688/binary/197270). [Funnen 26 Mars 2012].
- [23] C. D. Atis, «High Volume Fly Ash Concrete with High Strength and Low Drying Shrinkage,» Department of Civil Engineering, Cukurova University, Adana, 2003.
- [24] R. Davies, R. Carlson, J. Kelly og H. Dawis, «Properties of cement and concrete containing fly ash,» 1937.
- [25] T. Kanstad, T. Hammer, Ø. Bjøntegaard og E. Sellevold, «Mechanical properties of young concrete: Part II: Determination of model parameters and testprogram proposals,» i *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Trondheim, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU, 2001, pp. 226-230.
- [26] Ø. Bjøntegaard, «Volumendringer og risstendens i betong,» Statens vegvesen, Betong- og tunnelseksjonen, 2009.
- [27] Standard Norge, «NS 12390-3:2009 Prøving av herdnet betong,» Norsk Standard, 2009.
- [28] Standard Norge, «NS 3656:1993 Betongprøving Reksjonshastighetens temperaturavhengighet,» Standard Norge, 1993.
- [29] S. Smeplass, «Kalor - Programdokumentasjon,» Sintef - Forskningsinstituttet for Cement og Betong, Trondheim, 1988.
- [30] Standard Norge, «NS 3657:1993 Måling av varmeutvikling,» Standard Norge, 1993.
- [31] Statens vegvesen og Skanska, «Senketunnelen i Bjørvika, erfaringsrapport. Kontroll med opprissing i betongens herdefase,» Statens vegvesen, 2005.
- [32] A. Saul, «Principles underlying the steam curing and concrete at atmospheric pressure,» *Magazine of concrete research*, vol. 2, nr. 6, pp. pp 127-140, 1951.
- [33] Ø. Bjøntegaard, S. Smeplass, E. Haram og R. Kompen, «Senketunnelen i Bjørvika, erfaringsrapport. Kontroll med opprissing i betongens herdefase,» Statens vegvesen i samarbeid med Skanska, 2012.
- [34] JEJMS Concrete AB, «User manual - Program for temperature and stress calculations in concrete,» Luleå University of technology, Luleå, 2008.
- [35] Freisleben-Hansen, «Matematisk simulering af temperaturutvikling og egenskabsudvikling ved udførelse af massiv betonkonstruksjoner,» København, 1975.
- [36] S. Smeplass, Interviewee, *Samtale ved Skanskahuset*. [Intervju]. 25 April 2012.
- [37] O. B. Skjølvsvik, «Beregning og evaluering av rissrisiko pga fastholdningseffekter i støpeskjøter,» Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU, Trondheim, 2011.
- [38] H. F. W. Taylor, «Kapittel 11,» i *Cement Chemistry. Academic press limited*, London, 1990, pp. 358-359.
- [39] ACI Committee, «Cement and concrete terminology. ACI Manual of concrete Practice,» American concrete institute, USA, 1989.
- [40] Ecvv, «Ecvv,» 2012. [Internett]. Available: [www.ecvv.com/product/2091456.html](http://www.ecvv.com/product/2091456.html). [Funnen 13 mars 2012].

- [41] Federal highway Administration (US), «Department of Transportation: Federal highway administratation,» 2011. [Internett]. Available: <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/pccp/pubs/04150/chapt11.cfm>. [Funnen 17 mars 2012].
- [42] A. Schindler og K. Folliard, «INFLUENCE OF SUPPLEMENTARY CEMENTING MATERIALS ON THE HEAT OF HYDRATION OF CONCRETE,» Copper Mountain, 2003.
- [43] BinQ Mining machinery, «southafricacrusher,» 2012. [Internett]. Available: <http://www.southafricacrusher.com/optional-equipment/fly-ash-grinding.php>. [Funnen 7 mai 2012].
- [44] B. Sørpler, K. Kjellsen og T. Fredvik, «Betong: Herdeteknologi,» *Herdeteknologi utgitt av Norcem FoU*, nr. 3, pp. 44-51, 2009.



## Vedlegg A - Resepter

Proporsjonering av betong Pros.jid.: Anlegg fa/ resept 1 SKANSKA

Initialparametre	Verdi	k
w(c+Skp)	0,40	-
s/c (silikastøv) [%]	3,0	2,00
f/c (fller, flyveaske) [%]	0,0	1,00
Luftinnhold [%]	2,0	-
Tilsetningsstoff	% av C	% av S
Dynamo sx-n	1,31	0,00
Mapfast HA	0,00	0,00
Mapfast SA	0,00	0,00
Demper rm	0,13	0,00
Fiber	Vol %	
Stålfiber	0,0	
PP-fiber	0,0	
Matriks	Verdi	
Ønsket matriksvolum [l/m <sup>3</sup> ]	330	
Oppnådd matriksvolum** [l/m <sup>3</sup> ]	330	
Volum sementim [l/m <sup>3</sup> ]	309	
Fillerbidrag [l/m <sup>3</sup> ]	21	
w/p	0,36	



Utført av	Firma	Dato		
Øvind&Arld	ntnu	12.02.2012		
Materiale	Densitet <sup>2</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]	Tørrestoff [%]	Alkalier [%]	Klorider [%]
Anlegg fa	2999	-	0,00	0,00
Elkem Microsilica	2200	50	0,00	0,00
Flyveaske	2650	100	0,00	0,00
Dynamo sx-n	1060	18	0,00	0,00
Mapfast HA	1100	27,5	0,00	0,00
Mapfast SA	1500	50	0,00	0,00
Demper rm	1000	0,5	0,00	0,00
Stålfiber	7800	-	-	-
PP-fiber	1000	-	-	-

\*For sement, pozzolaner og fillere oppgis densitet av tørstoff. For TSS oppgis vått densitet.

\*\*Tipass matriksvolum; Ctr M

Sett "Oppnådd" lik "Ønsket"; Ctr N

\*\*\*Nulstilt korreksjon; Ctr K

Proporsjonert betong		Ønsket		Oppnådd		Fersk betong		Volumkorreksjon***		
Materiale	kg/m <sup>3</sup>	kg	kg	kg	kg	Egenskap	korrr.luft	korrr.dens	Korrigert	
Anlegg fa	400,1	20,0	20,0	20,0	20,0	Ønsket volum	0,0	-3,0	397,1	
Elkem Microsilica	12,0	0,6	0,6	0,6	0,6	Innveid volum (l)	0,0	-0,1	11,9	
Flyveaske	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Luftinnhold (%)	0,0	0,0	0,0	
Fritt vann	169,7	8,5	8,5	8,5	8,5	Målt betongdensitet (kg/m <sup>3</sup> )	0,0	-1,3	168,4	
Absorbent vann	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Effektivt w(c+Skp)	0,0	0,0	0,0	
Andel 0/8 mm nat. vask.	1074,6	63,7	63,7	63,7	63,7		0,0	-8,1	1066,5	
Andel 0/2 mm nat. vask	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	
Andel 8/16mm	716,4	35,8	35,8	35,8	35,8		0,0	-5,4	711,0	
Andel 16/22 mm	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>Aggressiver</b>	0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Kloridinnhold (% av cem.)	0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Alkalier [kg/m <sup>3</sup> ]	0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Andel reakt. bergarter [%]	0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	
Dynamo sx-n	5,24	0,26	0,26	0,26	0,26		0,0	0,0	5,20	
Mapfast HA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,0	0,0	0,00	
Mapfast SA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,0	0,0	0,00	
Demper rm	0,50	0,03	0,03	0,03	0,03		0,0	0,0	0,50	
Stålfiber	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	
PP-fiber	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	
Prop. betongdens. (kg/m <sup>3</sup> )	2374						0,0	-17,9	2356	

Effekten av lavvarmebetong på fasthetsutviklingen og rissrisiko i anleggskonstruksjoner utsatt for fastholding



Prosj./id.: Anlegg fa/ resept 1

Blandevolum:	50 liter
Dato:	#####
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	
Utført av:	Øyvind og Arild

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg fa	400,1	20,006			20,006
Elkem Microsilica	12,0	0,600	50	0,600	1,200
Flyveaske	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	169,7	8,483		-1,753	6,729
Absorbert vann	0,0	0,000			0,000
Årdal 0/8 mm nat. vask.	1074,6	53,728	1,7	0,913	54,642
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	716,4	35,819	0,0	0,000	35,819
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Dynamo sx-n	5,2	0,262	82	0,215	0,262
Mapfast HA	0,0	0,000	72,5	0,000	0,000
Mapefast SA	0,0	0,000	50	0,000	0,000
Demper rm	0,5	0,025	99,5	0,025	0,025
Stålfiber	0,0	0,000			0,000
PP-fiber	0,0	0,000			0,000

\*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

\*\* NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning					
Synkmål	237	235			
Utbredelsesmål					
Luft	1,5	1,6			
Densitet	2419	2375			

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt	feb.12	14.feb			
Terninger	18	21			
150x300 sylindre					
100x200 sylindre					

Resept 2

Proporsjonering av betong Prosj.fid.: Anlegg fa + 20%FA / resept 2 **SKANSKA**

Initialparametre	Verdi	k
w(c+ $\Sigma$ kp)	0,40	-
s/c (silikastøv) [%]	3,0	2,00
fic (filler, flyveaske) [%]	32,8	1,00
Luftinnhold [%]	2,0	-
Tilsetningsstoff	% av C	% av S
Dynamo sx-n	1,30	0,00
Mapfast HA	0,00	0,00
Mape SA	0,00	0,00
Demper rm	0,17	0,00
Fiber	Vol %	
Stålfiber	0,0	
PP-fiber	0,0	
Matriks	Verdi	
Ønsket matriksvolum [l/m <sup>3</sup> ]	330	
Oppnådd matriksvolum** [l/m <sup>3</sup> ]	330	
Volum sementim [l/m <sup>3</sup> ]	309	
Fillerbidrag [l/m <sup>3</sup> ]	21	
w/p	0,36	



Utført av	Firma	Dato
Øvind	ntru	09.02.2012

Materiale	Densitet † [kg/m <sup>3</sup> ]	Tørrestoff [%]	Alkaler [%]	Klorider [%]
Anlegg fa	2999	-	0,00	0,00
Elkem Microsilica	2200	50	0,00	0,00
Flyveaske	2200	100	0,00	0,00
Dynamo sx-n	1080	18	0,00	0,00
Mapfast HA	1100	27,5	0,00	0,00
Mape SA	1500	50	0,00	0,00
Demper rm	1000	0,5	0,00	0,00
Stålfiber	7800	-	-	-
PP-fiber	1000	-	-	-

†For sement, pozzolaner og fillere oppgis densitet av tørstoff. For TSS oppgis våt densitet.

