

Bruk av lavvarmebetong for å redusere rissrisiko i grove betongkonstruksjoner

Gøran Hågensen

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2013

Hovedveileder: Sverre Smeplass, KT

Medveileder: Øyvind Bjøntegaard, Statens vegvesen

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for konstruksjonsteknikk



MASTEROPPGAVE 2013

for stud. techn.

Gøran Haagensen

Bruk av lavvarmebetong for å redusere rissrisiko i grove betongkonstruksjoner

Low heat concrete in massive concrete structures

Innledning

Ved støp av grove betongkonstruksjoner kan fastholdingeffekter i støpeskjøtene gi fare for opprissing, og dermed redusert funksjonalitet og bestandighet. Opprissingstendensen kan reduseres ved å redusere temperaturforskjellen over kaldskjøtene, og bruk av lavvarmebetong har vist seg å være et spesielt effektivt tiltak. Bruken av lavvarmebetong fikk et gjennombrudd i Bjørvikprosjektet. Erfaringene fra dette prosjektet har i ettertid blitt overført til en rekke andre prosjekter og konstruksjoner.

I lavvarmebetong oppnås redusert varmeutvikling ved å erstatte sement med flyveaske. Flyveasken gir imidlertid også mer langsom egenskapsutvikling. Dette fører blant annet til at lavvarmebetong har noe lavere strekkfasthet enn tilsvarende tradisjonell konstruksjonsbetong i tidlig alder. Dette kan til en viss grad redusere den positive effekten av reduserte temperaturforskjeller. Det kan derfor tenkes at det for hvert enkelt fastholdingstilfelle finnes en optimal flyveaskedosering, der både økt og redusert dosering vil gi økt rissrisiko.

Oppgave

Oppgaven går ut på å bruke FEM-programmet CrackTeSt COIN til analysere effekten av flyveaskedosering i lavvarmebetong mht. rissrisiko i typiske kaldskjøter. Analysen skal omfatte flere betongtyper og et utvalg geometrier. Det hører med til oppgaven å

evaluere kvalitet og anvendelighet av de materialdataene som brukes i analysene, og diskutere konsekvensen av avvik fra reell materialoppførsel. Om mulig skal det ut fra analyseresultatene angis hva som kan oppfattes som optimal flyveaskedosering i generaliserte tilfeller.

Videre skal det undersøkes hvordan bruk av varmekabler kan supplere bruk av lavvarmebetong for å redusere temperaturforskjeller i kaldskjøter, og spesielt hvor stort omfang oppvarmingen må ha for at tiltaket skal være tilstrekkelig effektivt. Analysene skal koordineres med pågående parallelle aktiviteter i COIN.

Gjennomføring

Oppgaven utføres delvis på instituttet, i samarbeid med COIN-programmet, Skanska Norge AS, og Statens Vegvesen. Gjennomføringen av oppgaven skal tilpasses de ressurser som stilles til disposisjon.

Oppgaven er utlevert 14. januar 2013, og skal innleveres til Institutt for konstruksjonsteknikk innen 10. juni 2013.

2013-01-14

Sverre Smeplass

Prof. II

(faglærer)

Forord

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

Oppgaven er tilknyttet Concrete Innovation Centre (COIN), Skanska Norge AS og Stantens Vegvesen.

Jeg vil rette en stor takk til min faglærer Sverre Smeplass for støtte, oppmuntring og assistanse i forbindelse med oppgaven. Takk også til medveiledere Terje Kanstad og Øyvind Bjøntegaard for faglige innspill.

Til slutt vil jeg også takke Gunrid Kjellmark og Anja Klausen for å ha tålmodigheten til å besvare alle spørsmål jeg skulle ha.

Trondheim, 22. juni 2013

Gøran Hågensen

Sammendrag

Bruk av såkalt lavvarmebetong er med på å redusere varmeutviklingen i betongkonstruksjoner, noe som bidrar til å redusere rissrisikoen som følge av ytre fastholding. I denne oppgaven er det undersøkt hvilken effekt flyveaskeinnholdet i lavvarmebetong har på opprissingsfaren til herdende betongkonstruksjoner av ulik geometri. Til dette ble analyseprogrammet CrackTest COIN benyttet.

For å kunne isolere effekten av flyveaske så ble betongserien COIN P3-1 benyttet. Dette er en betongserie utviklet for dette formålet. Flyveaskeinnholdet i de tre betongene som ble undersøkt er på 20 %, 30 % og 40 % av bindemiddelet.