\*\*Tilpass matriksvolum; Ctrl M

Sett "Oppnådd" lik "Ønsket"; Ctrl N

\*\*\*Nullstil korreksjon; Ctrl K

Proporsjonert betong

Materialer	kg/m <sup>3</sup>
Anlegg fa	293,0
Elkem Microsilica	8,8
Flyveaske	96,1
Fritt vann	162,7
Absorbert vann	5,4
Andel 0/8 mm nat. vask.	1073,5
Andel 0/2 mm nat. vask.	0,0
Andel 8/16mm	719,2
Andel 16/22 mm	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
Dynamo sx-n	3,81
Mapfast HA	0,00
Mape SA	0,00
Demper rm	0,50
Stålfiber	0,0
PP-fiber	0,0
Prop. betongdens. (kg/m <sup>3</sup> )	2359

Ønsket Oppnådd

kg	kg
14,7	14,7
0,4	0,4
4,8	4,8
8,1	8,1
0,3	0,3
53,7	53,7
0,0	0,0
0,0	0,0
0,0	0,0
0,0	0,0
0,0	0,0
0,0	0,0
0,0	0,0
0,0	0,0
0,0	0,0
0,19	0,19
0,00	0,00
0,00	0,00
0,02	0,02
0,0	0,0
0,0	0,0

Fersk betong

Egenskap	
Ønsket volum	50,0
Innveid volum (l)	50,0
Luftinnhold (%)	2,0
Målt betongdensitet (kg/m <sup>3</sup> )	2356
Effektivt w(c+ $\Sigma$ kp)	0,400
Aggressiver	
Kloridinnhold [% av cem.]	0,00
Alkaler [kg/m <sup>3</sup> ]	0,00
Andel reakt. bergarter [%]	0,0

Volumkorreksjon\*\*\*

korrt.luft	korrt.dens	Korrigert
0,0	-0,5	292,8
0,0	0,0	8,8
0,0	-0,2	95,9
0,0	-0,3	162,3
0,0	0,0	5,4
0,0	-1,7	1071,9
0,0	0,0	0,0
0,0	-1,1	718,2
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	3,80
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,37
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	-3,7	2356

**Prosj./id.: Anlegg fa + 20%FA / resept 2**

Blandevolum:	50 liter
Dato:	
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	
Utført av:	

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg fa	293,0	14,651			14,651
Eikem Microsilica	8,8	0,440	50	0,440	0,879
Flyveaske	96,1	4,804	0	0,000	4,804
Fritt vann	162,7	8,134		-1,576	6,558
Absorbert vann	5,4	0,268			0,268
Årdal 0/8 mm nat. vask.	1073,5	53,674	1,8	0,955	54,629
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	719,2	35,962	0,0	0,000	35,962
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Dynamo sx-n	3,8	0,190	82	0,156	0,190
Mapfast HA	0,0	0,000	72,5	0,000	0,000
Mape SA	0,0	0,000	50	0,000	0,000
Demper rm	0,5	0,025	99,5	0,025	0,025
Stålfiber	0,0	0,000			0,000
PP-fiber	0,0	0,000			0,000

6,826

\*Se fotnote på delart "Proporsjonering"

\*\* NE! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning					
Synkmål	220	235			
Utbredelsesmål					
Luft	2,2	1,5			
Densitet	2401	2419			

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt	13.feb	14.feb			
Teminger	18	21			
150x300 sylindre					
100x200 sylindre					



Prosj./id.: Resept 3 / Anlegg FA + 10% FA

Blandevolum:	50 liter
Dato:	
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	
Utført av:	

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg fa	345,6	17,280			17,280
Elkem Microsilica	10,4	0,518	50	0,518	1,037
Flyveaske	48,7	2,433	0	0,000	2,433
Fritt vann	166,0	8,300		-1,618	6,682
Absorbent vann	8,6	0,429			0,429
Årdal 0/8 mm nat. vask.	1072,2	53,608	1,7	0,911	54,520
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	720,5	36,025	0,0	0,000	36,025
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Dynamo sx-n	4,0	0,199	82	0,163	0,199
Mapfast HA	0,0	0,000	72,5	0,000	0,000
Mape SA	0,0	0,000	50	0,000	0,000
Demper rm	0,5	0,025	99,5	0,025	0,025
Stålfiber	0,0	0,000			0,000
PP-fiber	0,0	0,000			0,000

7,111

\*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

\*\* NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning					
Synkmål	215	225		t0?	t1350
Utbredelsesmål					
Luft	2,1	1,85			
Densitet	2393	2393			

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt	20.feb	21.feb			
Terninger	34	21			
150x300 sylindre					
100x200 sylindre					

Resept 4

Proporsjonering av betong Proj.fid.: Anlegg FA + 20%FA + dosering 1 HA / Resept 4 **SKANSKA**

629114047 no

Initialparametre	Verdi	k
w/(c+skp)	0,40	-
s/c (silikastøv) [%]	3,0	2,00
f/c (filler, flyveaske) [%]	32,8	1,00
Luftinnhold [%]	2,0	-

Tilsetningsstoff	% av C	% av S
Dynamo sx-n	1,31	0,00
Mapfast HA	1,38	0,00
Mape SA	0,00	0,00
Demper rm	0,17	0,00

Fiber	Vol %
Stålfiber	0,0
PP-fiber	0,0

Matris	Verdi
Ønsket matrisvolum [l/m <sup>3</sup> ]	330
Oppnådd matrisvolum** [l/m <sup>3</sup> ]	330
Volum sementim [l/m <sup>3</sup> ]	308
Fillerbidrag [l/m <sup>3</sup> ]	21
w/p	0,36



Utført av	Firma	Dato
Øvwind	ritu	17.02.2012

Materiale	Densitet* [kg/m <sup>3</sup> ]	Tørrestoff [%]	Alkalier [%]	Klorider [%]
Anlegg fa	2999	-	0,00	0,00
Elkem Microsilica	2200	50	0,00	0,00
Flyveaske	2200	100	0,00	0,00
Dynamo sx-n	1080	18,5	0,00	0,00
Mapfast HA	1100	27,5	0,00	0,00
Mape SA	1500	50	0,00	0,00
Demper rm	1000	0,5	0,00	0,00
Stålfiber	7800	-	-	-
PP-fiber	1000	-	-	-

\*For sement, pozzolaner og flere oppgis densitet av tørrestoff. For TSB oppgis våt densitet.

\*\*Tilpass matrisvolum; Cst M

Sett "Oppnådd" lik "Ønsket"; Cst N

\*\*\*Nullstill korreksjon; Cst K

Proporsjonert betong

Materialer	kg/m <sup>3</sup>
Anlegg fa	292,2
Elkem Microsilica	8,8
Flyveaske	95,9
Fritt vann	162,2
Absorbert vann	8,8
Ardal 0/8 mm nat. vask	1072,3
Ardal 0/2 mm nat. vask	0,0
Ardal 8/16mm	720,6
Ardal 16/22 mm	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
Dynamo sx-n	3,83
Mapfast HA	4,03
Mape SA	0,00
Demper rm	0,50
Stålfiber	0,0
PP-fiber	0,0
Prop. betongdens. (kg/m <sup>3</sup> )	2362

Ønsket Oppnådd

kg	kg
14,6	14,6
0,4	0,4
4,8	4,8
8,1	8,1
0,4	0,0
53,6	53,8
0,0	0,0
38,0	35,9
0,0	0,0
0,0	0,0
0,0	0,0
0,0	0,0
0,0	0,0
0,0	0,0
0,0	0,0
0,0	0,0
0,19	0,19
0,20	0,15
0,00	0,00
0,02	0,02
0,0	0,0
0,0	0,0
0,0	0,0
2362	2362

Fersk betong

Egenskap	Verdi
Ønsket volum	50,0
Innveid volum (l)	50,0
Luftinnhold (%)	5,0
Målt betongdensitet (kg/m <sup>3</sup> )	2356
Effektivt w/(c+skp)	0,368

Aggressiver

Kloridinnhold (% av cem.)	0,00
Alkalier (kg/m <sup>3</sup> )	0,00
Andel reakt. bergarter (%)	0,0

Volumkorreksjon\*\*

korrt.luft	korrt.dens	Korrigert
-9,1	9,2	292,8
-0,3	0,3	8,8
-3,0	3,0	95,9
-5,0	5,1	161,8
0,0	0,0	0,0
-33,3	33,8	1077,1
0,0	0,0	0,0
-22,2	22,5	718,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
-0,1	0,1	3,84
-0,1	0,1	2,93
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,50
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
-73,0	74,1	2356

<b>Prosj./id.:</b>	<b>Anlegg FA + 20%FA + dosering 1 HA / Resept 4</b>
--------------------	---

Blandevolum:	50 liter
Dato:	
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	
Utført av:	

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveld** kg	
Anlegg fa	292,2	14,612			14,612	
Elikem Microsilica	8,8	0,438	50	0,438	0,877	
Flyveaske	95,9	4,793	0	0,000	4,793	
Fritt vann	162,2	8,112		-1,677	6,436	0,864
Absorbert vann	8,6	0,429			0,429	
Årdal 0/8 mm nat. vask.	1072,3	53,614	1,7	0,911	54,526	
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Årdal 8/16mm	720,6	36,029	0,0	0,000	36,029	
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Dynamo sx-n	3,8	0,192	81,5	0,156	0,192	
Mapfast HA	4,0	0,202	72,5	0,146	0,202	
Mape SA	0,0	0,000	50	0,000	0,000	
Demper rm	0,5	0,025	99,5	0,025	0,025	
Stålfiber	0,0	0,000			0,000	
PP-fiber	0,0	0,000			0,000	

\*Se fotnote på delart: "Proporsjonering"

\*\* NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning					
Synkmål	240	235			
Utbredelsesmål					
Luft	1,5	1,4			
Densitet	2384	2380			

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt	20.feb	21.feb		t0?	t1400
Temlinger	34	21			
150x300 sylindre					
100x200 sylindre					

Resept 5

Proporsjonering av betong SKANSKA

Proj.fid.: Anlegg fa + HA(dose 2)/ resept 5

Utført av	Firma	Dato
Øvind	ntru	24.02.2012

Initialparametre	Verdi	k
w/(c+skp)	0,40	-
s/c (silikastøv) [%]	3,0	2,00
f/c (filler, flyveaske) [%]	0,0	1,00
Luftinnhold [%]	2,0	-
Tilsetningsstoff	% av C	% av S
Dynamo sx-n	1,27	0,00
Mapfast HA	2,13	0,00
Mapfast SA	0,00	0,00
Demper rm	0,13	0,00
Fiber	Vol %	
Stålfiber	0,0	
PP-fiber	0,0	
Matraks	Verdi	
Ønsket matrivolum [l/m <sup>3</sup> ]	330	
Oppnådd matrivolum** [l/m <sup>3</sup> ]	330	
Volum sementim [l/m <sup>3</sup> ]	309	
Fillerbidrag [l/m <sup>3</sup> ]	21	
w/p	0,36	



Materiale	Densitet *	Tørrstoff	Alkalier	Klorider
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[%]	[%]
Anlegg fa	2999	-	0,00	0,00
Elkem Microsilica	2200	50	0,00	0,00
Flyveaske	2850	100	0,00	0,00
Dynamo sx-n	1080	18	0,00	0,00
Mapfast HA	1100	27,5	0,00	0,00
Mapfast SA	1500	50	0,00	0,00
Demper rm	1000	0,5	0,00	0,00
Stålfiber	7800	-	-	-
PP-fiber	1000	-	-	-

\*For sement, pazzolaner og fillere oppgis densitet av tørrstoff. For TSS oppgis våt densitet.

Proporsjonert betong	kg/m <sup>3</sup>	Ønsket Oppnådd		Fersk betong	Volumkorleksjon***		
		kg	kg		korr.luft	korr.dens	Korrigert
Anlegg fa	398,1	19,9	19,9	Ønsket volum	0,0	-2,9	395,2
Elkem Microsilica	11,9	0,6	0,6	Innveid volum (l)	0,0	-0,1	11,9
Flyveaske	0,0	0,0	0,0	Luftinnhold (%)	0,0	0,0	0,0
Fritt vann	168,8	8,4	8,4	Målt betongdensitet (kg/m <sup>3</sup> )	0,0	-1,2	167,7
Absorbent vann	0,0	0,0	0,0	Effektivt w/(c+skp)	0,0	0,0	0,0
Ardal 0/8 mm nat. vask.	1074,6	53,7	53,7		0,0	-7,7	1066,7
Ardal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0
Ardal 8/16mm	716,4	35,8	35,8		0,0	-5,2	711,1
Ardal 16/22 mm	0,0	0,0	0,0	Aggressiver	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	Kloridinnhold (% av cem.)	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	Alkalier (kg/m <sup>3</sup> )	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	Andel reakt. bergarter (%)	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0
Dynamo sx-n	5,08	0,25	0,26		0,0	0,0	5,18
Mapfast HA	8,48	0,42	0,42		0,0	-0,1	8,42
Mapfast SA	0,00	0,00	0,00		0,0	0,0	0,00
Demper rm	0,50	0,02	0,02		0,0	0,0	0,49
Stålfiber	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0
PP-fiber	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0
Prop. betongdens. (kg/m <sup>3</sup> )	2373				0,0	-17,1	2356



Prosj./id.: **Anlegg fa + HA(dose 2)/ resept 5**

Blandevolum:	50 liter
Dato:	#####
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	
Utført av:	Øyvind og Arild

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg fa	398,1	19,907			19,907
Elkem Microsilica	11,9	0,597	50	0,597	1,194
Flyveaske	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	168,8	8,440		-2,050	6,390
Absorbert vann	0,0	0,000			0,000
Årdal 0/8 mm nat. vask.	1074,6	53,728	1,7	0,913	54,642
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	716,4	35,819	0,0	0,000	35,819
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Dynamo sx-n	5,1	0,253	82	0,207	0,253
Mapfast HA	8,5	0,424	72,5	0,307	0,424
Mapefast SA	0,0	0,000	50	0,000	0,000
Demper rm	0,5	0,025	99,5	0,025	0,025
Stålfiber	0,0	0,000			0,000
PP-fiber	0,0	0,000			0,000


\*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

\*\* NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning					
Synkmål	220	220			
Utbredelsesmål					
Luft	2	1,5			
Densitet	2405	2406			

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt	feb.27	29.feb			
Terninger	34	36			
150x300 sylindre					
100x200 sylindre					
		kl 12			
	t0	t3075			

## Resept 6

Proporsjonering av betong			Prosj.fid.: Anlegg FA + 20%FA + dosering 2 HA / Resept 6			SKANSKA																		
620111047.m						Utført av		Firma	Dato															
Initialparametre		Verdi				k	Øvind	ntru	17.02.2012															
w/(c+skp)		0,40	-	Materiale		Densitet *	Tørrestoff	Alkalier	Klorider															
s/c (silikastøv) [%]		3,0	2,00			[kg/m³]	[%]	[%]	[%]															
f/c (filler, flyveaske) [%]		32,8	1,00	Anlegg fa		2999	-	0,00	0,00															
Luftinnhold [%]		2,0	-	Elkem Microsilica		2200	50	0,00	0,00															
Tilsetningsstoff		% av C	% av S	Flyveaske		2200	100	0,00	0,00															
Dynamo sx-n		1,30	0,00	Dynamo sx-n		1080	18,5	0,00	0,00															
Mapfast HA		2,80	0,00	Mapfast HA		1100	27,5	0,00	0,00															
Mape SA		0,00	0,00	Mape SA		1500	50	0,00	0,00															
Demper rm		0,17	0,00	Demper rm		1000	0,5	0,00	0,00															
Fiber		Vol %		Stålfiber		7800	-	-	-															
Stålfiber		0,0		PP-fiber		1000	-	-	-															
PP-fiber		0,0		PP-fiber		1000	-	-	-															
Matraks		Verdi		*For sement, pazzolaner og fillere oppgis densitet av tørstoff. For TSS oppgis våt densitet.																				
Ønsket matrivolum [l/m³]		330																						
Oppnådd matrivolum** [l/m³]		330																						
Volum sementlim [l/m³]		309																						
Fillerbidrag [l/m³]		21																						
w/p		0,36																						
**Tilpass matrivolum, Cfr M			Sett "Oppnådd" lik "Ønsket"; Cfr N			***Nullstill korreksjon, Cfr K																		
Proporsjonert betong				Ønsket		Oppnådd		Fersk betong			Volumkorreksjon***													
Materialer				kg		kg		Egenskap			korr.luft			korr.dens			Korrigert							
Anlegg fa				291,8		14,6		14,6		Ønsket volum			50,0			1,2			-1,9			290,7		
Elkem Microsilica				8,7		0,4		0,4		Innveid volum (l)			50,0			0,0			-0,1			8,7		
Flyveaske				95,6		4,8		4,8		Luftinnhold (%)			1,8			0,4			-0,8			95,3		
Fritt vann				161,9		8,1		8,1		Målt betongdensitet (kg/m³)			2356			0,6			-1,0			161,7		
Absorbent vann				8,6		0,4		0,4		Effektivt w/(c+skp)			0,401			0,0			-0,1			8,6		
Ardal 0/8 mm nat. vask.				1072,2		53,6		53,6								4,3			-8,9			1069,2		
Ardal 0/2 mm nat. vask.				0,0		0,0		0,0								0,0			0,0			0,0		
Ardal 8/16mm				720,5		36,0		36,0								2,9			-4,6			718,5		
Ardal 16/22 mm				0,0		0,0		0,0								0,0			0,0			0,0		
				0,0		0,0		0,0		Aggressiver						0,0			0,0			0,0		
				0,0		0,0		0,0		Kloridinnhold [% av cem.]			0,00			0,0			0,0			0,0		
				0,0		0,0		0,0		Alkalier (kg/m³)			0,00			0,0			0,0			0,0		
				0,0		0,0		0,0		Andel reakt. bergarter [%]			0,0			0,0			0,0			0,0		
				0,0		0,0		0,0								0,0			0,0			0,0		
				0,0		0,0		0,0								0,0			0,0			0,0		
				0,0		0,0		0,0								0,0			0,0			0,0		
Dynamo sx-n				3,79		0,19		0,20								0,0			0,0			3,95		
Mapfast HA				8,16		0,41		0,42								0,0			-0,1			8,43		
Mape SA				0,00		0,00		0,00								0,0			0,0			0,00		
Demper rm				0,50		0,02		0,02								0,0			0,0			0,49		
Stålfiber				0,0		0,0		0,0								0,0			0,0			0,0		
PP-fiber				0,0		0,0		0,0								0,0			0,0			0,0		
Prop. betongdens. (kg/m³)				2362												9,4			-15,2			2366		

Effekten av lavvarmebetong på fasthetsutviklingen og rissrisiko i anleggskonstruksjoner utsatt for fastholding

<b>Prosj./id.:</b>	<b>Anlegg FA + 20%FA + dosering 2 HA / Resept 6</b>
--------------------	---

Blandevolum:	50 liter
Dato:	
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	
Utført av:	

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg fa	291,6	14,579			14,579
Elkem Microsilica	8,7	0,437	50	0,437	0,875
Flyveaske	95,6	4,782	0	0,000	4,782
Fritt vann	161,9	8,094		-1,824	6,271
Absorbent vann	8,6	0,429			0,429
Årdal 0/8 mm nat. vask.	1072,2	53,608	1,7	0,911	54,520
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	720,5	36,025	0,0	0,000	36,025
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Dynamo sx-n	3,8	0,190	81,5	0,154	0,190
Mapfast HA	8,2	0,408	72,5	0,296	0,408
Mape SA	0,0	0,000	50	0,000	0,000
Demper rm	0,5	0,025	99,5	0,025	0,025
Stålfiber	0,0	0,000			0,000
PP-fiber	0,0	0,000			0,000

6,699

\*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

\*\* NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong				
Tid etter vanntilsetning				
Synkmål	245		240	B2-50g extra sp
Utbredelsesmål				
Luft	1,4		1,5	
Densitet	2398		2368	

Prøvestykker (antall)				
Utstøpningstidspunkt	27.feb		05.mar	
Terninger	34		24	t140 t120
150x300 sylindre				
100x200 sylindre			t0	

Resept 7

Proporsjonering av betong Proj.fid.: Anlegg FA + 20%FA + dosering 2 HA + SA / Resept 7 **SKANSKA**

Initialparametre	Verdi	k
w/(c+skp)	0,40	-
s/c (silikastøv) [%]	3,0	2,00
f/c (filler, flyveaske) [%]	32,8	1,00
Luftinnhold [%]	2,0	-
Tilsetningsstoff	% av C	% av S
Dynamo sx-n	1,80	0,00
Mapfast HA	2,80	0,00
Mape SA	1,40	0,00
Demper rm	0,17	0,00
Fiber	Vol %	
Stålfiber	0,0	
PP-fiber	0,0	
Matraks	Verdi	
Ønsket matrivolum [l/m <sup>3</sup> ]	330	
Oppnådd matrivolum** [l/m <sup>3</sup> ]	330	
Volum sementim [l/m <sup>3</sup> ]	309	
Fillerbidrag [l/m <sup>3</sup> ]	21	
w/p	0,36	



Utført av	Firma	Dato		
Øvind	ntru	04.03.2012		
Materiale	Densitet *	Tørrestoff	Alkalier	Klorider
Anlegg fa	2999	-	0,00	0,00
Elkem Microsilica	2200	50	0,00	0,00
Flyveaske	2200	100	0,00	0,00
Dynamo sx-n	1080	18,5	0,00	0,00
Mapfast HA	1100	27,5	0,00	0,00
Mape SA	1500	50	0,00	0,00
Demper rm	1000	0,5	0,00	0,00
Stålfiber	7800	-	-	-
PP-fiber	1000	-	-	-

\*For sement, pazzolaner og fillere oppgis densitet av tørrestoff. For TSB oppgis våt densitet.

\*\*Tilpass matrivolum, Cfr M

Sett "Oppnådd" lik "Ønsket"; Cfr N

\*\*\*Nullstill korreksjon; Cfr K

Proporsjonert betong		Ønsket		Oppnådd		Fersk betong			Volumkorreksjon***			
Materialer	kg/m <sup>3</sup>	kg	kg	kg	kg	Egenskap	korr.luft	korr.dens	Korrigert			
Anlegg fa	290,9	14,5	14,5			Ønsket volum	0,0	0,0	290,9			
Elkem Microsilica	8,7	0,4	0,4			Innveid volum (l)	0,0	0,0	8,7			
Flyveaske	95,4	4,8	4,8			Luftinnhold (%)	0,0	0,0	95,4			
Fritt vann	161,5	8,1	8,1			Målt betongdensitet (kg/m <sup>3</sup> )	0,0	0,0	161,5			
Absorbent vann	8,6	0,4	0,4			Effektivt w/(c+skp)	0,0	0,0	8,6			
Ardal 0/8 mm nat. vask.	1072,2	53,6	53,6				0,0	0,0	1072,2			
Ardal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0			
Ardal 8/16mm	720,5	36,0	36,0				0,0	0,0	720,5			
Ardal 16/22 mm	0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0			
	0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0			
	0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0			
	0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0			
	0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0			
	0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0			
	0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0			
Dynamo sx-n	4,36	0,22	0,22			Aggressiver	0,0	0,0	4,36			
Mapfast HA	8,14	0,41	0,41			Kloridinnhold [% av cem.]	0,00	0,00	8,14			
Mape SA	4,07	0,20	0,20			Alkalier (kg/m <sup>3</sup> )	0,00	0,00	4,07			
Demper rm	0,49	0,02	0,02			Andel reakt. bergarter [%]	0,0	0,0	0,49			
Stålfiber	0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0			
PP-fiber	0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0			
Prop. betongdens. (kg/m <sup>3</sup> )	2363						0,0	0,0	2363			

Prosj./id.:

Anlegg FA + 20%FA + dosering 2 HA +  
SA / Resept 7

Blandevolum:	50 liter
Dato:	
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	
Utført av:	

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt <sup>+</sup> %	Korr. kg	Oppveid <sup>**</sup> kg
Anlegg fa	290,9	14,544			14,544
Eliem Microsilica	8,7	0,436	50	0,436	0,873
Flyveaske	95,4	4,770	0	0,000	4,770
Fritt vann	161,5	8,075		-1,947	6,128
Absorbent vann	8,6	0,429			0,429
Årdal 0/8 mm nat. vask.	1072,2	53,608	1,7	0,911	54,520
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	720,5	36,025	0,0	0,000	36,025
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Dynamo sx-n	4,4	0,218	81,5	0,178	0,218
Mapfast HA	8,1	0,407	72,5	0,295	0,407
Mape SA	4,1	0,204	50	0,102	0,204
Demper rm	0,5	0,025	99,5	0,025	0,025
Stårfiber	0,0	0,000			0,000
PP-fiber	0,0	0,000			0,000

0,550

\*Se fotnote på delart "Proporsjonering"

\*\* NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong				
Tid etter vanntilsetning				
Synkmål	235		240	
Utbredelsesmål				
Luft	1,4		1,4	
Densitet	2374		2374	