Resultatene viser at den høyeste flyveaskedoseringen gir gunstigst rissindeks for alle de undersøkte geometriene. I følge analysene gir bruk av den laveste flyveaskemengden en veldig mye høyere risiko, men en evaluering av kvaliteten på materialdata indikerer at strekkfasten som er oppgitt for denne betongen er for lav.

Det ble også undersøkt hvorvidt bruken av varmekabler i den tilstøtende konstruksjonen kan bidra til å redusere rissrisikoen. Omfanget av oppvarmingen ble undersøkt og sammenlignet med tilgjengelige resultater fra lignende 3D-analyser.

Resultatene viser at oppvarming av tilstøtende konstruksjon er et effektivt tiltak som kan benyttes både på egenhånd, men også til å supplere bruken av lavvarmebetong.

Abstract

The use of low heat concrete(LHC) helps reduce the heat development in concrete structures, something that lowers the risk of cracking due to external restraints. This thesis will investigate the effect the fly ash content of the LHC has on the risk of cracking. The FEM program CrackTest COIN was used for the simulations.

A concrete series called COIN P3-1 was used in order to isolate the effect of the fly ash. This concrete series is developed for exactly this purpose. Three concretes were tested. The fly ash content varied from 20 % to 40 % of the binder.

The results show that the concrete with the highest fly ash dosage reached the most favourable crack index for all geometries. The analysis showed that the concrete with 20 % fly ash had the highest risk of cracking, but an evaluation of the material data indicates that the tensile strength specified for this concrete is too low.

The effect of heating wires in the adjoining structural element were also looked into. The extent of heating were investigated and compared to a similar 3D-analysis that was available

The results show that heating wires is an effective measure for lowering the risk of cracking. It can be used on its own or as a supplement to LHC,

Innholdsfortegnelse

Forord.....	i
Sammendrag	iii
Abstract	v
Figurliste	ix
Tabeller.....	xi
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Hensikt med oppgaven.....	1
2 Teori.....	3
2.1 Formål.....	3
2.2 Herdeteknologi.....	4
2.2.1 Generelt.....	4
2.2.2 Varmeutvikling og termisk utvidelse av betong.....	5
2.2.3 Hastighetsfunksjon og aktiveringsenergi	6
2.2.4 Modenhet.....	7
2.2.5 Styrke- og varmeutvikling.....	7
2.2.6 Svensk modell for betongens varmeutvikling	8
2.2.7 Autogen deformasjon.....	8
2.3 Materialmodeller.....	10
2.4 Fastholding	11
2.5 Rissrisiko	12
2.6 Flyveaske	13
2.7 Flyveaskeinnhold i sement	14
2.8 CrackTest COIN.....	15
3 Materialdata	16
3.1 Formål.....	16
3.2 Materialdata	17
3.2.1 Betongtype	17
3.3.1 Herdekasseforsøk	17
3.3.2 Inndata for spenningsberegning i CrackTest COIN.....	19
4 Flyveaskedoseringens innvirkning på rissrisiko.....	22
4.1 Formål.....	22
4.2 Geometri og randbetingelser	23

4.3 Resultater fra simuleringene	25
4.4 Evaluering av materialdata.....	29
4.4.1 Generelt.....	29
4.4.2 Strekkfasthet	29
4.4.3 Emodul.....	31
4.4.4 Varmeutvikling	32
4.4.5 Andre parametere	33
4.4.6 Innvirkning på resultatene	34
4.5 Sammenligning med andre betongtyper.....	35
5 Bruk av varmekabler for å redusere rissrisiko	38
5.1 Formål.....	38
5.2 Geometri og grensebetingelser.....	39
5.3 Simulering i CrackTest COIN	41
5.4 Sammenligning med resultater fra DIANA	48
5.5 Kominasjon av flyveaske og varmekabler	50
6 Konklusjon	52
7 Videre arbeid	53
Referanser	54
Vedlegg A – Resepter	55
Vedlegg B – Herdekasseark	61
Vedlegg C – Tilsendt Materialdata	65