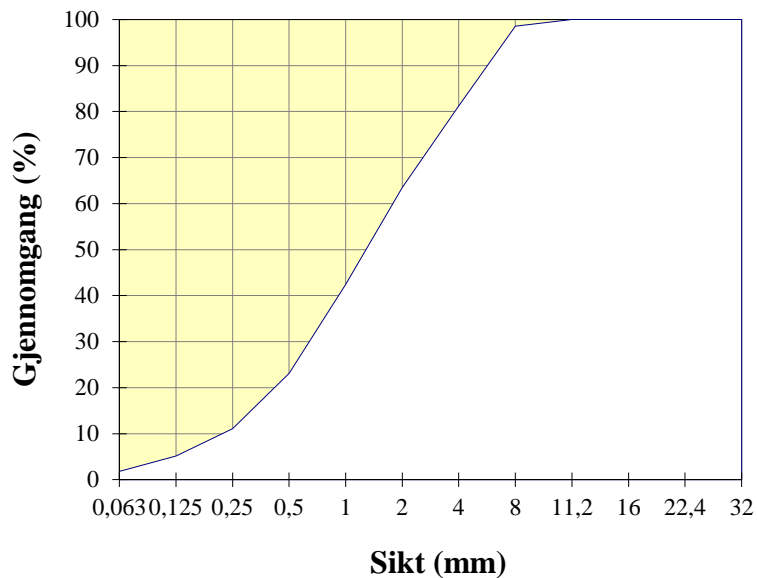
Prøvestykker (antall)				
Utstøpningstidspunkt	12:30		14:30	
Terminger	34		21	
150x300 sylindre			t200	t315
100x200 sylindre				

Siktekurver:

## Fraksjon I

Type:	Årdal 0/8 mm nat. vask.
Dato:	21.11.2008
FM =	3,28

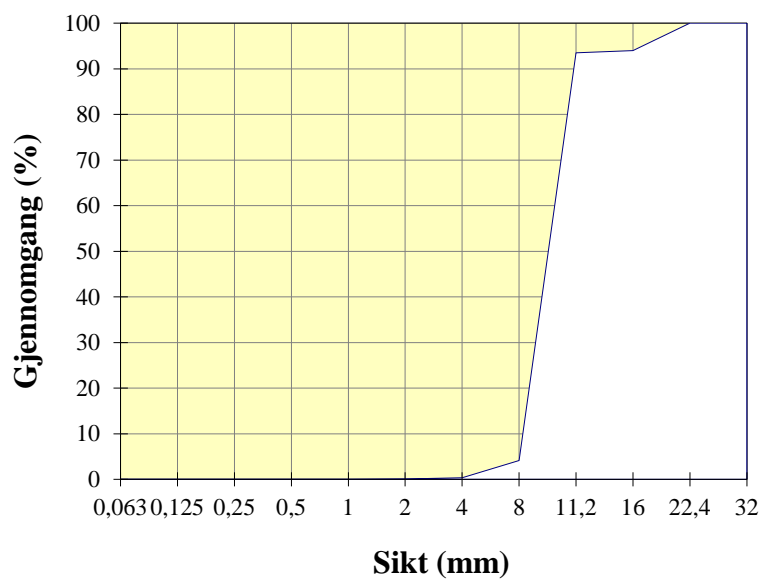
Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)	Gjennomgang (%)
	1	2		
32	0	0	0,0	100,0
22,4	0	0	0,0	100,0
16	0	0	0,0	100,0
11,2	0	0	0,0	100,0
8	18,9	18,9	1,5	98,5
4	243,7	243,7	18,8	81,2
2	474,5	474,5	36,5	63,5
1	747,8	747,8	57,6	42,4
0,5	999	999	76,9	23,1
0,25	1155,2	1155,2	88,9	11,1
0,125	1232,3	1232,3	94,9	5,1
0,063	1275,6	1275,6	98,2	1,8
Bunn	1299	1299		



## Fraksjon III

Type:	Årdal 8/16mm
Dato:	21.11.2008
FM =	6,51

Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)	Gjennomgang (%)
	1	2		
32	0	0	0,0	100,0
22,4	0	0	0,0	100,0
16	603	5	6,0	94,0
11,2	603	54	6,5	93,5
8	9585,4	98	95,9	4,1
4	9966	99	99,7	0,3
2	9992	100	99,9	0,1
1	10000	100	100,0	0,0
0,5	10000	100	100,0	0,0
0,25	10000	100	100,0	0,0
0,125	10000	100	100,0	0,0
0,063	10000	100	100,0	0,0
Bunn	10000	100		







## Vedlegg B- Herdekasseforsøk

Resept 1:

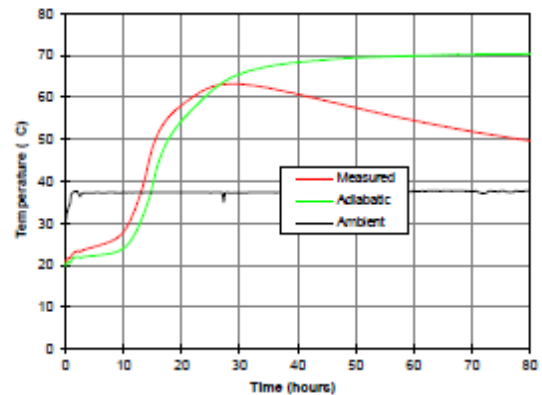
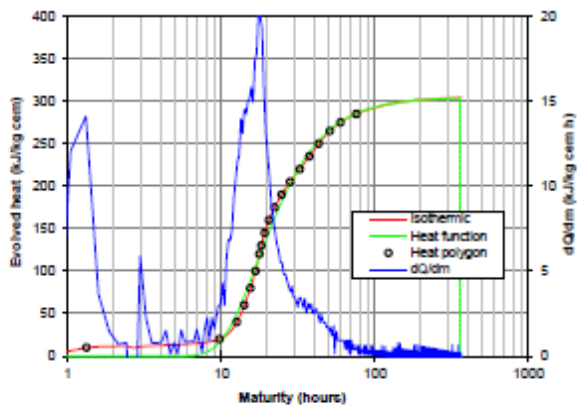
**Adiabatic temperature and isothermic heat** **SKANSKA**  
(L 2 B -- 06/02 2012)

Concrete parameters		Temp. trans. coeff.	
Thermal inertia coeff.	0.0187	dQ/dm	0.01
T	23.4	Q <sub>∞</sub>	305
Heat capacity (fresh)	1.04	m·c	350
Heat capacity (hardened)	1.04		
Cement content	412	Heat function	
S <sub>0</sub> time	11.1	m <sub>0</sub> time	35.7
A <sub>0</sub> sat time	21.719	Q <sub>∞</sub>	305
H <sub>0</sub> sat time	1083	I	17.34
A <sub>∞</sub> hydration	21.719	α	1.86
B <sub>∞</sub>	1083	I <sub>2</sub>	0.9569
A <sub>∞</sub> start temperature	20	α <sub>∞</sub>	1.893

Heat polygon	
Reference heat (kJ/kg cem)	Concrete maturity (h)
0	0.0
10	1.3
20	9.7
30	17.6
40	24.1
50	29.5
60	34.2
70	38.2
80	41.5
90	44.1
100	46.1
120	48.2
140	49.7
160	50.4
180	51.1
200	51.7
220	52.2
230	52.4
240	52.5
250	52.6
260	52.7
270	52.8
280	52.9
290	53.0
300	53.1
320	53.2
340	53.3
360	53.4
380	53.5
400	53.6
420	53.7
440	53.8
460	53.9
480	54.0
500	54.1
520	54.2
540	54.3
560	54.4
580	54.5
600	54.6
620	54.7
640	54.8
660	54.9
680	55.0
700	55.1
720	55.2
740	55.3
760	55.4
780	55.5
800	55.6
820	55.7
840	55.8
860	55.9
880	56.0
900	56.1
920	56.2
940	56.3
960	56.4
980	56.5
1000	56.6



$$Q = Q_{\infty} \cdot e^{-\left(\frac{r}{M}\right)^{\alpha}}$$



Project	
Name	Wasserscheider
Local	Random state
Part no.	Grund & Nord

Resept 2:

Adiabatic temperature and isothermic heat

SKANSKA

(6.2.8 -- 06.02.2017)

Concrete parameters

Temp. trans. coeff.	0.0161
Density	2419
Heat capacity (fresh)	1.03
Heat capacity (matured)	1.03
Compress. strength	39.8
Setting time	6.9
A <sub>1</sub> set time	3.7124
B <sub>1</sub> set time	562
A <sub>2</sub> hydration	3.7124
B <sub>2</sub> hydration	562
Adiab. start temperature	20

Temp. trans. coeff.

dQ/dm	0.01
m <sup>2</sup>	250
m·c	400

Heat function

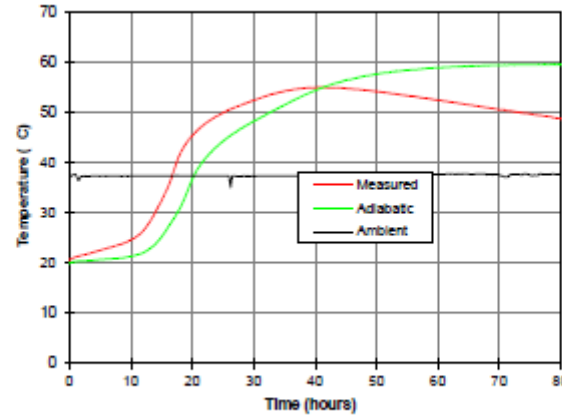
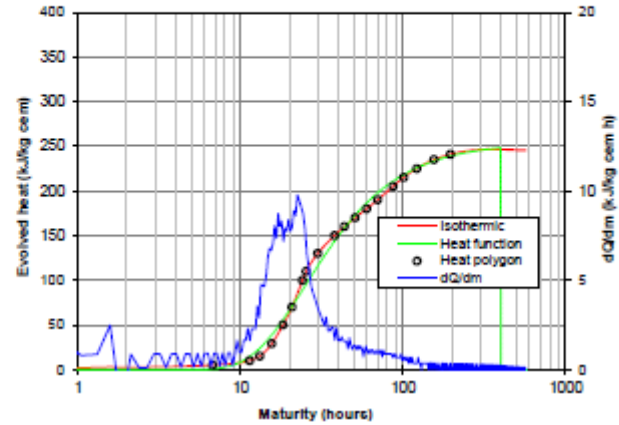
m <sub>1</sub> ·Q <sub>∞</sub>	400
Q <sub>∞</sub>	25.4
t	25.01
α	1.34
R <sup>2</sup>	0.9723
ΣΔ <sub>1</sub>	708.4

Heat polygon

Reference heat (kJ/kg cement)	Compress. strength (N)
0	0.0
5	5.7
10	11.4
15	17.2
20	23.0
25	28.8
30	34.6
35	40.4
40	46.2
45	52.0
50	57.8
55	63.6
60	69.4
65	75.2
70	81.0
75	86.8
80	92.6
85	98.4
90	104.2
95	110.0
100	115.8
105	121.6
110	127.4
115	133.2
120	139.0
125	144.8
130	150.6
135	156.4
140	162.2
145	168.0
150	173.8
155	179.6
160	185.4
165	191.2
170	197.0
175	202.8
180	208.6
185	214.4
190	220.2
195	226.0
200	231.8
205	237.6
210	243.4
215	249.2
220	255.0
225	260.8
230	266.6
235	272.4
240	278.2
245	284.0
250	289.8
255	295.6
260	301.4
265	307.2
270	313.0
275	318.8
280	324.6
285	330.4
290	336.2
295	342.0
300	347.8
305	353.6
310	359.4
315	365.2
320	371.0
325	376.8
330	382.6
335	388.4
340	394.2
345	400.0
350	405.8
355	411.6
360	417.4
365	423.2
370	429.0
375	434.8
380	440.6
385	446.4
390	452.2
395	458.0
400	463.8
405	469.6
410	475.4
415	481.2
420	487.0
425	492.8
430	498.6
435	504.4
440	510.2
445	516.0
450	521.8
455	527.6
460	533.4
465	539.2
470	545.0
475	550.8
480	556.6
485	562.4
490	568.2
495	574.0
500	579.8
505	585.6
510	591.4
515	597.2
520	603.0
525	608.8
530	614.6
535	620.4
540	626.2
545	632.0
550	637.8
555	643.6
560	649.4
565	655.2
570	661.0
575	666.8
580	672.6
585	678.4
590	684.2
595	690.0
600	695.8
605	701.6
610	707.4
615	713.2
620	719.0
625	724.8
630	730.6
635	736.4
640	742.2
645	748.0
650	753.8
655	759.6
660	765.4
665	771.2
670	777.0
675	782.8
680	788.6
685	794.4
690	800.2
695	806.0
700	811.8
705	817.6
710	823.4
715	829.2
720	835.0
725	840.8
730	846.6
735	852.4
740	858.2
745	864.0
750	869.8
755	875.6
760	881.4
765	887.2
770	893.0
775	898.8
780	904.6
785	910.4
790	916.2
795	922.0
800	927.8
805	933.6
810	939.4
815	945.2
820	951.0
825	956.8
830	962.6
835	968.4
840	974.2
845	980.0
850	985.8
855	991.6
860	997.4
865	1003.2
870	1009.0
875	1014.8
880	1020.6
885	1026.4
890	1032.2
895	1038.0
900	1043.8
905	1049.6
910	1055.4
915	1061.2
920	1067.0
925	1072.8
930	1078.6
935	1084.4
940	1090.2
945	1096.0
950	1101.8
955	1107.6
960	1113.4
965	1119.2
970	1125.0
975	1130.8
980	1136.6
985	1142.4
990	1148.2
995	1154.0
1000	1159.8



$$Q = Q_{\infty} \cdot e^{-\left(\frac{t}{M}\right)^{\alpha}}$$



Project

Name	Work sheet development
Test id	Random date
Project no.	Concrete & Steel

Effekten av lavvarmebetong på fasthetsutviklingen og rissrisiko i anleggskonstruksjoner utsatt for fastholding

Resept 3:

**Adiabatic temperature and isothermic heat** **SKANSKA**  
(v 2.8 ss 06-02-2012)

**Concrete parameters**

Temp. trans. coeff.	0,0211
Density	2393
Heat capacity (fresh)	1,04
Heat capacity (hardened)	1,04
Cement content	405
set time	11,4
A - set time	24642
B - set time	751
A - hydration	24642
B - hydration	751
Adia. start temperature	20

**Temp. trans. coeff.**

dQ/dm	0,01
m->	300
m<-	355

**Heat function**

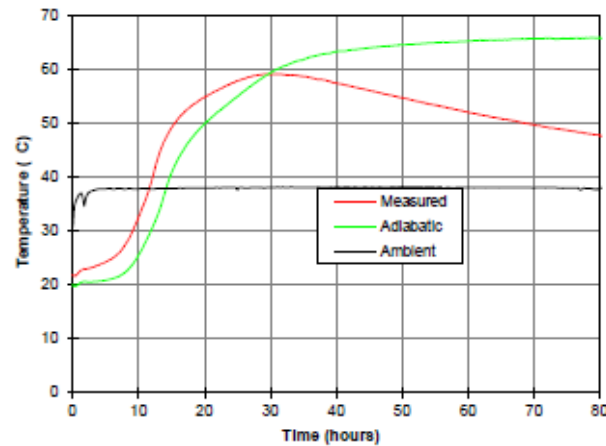
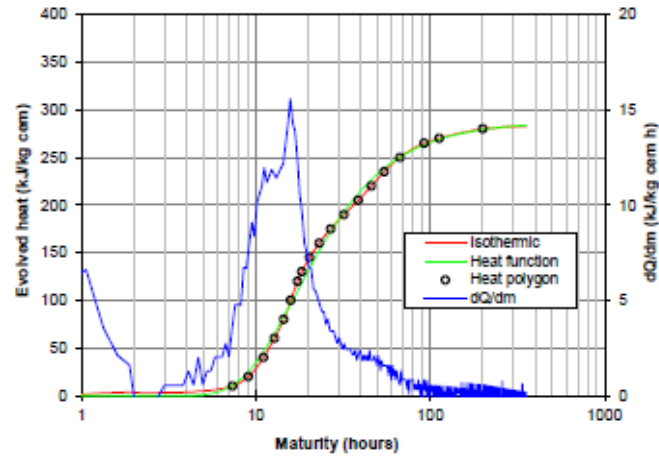
m-limit	355
Q <sub>∞</sub>	287
τ	16,86
g	1,43
R'	0,9885
S <sub>∞</sub>	3475

**Heat polygon**

Reference heat (kJ/kg cem)	Corresp. maturity (h)
0	0,1
10	7,4
20	9,1
40	11,1
60	12,8
80	14,5
100	15,9
120	17,3
130	18,3
145	20,4
160	23,1
175	25,9
190	28,0
205	38,6
220	45,0
235	54,5
250	67,1
265	92,5
280	200,3
270	112,5



$$Q = Q_{\infty} \cdot e^{-\left(\frac{\tau}{M}\right)^{\alpha}}$$



**Project**

Name	Worksheet development
Test id	Random data
Perf. by	Øyvind & Arild

Resept 4:

**Adiabatic temperature and isothermic heat** **SKANSKA**  
(V 2.8 ss 06-02-2012)

*Concrete parameters*

Temp. trans. coeff.	0,0175
Density	2380
Heat capacity (fresh)	1,03
Heat capacity (hardened)	1,03
Cement content	397
Set time	10,6
A - set time	31334
B - set time	-109
A - hydration	31334
B - hydration	-109
Adia. start temperature	20

*Temp. trans. coeff.*

dQ/dm	0,01
m>	200
m<	400

*Heat function*

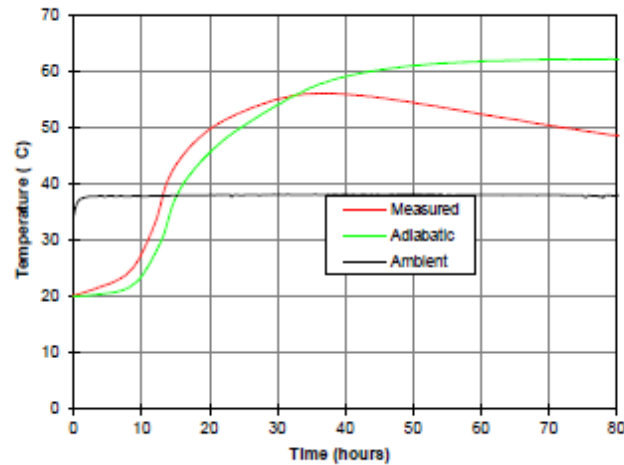
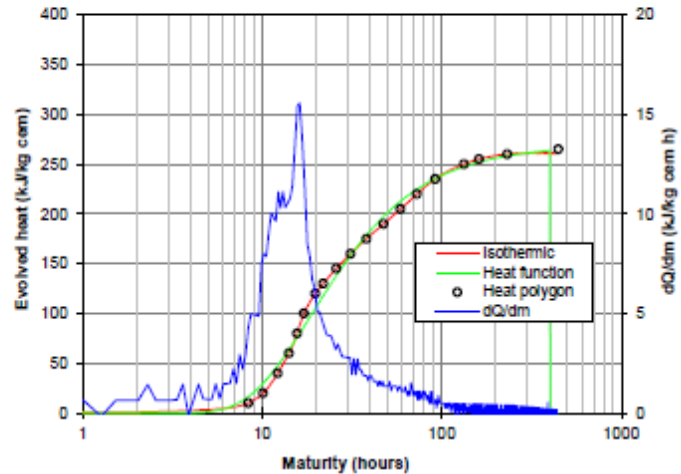
m-limit	400
Q <sub>∞</sub>	269
τ	18,63
α	1,27
R	0,9806
ΔΔ <sub>0</sub>	7138

*Heat polygon*

Reference heat (kJ/kg cem)	Corresp. maturity (h)
0	0,0
10	8,4
20	10,1
40	12,2
60	14,1
80	15,6
100	17,1
120	19,8
130	21,8
145	25,9
160	31,0
175	38,0
190	47,4
205	58,8
220	72,7
235	91,9
250	133,1
255	161,5
260	231,7
265	445,2



$$Q = Q_{\infty} \cdot e^{\left(-\frac{\tau}{M}\right)^{\alpha}}$$



*Project*

Name	Worksheet development
Test id	Random data
Perf. by	Øyvind & Arild

Effekten av lavvarmebetong på fasthetsutviklingen og rissrisiko i anleggskonstruksjoner utsatt for fastholding

Resept 5:

**Adiabatic temperature and isothermic heat** **SKANSKA**  
(V 2.8 ss 06-02-2012)

**Concrete parameters**

Temp. trans. coeff.	0,0207
Density	2406
Heat capacity (fresh)	1,04
Heat capacity (hardened)	1,04
Cement content	410
Set time	9,2
A - set time	28387
B - set time	-26
A - hydration	28387
B - hydration	-26
Adia. start temperature	20

**Temp. trans. coeff.**

dQ/dm	0,01
m>	250
m<	358

**Heat function**

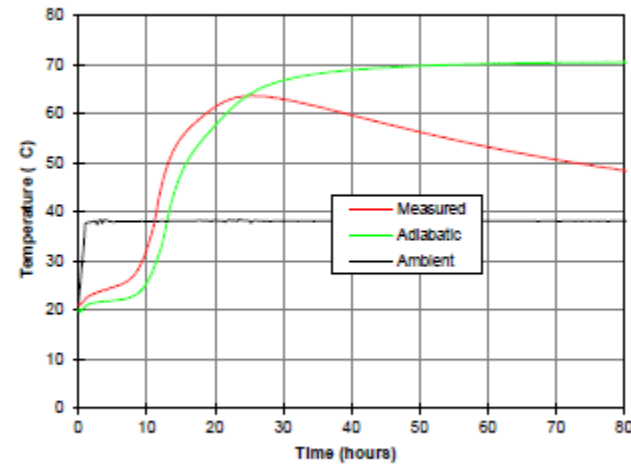
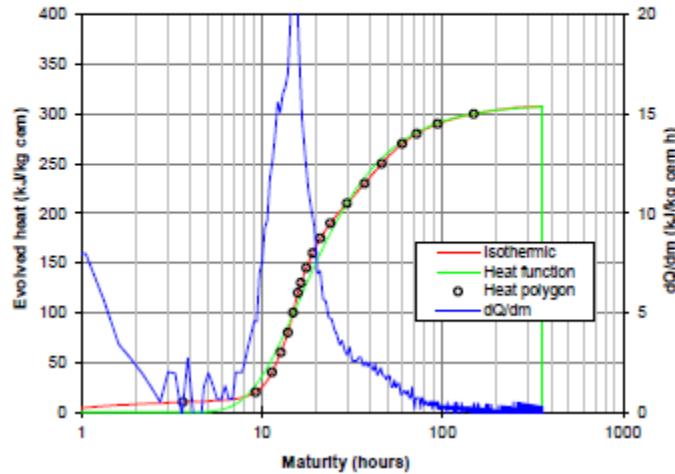
m-limit	358
Q <sub>∞</sub>	310
τ	16,24
α	1,58
R	0,9501
ΔT <sub>0</sub>	6978

**Heat polygon**

Reference heat (kJ/kg cem)	Corresp. maturity (h)
0	0,0
10	3,7
20	9,3
40	11,4
50	12,7
80	13,9
100	14,9
120	15,9
130	16,5
145	17,6
160	19,1
175	21,1
190	24,0
210	29,6
230	37,0
250	46,1
270	50,0
290	72,1
290	94,1
300	148,9



$$Q = Q_{\infty} \cdot e^{\left(-\frac{\tau}{M}\right)^{\alpha}}$$



**Project**

Name	Worksheet development
Test id	Random data
Perf. by	Øyvind & Arild

Effekten av lavvarmebetong på fasthetsutviklingen og rissrisiko i anleggskonstruksjoner utsatt for fastholding

Resept 6:

**Adiabatic temperature and isothermic heat**

(v. 2.8 - 06.02.2012)

SKANSKA

Concrete parameters

Temperature coeff.	0.0166
W/c ratio	2.368
W/B ratio	1.03
Heat capacity (fresh)	1.493
Heat capacity (aged)	1.493
Cement content	397
Adm. content	4.8
A - heat sink	21013
B - heat sink	3984
A - hydration	21013
B - hydration	3984
Adm. start temperature	20

Temp. trans. coeff.

α <sub>adm</sub>	0.01
m = c	200
m = c	331

Heat function

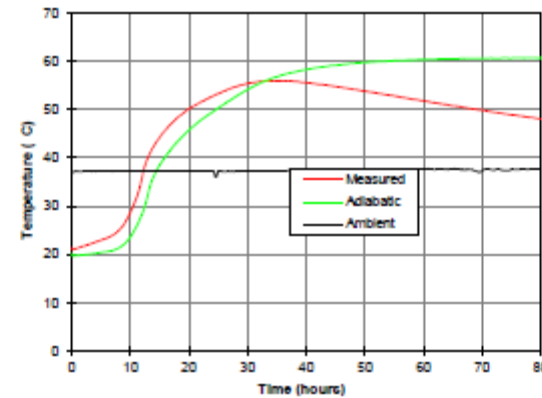
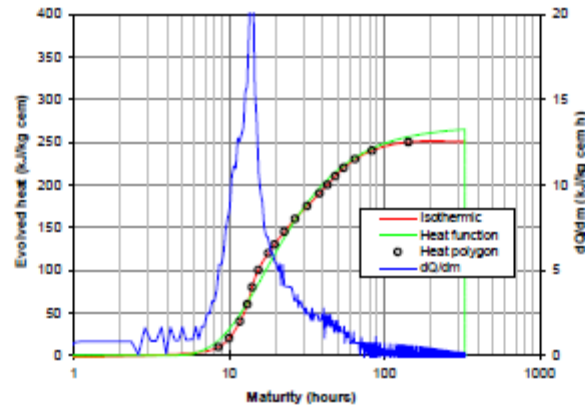
Q <sub>adm</sub>	330
Q <sub>adm</sub>	269
τ	17.09
α	1.44
β	0.9719
ΣQ <sub>adm</sub>	58708

Heat polygon

Reference heat (kJ/kg cem)	Corr. age maturity (h)
0	0.1
10	8.9
20	10.0
40	13.7
60	17.1
80	20.1
100	22.4
120	24.9
140	27.7
160	30.6
180	33.7
190	36.2
200	38.0
210	39.3
220	40.8
230	42.4
240	43.2
250	44.2
260	45.0



$$Q = Q_{\infty} \cdot e^{-\left(\frac{t}{M}\right)^{\alpha}}$$



Project

Name	Workshop development
Location	Oslo
Project No.	00000000
Author	Skanska & NBB

Effekten av lavvarmebetong på fasthetsutviklingen og rissrisiko i anleggskonstruksjoner utsatt for fastholding

Resept 7:

**Adiabatic temperature and isothermic heat**

(v. 2.8 → 06.07.2012)

SKANSKA

Concrete parameters

Temp. trans. coeff.	0.0176
$\rho_{fresh}$	2374
Heat capacity (fresh)	1.03
$\rho_{20}$	2374
Water content	17.9
Cement content	395
$\rho_{20}$	2374
A - modulus	29061
B - modulus	389
A - hydration	29061
B - hydration	389
Auto. start temperature	20

Temp. trans. coeff.

$\alpha_{adm}$	0.01
$m$	290
$m \cdot c$	290.9

Heat function

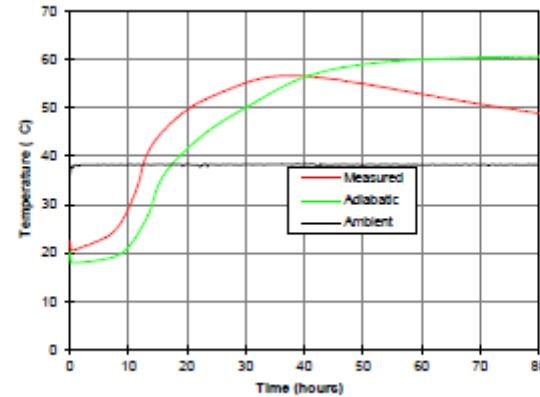
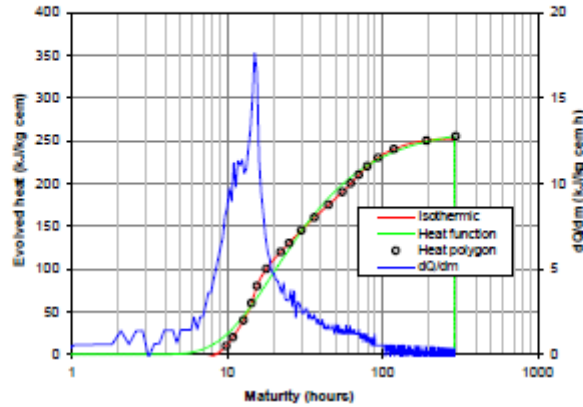
$m \cdot \rho_{adm}$	290.9
$Q_{adm}$	264
$\tau$	20.17
$\alpha$	1.25
$R^2$	0.9647
$\Sigma \Delta_{adm}$	12593

Heat polygon

Reference Age (h/kg cement)	Corr. age maturity (h)
0	1.2
10	9.9
20	10.9
40	12.1
60	14.4
80	15.6
100	17.9
120	22.2
130	25.1
145	30.1
160	36.6
175	45.0
190	55.3
200	62.6
210	70.4
220	79.9
230	83.9
240	118.6
250	132.1
255	137.1



$$Q = Q_{\infty} \cdot e^{-\left(\frac{\tau}{M}\right)^{\alpha}}$$



Project

Name	Workshop development
Location	Skanska Norge
Project	Skanska Norge



## Vedlegg C - Datablad

Anlegg FA:

<b>PRØVNINGSRAPPORT</b>			
Oppdragsfører:	Dalen Fabrikker		
Prøven merket:	Anlegg FA sement utatt Bulkbilst.17.01.11 til forsøkssement, Big Bag Nr. 3		
Prøve kode:	TF3-11	Ref:	
<b>KJEMISK ANALYSE EN 196-2</b>		<b>FYSIKALSK PRØVNING EN 196</b>	
Gledetap	1.30 %	<b>FINHET</b>	
Fri kalk	0.78 %	Partikkelanalyse +80µm	0.07 %
Kalkmel	- %	" " +64µm	1.34 %
Flyvestof	18.70 %	" " -24µm	75.4 %
Klor total	0.024 %	" " -30 µm	83.3 %
Krom vannløselig (Cr <sup>6+</sup> )	0.00 mg/kg	Spesifikk overflate; Blaine	370 m <sup>2</sup> /kg
Uopløselig rest	- %		
Farge	- %	<b>NORMAL KONSISTENS</b>	
Svovel trioksyd (SO <sub>3</sub> )	2.75 %	vannbehov	28.3 %
Silika (SiO <sub>2</sub> )	27.04 %		
Aluminiumoksyd (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	8.68 %	<b>VOLUMBESTANDIGHET</b>	
Jernoksyd (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4.80 %	Le Chatelier	1.0 mm
Kalsiumoksyd (CaO)	52.73 %		
Magnesiumoksyd (MgO)	1.84 %	<b>BINDETIDER</b>	
Fosfor pentoksyd (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0.26 %	Stærkning begynt	185 min.
Kaliumoksyd (K <sub>2</sub> O)	0.72 %		
Natriumoksyd (Na <sub>2</sub> O)	0.42 %	<b>TRYKKFASTHET</b>	
Alkali	0.90 %	1 dagn	12.1 Mpa
		2 dagn	21.6 MPa
		7 dagn	33.7 MPa
		28 dagn	MPa
		Falkbinding:	INGEN
Norcem A.S Brevik, Sement- og betonglaboratoriet, 31. januar 2011			
i.s.a.			
Laboratoriesjef			

Mapefast HA:



# Mapefast HA

11.11

## Herdningsakselererende tilsetningsstoff

### PRODUKTBeskrivelse

**Mapefast HA** er et flytende herdningsakselererende tilsetningsstoff til bruk i mørtel og betong for å sikre høyere tidligfasthet. Produktet er spesielt utviklet for sementbaserte produkter hvor flygeaske inngår, men kan også med fordel brukes i alle sementbaserte masser.

### BRUKSOMRÅDER

- Betong med høye krav til tidligfasthet for tidligere avforming
- Støping ved lavere temperaturer
- Betonger inneholdende blandingssementer, spesielt flygeaske

### EGENSKAPER

**Mapefast HA** er en unik sammensetning av ulike komponenter som gir betongen vesentlig høyere tidligfastheter også når temperaturen i betongen faller. Spesielt fremtredende blir denne egenskapen i betonger som inneholder blandingssementer (som flygeaske, slagg). Hydrasjonsvarmen frigjøres på et tidligere tidspunkt, noe som fører til økt tidligfasthet (se figur 1), uten at maksimumstemperaturen i massen øker. Dette bedrer sikkerheten for at betongen oppnår tilstrekkelig fasthet før avforming, og også tidlig nok oppnår nok fasthet til å motstå frysing.

I henhold til NS-EN 13670 skal det sikres mot at betongens temperatur noe sted faller under 0°C før betongen har nådd en fasthet på 5 MPa. Med bruk av **Mapefast HA** vil dette kravet være lettere å oppnå, men i den kalde årstid bør tilsetning av **Mapefast HA** uansett kombineres med aktiv beskyttelse av betongen etter utstøping.

**Mapefast HA** inneholder ikke klorider som kan forårsake armeringskorrosjon.

**Mapefast HA** påvirker ikke konsistens eller luftinnhold i den ferske betongen, og nedsetter heller ikke betongens åpentid.

### KOMBINASJON MED ANDRE MIDLER

**Mapefast HA** lar seg kombinere med andre Mapei tilsetningsstoffer, som for eksempel superplastiserende stoffer i **Dynamon**-serien for bedre flytegenskaper, og **Mapeair** luftinnførende stoffer ved produksjon av frostbestandig betong.

### DOSERING

Normaldosering i betong vil være mellom 0,8 og 1,5 % av sementvekten. Høyere doseringer vil ikke bidra vesentlig til økt tidligfasthet. **Mapefast HA** vil være virksomt uavhengig av tidspunktet det tilsettes i blandingprosessen, men for å oppnå best mulig fordeling i massen anbefaler vi å tilsette **Mapefast HA** samtidig med blandedvannet.

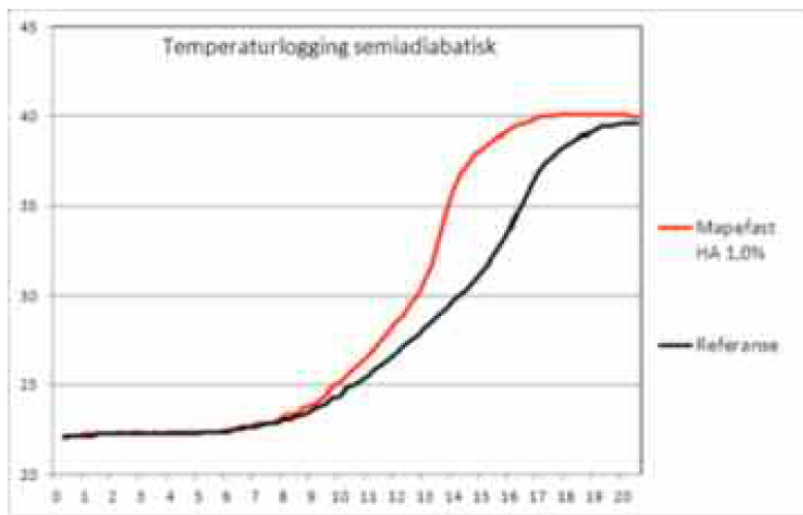
Det er også mulig å tilsette **Mapefast HA** direkte i automiksere, men da kreves det en blandetid på minst ett minutt pr m<sup>3</sup> - dog aldri mindre enn 5 minutter.

### EMBALLASJE

**Mapefast HA** er tilgjengelig i 25 liters kanner, 200 liters fat, 1000 liter IBC-containerer og i bulk.

### VERNETILTAK

For helse-, miljø- og sikkerhetsinformasjon - se eget sikkerhetsdatablad. Sikkerhetsdatabladene finnes på [www.mapei.com](http://www.mapei.com).



Figur 1. Betong B30 M60, Standard FA, 340 kg, 0,8 % SX-N, konsistens 240 mm synk. v/c 0,56

### Produsent:

Mapei AS  
 Vallsetvegen 6, 2120 Sagstua, Norway  
 Tlf: +47 62 97 20 00 Fax: +47 62 97 20 99  
 post@mapei.no  
 www.mapei.com



**MERK**

De tekniske anbefalinger og detaljer som fremkommer i denne produktbeskrivelse representerer vår nåværende kunnskap og erfaring om produktene.

All ovenstående informasjon må likevel betraktes som retningsgivende og gjenstand for vurdering.

Enhver som benytter produktet må på forhånd forsikre seg om at produktet er egnet for tilsiktet anvendelse. Brukeren står selv ansvarlig dersom produktet blir benyttet til andre formål enn anbefalt, eller ved feilaktig utførelse.

Alle leveranser fra Mapei AS skjer i henhold til de til enhver tid gjeldende salgs- og leveringsbetingelser som anses akseptert ved bestilling.

**TEKNISKE SPESIFIKASJONER****Produktspesifikasjoner:**

Form:	væske
Farge:	klar
Viskositet (Brookfield Viscometer DV-1, LV1, 100rpm ved 20°C ± 2°C):	lettflytende; < 30 mPa · S
Tørrestoffinnhold, %:	27,5 ± 1,5
Densitet, g/cm <sup>3</sup> :	1,10 ± 0,02
pH:	11 ± 1
Kloridinnhold, %:	< 0,1
Alkaliinnhold (Na <sub>2</sub> O-ekvivalent):	< 7,0

**Bruksegenskaper i betong (forprøving med aktuelle forutsetninger kreves):**

	Referanse	Tilsatt Mapefast HA
Sementmengde, kg/m <sup>3</sup> (CEM II, A/V – 42.5 R):	340	340
Mapefast HA (i % av sementvekten):	0	1,3
v/c - forhold:	0,56	0,56
Luft (%)	1,6	1,5
Konsistens, mm - synkmål 5 min:	230	240
Trykkfasthet, N/mm <sup>2</sup> 18 timer (20 ° C)	12,4	16,0
28 døgn	42,1	45,0

Begge betonger inneholder 0,8 % **Dynamon SX-N**

Mapefast SA:



# Mapefast SA

01.12

## Størkningsakselererende tilsetningsstoff

### BRUKSOMRÅDE

**Mapefast SA** er et kloridfritt størkningsfremmende tilsetningsstoff basert på kalsiumnitrat, til bruk for å framskynde størkningen av betong og mørtel. **Mapefast SA** er anvendbar i all betong når en ønsker raskere avbinding. Noen spesielle bruksområder er:

#### Gulvbetong

**Mapefast SA** er ideell for gulvbetong. Resepturen er også viktig for gulvbetong, og Mapeis avdeling for betongindustri er hjelpelig med å sette opp en betongsammensetning som egner seg for dette.

**Mapefast SA** kan brukes for gulvbetong ved alle masseforhold.

#### Vinterstøping

**Mapefast SA** kan også brukes ved vinterstøp for å få i gang temperaturutviklingen på et tidlig tidspunkt og derigjennom hindre at betongen fryser før den når tilstrekkelig styrke. Bruk av **Mapefast SA** overflødiggjør dog ikke tiltak som høyere temperatur på betongen, en raskere sement eller tildekking/tilførsel av varme etc.

#### Elementproduksjon

Ved bruk i elementproduksjon vil en kunne oppnå tidlig avbinding som muliggjør raskere avforming og dobbelstøper.

### EGENSKAPER

Tilsetning av **Mapefast SA** vil gi gunstige effekter i betong:

- raskere avbinding
- kortere tid til glatting/pussing
- redusert avdamping
- aktivere en betong som er retardert pga. lengre transport/høy temperaturer
- lavere maksimaltemperatur på betongen
- tilnærmet uforandret
- tidlig-fasthet
- høyere slutfasthet

#### Produsent:

Mapei AS  
Vallsetvegen 6, 2120 Sagstua, Norway  
Tlf: +47 62 97 20 00 Fax: +47 62 97 20 99  
post@mapei.no  
www.mapei.com

### DOSERING

**Mapefast SA** tilsettes normalt i doseringsmengder fra 0,5 til 2,0% av sementvekten. Større doseringsmengder er mulig, men effekten blir ikke nødvendigvis større.

**Mapefast SA** tilsettes normalt direkte i automikser på byggeplass, etter en eventuell justering av konsistensen med SP-stoffer. Betong tilsatt Mapequick SA skal blandes i 1 minutt pr m<sup>3</sup>, dog minst 5 minutter.

Ved kortere transporter og raske leveringer er det mulig å tilsette **Mapefast SA** i blandemaskinen, men dette anbefales kun der en kan sikre stabil og rask levering. Etterdosering med SP-stoff på byggeplass bør i slike tilfeller unngås da dette vil redusere størkningsakseleratorens effekt.

### VÆR OPPMERKSOM PÅ

Ulike sementtyper reagerer ulikt i kombinasjon med **Mapefast SA**.

Størst effekt har **Mapefast SA** i betong som inneholder sementer med lavt alkaliinnhold og høyt innhold av C<sub>2</sub>S. Forsøk viser også at tilveksten i fasthet etter 28 døgn øker med slike sementtyper.

### EMBALLASJE

**Mapefast SA** leveres i 25 liters kanner, 200 liters fat, 1000 liters plastcontainere og i bulk. Produktet må oppbevares frostfritt, og er holdbart i minst ett år i lukket emballasje.

### VERNETILTAK

For helse-, miljø- og sikkerhetsinformasjon - se eget sikkerhetsdatablad. Sikkerhetsdatabladene finnes på [www.mapei.com](http://www.mapei.com).



CE

1274  
03  
1274 - CPD - 702  
EN-934-2:T 6



**MERK**

De tekniske anbefalinger og detaljer som fremkommer i denne produktbeskrivelse representerer vår nåværende kunnskap og erfaring om produktene. All ovenstående informasjon må likevel betraktes som retningsgivende og gjenstand for vurdering.

Enhver som benytter produktet må på forhånd forsikre seg om at produktet er egnet for tilsiktet anvendelse. Brukeren står selv ansvarlig dersom produktet blir benyttet til andre formål enn anbefalt, eller ved feilaktig utførelse.

Alle leveranser fra Mapei AS skjer i henhold til de til enhver tid gjeldende salgs- og leveringsbetingelser som anses akseptert ved bestilling.

**TEKNISKE SPESIFIKASJONER****Produktspesifikasjoner:**

Form:	Væske
Farge:	Fargeløs
Viskositet:	lettflytende; < 15mPa · S
Tørrestoffinnhold, %:	50,0 ± 2,5
Spesifikk vekt, g/cm <sup>3</sup> :	1,48 ± 0,03
pH – verdi:	5 ± 1
Kloridinnhold:	< 0,05
Alkalinnhold (Na <sub>2</sub> O – ekvivalent), %:	< 0,1

**Bruksegenskaper i betong:**

Standard sement, kg/m <sup>3</sup> (Norcem Standard):	350	350
Tilsetningsmengde (i % av sementvekt):	0	2,0
Masseforhold (v/c-tall):	0,51	0,51
Konsistens (synkmål i mm):	75	70
Luftporevolum (%):	2,5	2,3
Avbindingstidspunkt:	5 t 00 min	3 t 50 min
Trykkfasthet (N / mm <sup>2</sup> );		
etter 1 døgn	19	19
etter 7 døgn	36	38
etter 28 døgn	44	47

Demper RM:



# Demper RM

## Luftporedempende tilsetningsstoff

06.09

### BRUKSOMRÅDE

**Demper RM** er en hvit væske som demper dannelsen av uønskede luftporer i betong og mørtel. **Demper RM** reduserer aktivt dannelse av luftporer også på betongoverflatene. Produktet er basert på modifiserte polysiloxaner. **Demper RM** er et miljøvennlig produkt, fullstendig fri for løsemidler.

### EGENSKAPER

Betong inneholder alltid noe luft (1 til 3 %). Økt luftinnhold medfører generelt en reduksjon i trykkfastheten. En tommelfingerregel er at 1 % luft reduserer trykkfastheten med 5 %. Mengden av luftporer er spesielt avhengig av fillerfraksjonene i tilslaget. Det er derfor viktig å gjøre prøveblandinger for å finne egnet dosering ut fra det aktuelle tilslaget.

### DOSERING

Doseringer på 0,5 til 2 liter pr m<sup>3</sup> anses å være normalt for å redusere luftmengden og fjerne uønskede overflateporer.

### TILSETTINGSTIDSPUNKT

**Demper RM** kan tilsettes uavhengig av tidspunkt direkte i blandemaskin eller i automikser. God fordeling av stoffet oppnås etter minimum 30 sekunder i blandemaskin, avhengig av mengde tilsetning. I automiksere skal det blandes 1 min pr m<sup>3</sup>, minimum 5 minutter. Ved kontrollert reduksjon av luft, bør tilsetningstidspunktet være likt fra blanding til blanding.

### VÆR OPPMERKSOM PÅ

Variasjoner i de øvrige delmaterialene i betongen påvirker dannelsen av luftporer i betong. Transportlengde og transportstyr gir også variasjoner i luftmengde. Dersom blandetiden har vært for kort, vil en kunne oppleve at den totale målte luftmengde øker fra produksjon til levering, mens det i de fleste tilfeller registreres en reduksjon i luftmengde. Som regel betyr denne reduksjonen ikke

annet enn at større, uønskede luftbobler slipper ut. Betongprodusenten må derfor opparbeide egne erfaringstall med sine aktuelle delmaterialer.

Uønskede luftporer i betongoverflater kan også skyldes unødvendig høyt forbruk av formolje. Bruk av **Demper RM** vil ikke kunne fjerne porer som skyldes dråpeansamling av formolje.

### EMBALLASJE

**Demper RM** leveres i 25 liters kanne, 200 liters fat og i 1000 liters palletanker.

### HOLDBARHET

Produktet bør oppbevares frostfritt og vil i lukket emballasje beholde sine egenskaper i minst 6 måneder. Etter lengre tids lagring vil det være nødvendig med forsiktig omrøring av produktet for å sikre homogeniteten.

For helse-, miljø- og sikkerhetsinformasjon - se eget HMS-datablad. HMS-databladene finnes på [www.resconmapei.com](http://www.resconmapei.com).

### MERK

De tekniske anbefalinger og detaljer som fremkommer i denne produktbeskrivelse representerer vår nåværende kunnskap og erfaring om produktene. All ovenstående informasjon må likevel betraktes som retningsgivende og gjenstand for vurdering.

Enhver som benytter produktet må på forhånd forsikre seg om at produktet er egnet for tilsiktet anvendelse. Brukeren står selv ansvarlig dersom produktet blir benyttet til andre formål enn anbefalt eller ved feilaktig utførelse.

Alle leveranser fra Rescon Mapei AS skjer i henhold til de til enhver tid gjeldende salgs- og leveringsbetingelser som anses akseptert ved bestilling.

### TEKNISKE SPESIFIKASJONER

Produktspesifikasjoner:	
Form	Væske
Farge	Hvit
Viskositet	lettflytende, <20 mPa s ved 20°C
Spesifikk vekt g/cm <sup>3</sup>	1,00 ± 0,02
Tørrestoff, %	0,5 ± 0,2
pH-verdi	8,5 ± 1
Na <sub>2</sub> O-ekv, %	< 0,2

### VERNETILTAK



### Produsent:

Rescon Mapei AS  
Vallsetvegen 6, 2120 Sagstua, Norway  
Tlf: +47 62 97 20 00 Fax: +47 62 97 20 99  
post@resconmapei.no  
www.resconmapei.com



Dynamo sx-n:



# Dynamon SX-N

12.11

## Superplastiserende tilsetningsstoff

### PRODUKTBEKRIVELSE

**Dynamon SX-N** er et svært effektivt superplastiserende tilsetningsstoff basert på modifiserte akrylpolymerer.

Produktet tilhører Dynamonsystemet basert på den Mapeiutviklede DPP-teknologien (DPP = Designed Performance Polymers) der tilsetningsstoffenes egenskaper skreddersys til ulike betongformål.

Dynamonsystemet er utviklet på basis av Mapeis egen sammenstilling og produksjon av monomerer.

### BRUKSOMRÅDE

**Dynamon SX-N** er et tilnærmet allround-produkt som er anvendelig i all betong for å øke støpeligheten og/eller redusere tilsatt vannmengde.

Noen spesielle bruksområder er:

- Vann tett betong med krav til høy eller svært høy fasthet og med strenge krav til bestandighet i aggressive miljøer.
- Betong med særlige krav til høy støpelighet; i konsistensklasser S4 og S5 etter NS-EN 206-1.
- Selvkomprimerende betong med ønske om lengre åpentid. Om nødvendig kan SKB stabiliseres med en viskositetsøker - **Viscofluid** eller **Viscostar**.
- Til produksjon av frostbestandig betong – da i kombinasjon med luftinnførende tilsetningsstoffer - **Mapeair**. Valg av type luftinnførende stoff gjøres ut fra egenskapene til de andre delmaterialer som er tilgjengelige.
- Til golvstøp for å oppnå en smidig betong med bedret støpelighet. Store doseringer og lave temperaturer kan retardere betongen noe.

### EGENSKAPER

**Dynamon SX-N** er en vannløsning av aktive akrylpolymerer som effektivt dispergerer (løser opp) sementklaser.

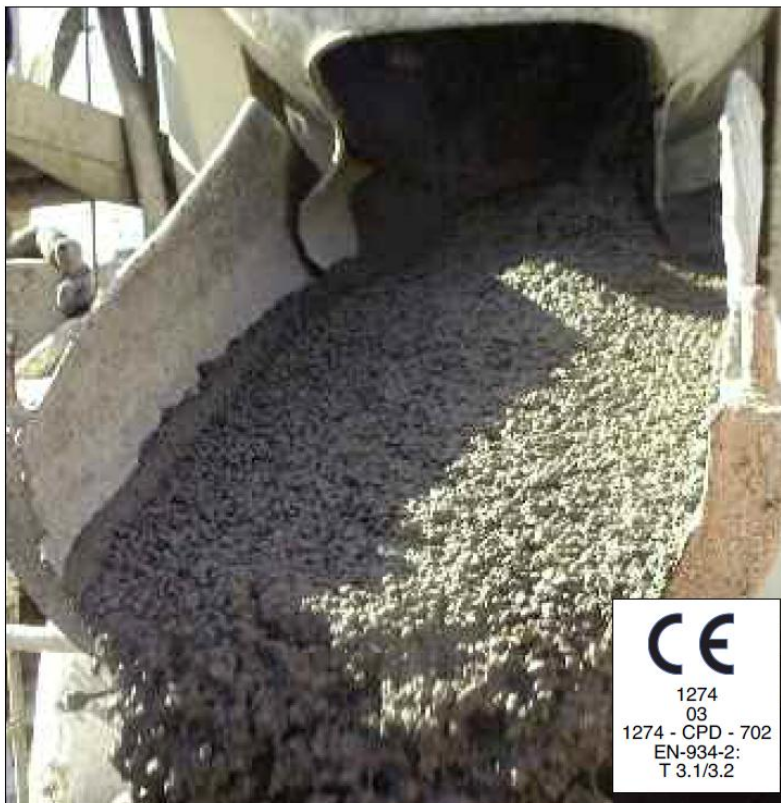
Denne effekten kan prinsipielt utnyttes på tre måter:

1. For å redusere mengden tilsatt vann, men samtidig beholde betongens støpelighet. Lavere v/c-forhold gir høyere fasthet, tetthet og bestandighet i betongen.
2. For å forbedre støpeligheten sammenlignet med betonger med samme v/c-forhold. Fastheten forblir dermed den samme, men muliggjør forenklet utstøping.

3. For å redusere både vann og sementmengde uten å forandre betongens mekaniske styrke. Gjennom denne metoden kan en blant annet redusere kostnadene (mindre sement), redusere betongens svinnpotensial (mindre vann) og redusere faren for temperaturgradienter på grunn av lavere hydrasjonsvarme. Spesielt er denne siste effekten viktig ved betonger med større sementmengder.

### VÆR OPPMERKSOM PÅ

**Dynamon SX-N** lar seg kombinere med andre Mapei tilsetningsstoffer, som f.eks størkningsakselererende stoffer som **Mapequick** og størkningsretard-erende stoffer som **Mapetard**. Produktet lar seg også kombinere med luftinnførende tilsetningsstoffer, **Mapeair**, for produksjon av frostbestandig betong.





Valg av type luftinnførende stoff gjøres ut fra egenskapene til de andre delmaterialer som er tilgjengelige.

#### EMBALLASJE

**Dynamon SX-N** leveres i 25 liters kanner, 200 liters fat, i 1000 liters containere og i bulk. Produktet må oppbevares ved temperaturer mellom +8°C og +35°C og bevarer sine egenskaper i minst ett år i lukket emballasje. Fargenyanser kan oppstå i produksjon av polymerene som inngår i **Dynamon SX-N**, men dette påvirker ikke produktets bruksegenskaper. Produktet bør røres forsiktig om før bruk for å sikre et homogent produkt. Produktet bør ikke utsettes for sollys.

#### DOSERING

**Dynamon SX-N** tilsettes for å oppnå ønsket resultat (styrke, bestandighet, støpelighet, sementreduksjon) ved å variere doseringen mellom 0,3 og 2,0% av sementmengden.

Ved økt dosering økes også betongens åpentid, dvs. tiden betongen lar seg bearbeide.

Større doseringsmengder og lave betongtemperaturer gir en retardert betong. Vi anbefaler alltid prøvestøper med aktuelle parametre.

Til forskjell fra konvensjonelle melamin- eller naftalenbaserte superplastiserende tilsetningsstoffer, utvikler **Dynamon SX-N** maksimal effekt uavhengig av tilsetnings-tidspunkt, men tilsetningstidspunktet kan påvirke nødvendig blandetid.

Dersom **Dynamon SX-N** tilsettes etter at minst 80% av blandevannet er inne vil blandetiden generelt være kortest. Det er likevel viktig med utprøvinger tilpasset eget blandeutstyr.

**Dynamon SX-N** kan også tilsettes direkte i automikser på bygg- eller anleggsplass. Betongen bør da blandes med maksimal hastighet på trommelen i ett minutt pr. m<sup>3</sup> betong i lasset, men minimum 5 minutter.

#### VERNETILTAK

For helse-, miljø- og sikkerhetsinformasjon, se eget sikkerhetsdatablad. Sikkerhetsdatabladene finnes på [www.mapei.com](http://www.mapei.com)

#### MERK

*De tekniske anbefalinger og detaljer som fremkommer i denne produktbeskrivelse representerer vår nåværende kunnskap og erfaring om produktene.*

*All ovenstående informasjon må likevel betraktes som retningsgivende og gjenstand for vurdering.*

*Enhver som benytter produktet må på forhånd forsikre seg om at produktet er egnet for tilsiktet anvendelse*

*Brukeren står selv ansvarlig dersom produktet blir benyttet til andre formål enn anbefalt eller ved feilaktig utførelse.*

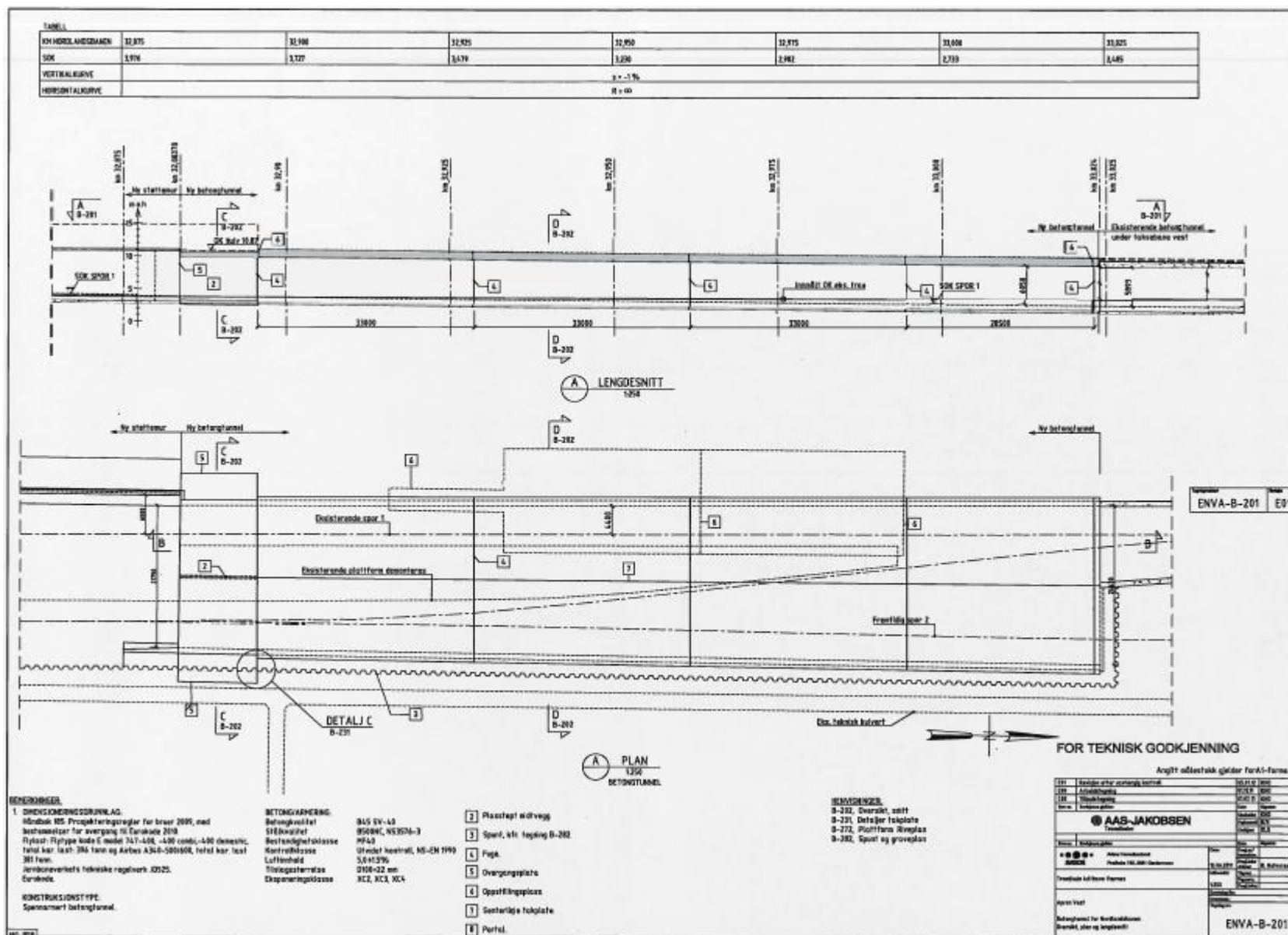
*Alle leveranser fra Mapei AS skjer i henhold til de til enhver tid gjeldende salgs- og leveringsbetingelser, som anses akseptert ved bestilling.*

TEKNISKE SPESIFIKASJONER		
Form:	Væske	
Farge:	Gulbrun	
Viskositet:	Lettflytende; <30 mPa · S	
Tørrestoffinnhold, %:	18,5 ± 1,0	
Spesifikk vekt, g/cm <sup>3</sup> :	1,06 ± 0,02	
pH-verdi:	6,5 ± 1	
Kloridinnhold, %:	< 0,05	
Alkaliinnhold (Na <sub>2</sub> O-ekvivalenter) %:	< 2,0	
BRUKSEGENSKAPER I BETONG		
<i>Som vannreducerende stoff (lik konsistens) T 3.1</i>		
Sementmengde kg/m <sup>3</sup> (Norcem standard)	350	350
Tilsetningsmengde (i % av sementvekt)	0	1,0
Masseforhold (v/c-tall)	0,51	0,41
Vannreduksjon (%)	-	20
Trykkfasthet (i N/mm <sup>2</sup> ):		
1 døgn	26	41
7 døgn	42	60
28 døgn	52	68
<i>Som SP-stoff (slumpforbedrer) T 3.2</i>		
Sementmengde, kg/m <sup>3</sup> (Norcem standard sement):	350	350
Tilsetningsmengde (i % av sementvekt):	0	1,0
Masseforhold (v/c-tall):	0,48	0,48
Luftinnhold:	2,1	1,8
Konsistens, mm:		
- synkmål, 5 min	30	220
- synkmål, 30 min	20	200
- synkutbredelse, 5 min		420
- synkutbredelse, 30 min		380



## Vedlegg D – Plantegninger Værnes





Effekten av lavvarmebetong på fasthetsutviklingen og rissrisiko i anleggskonstruksjoner utsatt for fastholding