Figurliste

Figur 1 Betongens livsløp [2]	4
Figur 2 Eksempel på rissmønster i to vegger grunnet fastholding fra bunnplaten [3]	11
Figur 3 Parametere som påvirkere betongspenning [2]	12
Figur 4 Herdekasse [11].....	18
Figur 5 Geometri.....	23
Figur 6 FEM-nett.....	24
Figur 7 Temperaturfordeling i tverrsnittet etter 35 timer	25
Figur 8 temperatur i vegg for de fire utvalgte punktene	26
Figur 9 Rissindeks for de fire utvalgte punktene.....	26
Figur 10 Rissindeks plottet mot veggtykkelse	27
Figur 11 Makstemperatur i vegg plottet mot veggtykkelse	27
Figur 12 Rissindeks mot flyveaskemengde for de ulike veggtykkelsene, d	28
Figur 13 Strekkfasthet	29
Figur 14 Ulike strekkfasthetsforløp	30
Figur 15 E-modul for P3.1-serien.....	31
Figur 16 Ulike E-modul-forløp	32
Figur 17 Varme plottet mot FA-innhold	33
Figur 18 Sammenligning av ulike betongtyper	36
Figur 19 Vegg støpt på bunnplate med varmekabler.....	40
Figur 20 Temperaturfroløpet mitt i veggen	41
Figur 21 Rissindeks for de to ule betingelsene. Veggykkelse på 0.8 m og platetykkelse på 1.2 m	42
Figur 22 Endring i temperaturdifferanse mot utbredelse av varmekabler	42
Figur 23 Rissindeks mot utbredelse av varmekabler.....	43
Figur 24 Endring i temperaturdifferanse mot utbredelse av varmekabler	44
Figur 25 Rissindeks mot utbredelse av varmekabler.....	44
Figur 28 Endring i temperaturdifferanse mot utbredelse av varmekabler	46
Figur 29 Endring i rissindeks mot utbredelse av varmekabler	46
Figur 30 Geometri i Diana.....	48
Figur 31 Resultater fra Diana.....	48
Figur 32 Rissindeks for standard betong og sem-ilavvarmebetong	50
Figur 33 Rissindeks mot ubredelse av varmekabler	51

Tabeller

Tabell 1 Blandingskjema	18
Tabell 2 Resultater fra herdekasseforsøk.....	19
Tabell 3 diverse materialdata	20
Tabell 4 Autogen deformasjon	20
Tabell 5 Diskret data for varmeutvikling	21
Tabell 6 dimesjoner for konstruksjonen.....	23
Tabell 7 Rissindeks.....	26
Tabell 8 Materialdata, "CrackTest"-serien	35
Tabell 9 Dimensjoner.....	39

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

På slutten av 1970-tallet introduserte danskene Freisleben-Hansen og Pedersen begrepet “herdeteknologi”. De utviklet modeller som beskrev sammenhengen mellom varme og hydratiseringsgraden, og egenskapsutviklingen til betong som en funksjon av tid og temperatur [1].

Betong som herder utvikler mye varme. Dette kan føre til så store temperaturdifferanser mot tilstøtende konstruksjoner at det blir fare for opprissing av betongen. Ved å benytte seg av lavvarmebetong – betong der deler av sementen er erstattet med flyveaske – så kan man bidra til å senke temperaturen til den herdende betongen.

Med bakgrunn i modellene utviklet av Freisleben-Hansen og Pedersen er det blitt utviklet beregningsverktøy som kan estimere temperatur- og spenningsutviklingen i betongkonstruksjoner. Dette gjør at vi i dag ved hjelp av dataprogrammer kan estimere risikoen for opprissing av betong. Det finnes en rekke ulike programmer som kan brukes til dette formålet. Med bakgrunn i dette er det mulig å kjøre analyser av planlagte betongkonstruksjoner for å se hvorvidt tiltak for å motvirke opprissing skal iverksettes.

1.2 Hensikt med oppgaven

Ved simulering av rissrisikoen i programmet CrackTest COIN så har det seg ikke alltid slik at økt flyveaskeinnhold i betongen gir redusert fare for opprissing. At så er tilfelle kan stemme ettersom det å erstatte deler av sementen med flyveaske vil føre til en langsommere egenskapsutvikling. Dette kan være med på å redusere den positive effekten flyveaske har på temperaturen i betongen. Et problem med disse analysene er derimot at betongene som er tilgjengelig i programmet er av forskjellige karakterer. Det er ikke kun flyveaskeinnholdet som varierer, noe som kan ha innvirkning på resultatene.

Målsetningen med denne oppgaven er å isolere effekten flyveaskeinnhold har på rissrisikoen i betongkonstruksjoner utsatt for fastholding mot tilstøtende konstruksjoner. Analysene skal utføres i CrackTest COIN. Inndata for varmeutvikling ble undersøkt ved hjelp av herdekasseforsøk i laboratorium. Resten av materialdataen som er benyttet som grunnlag for analysene er tilsendt fra COIN.

I tillegg til dette ble bruken av varmekabler som tiltak for å redusere opprissingsfaren undersøkt. Omfanget av oppvarmingen ble undersøkt både isolert sett og i kombinasjon med lavvarmebetong.

2 Teori

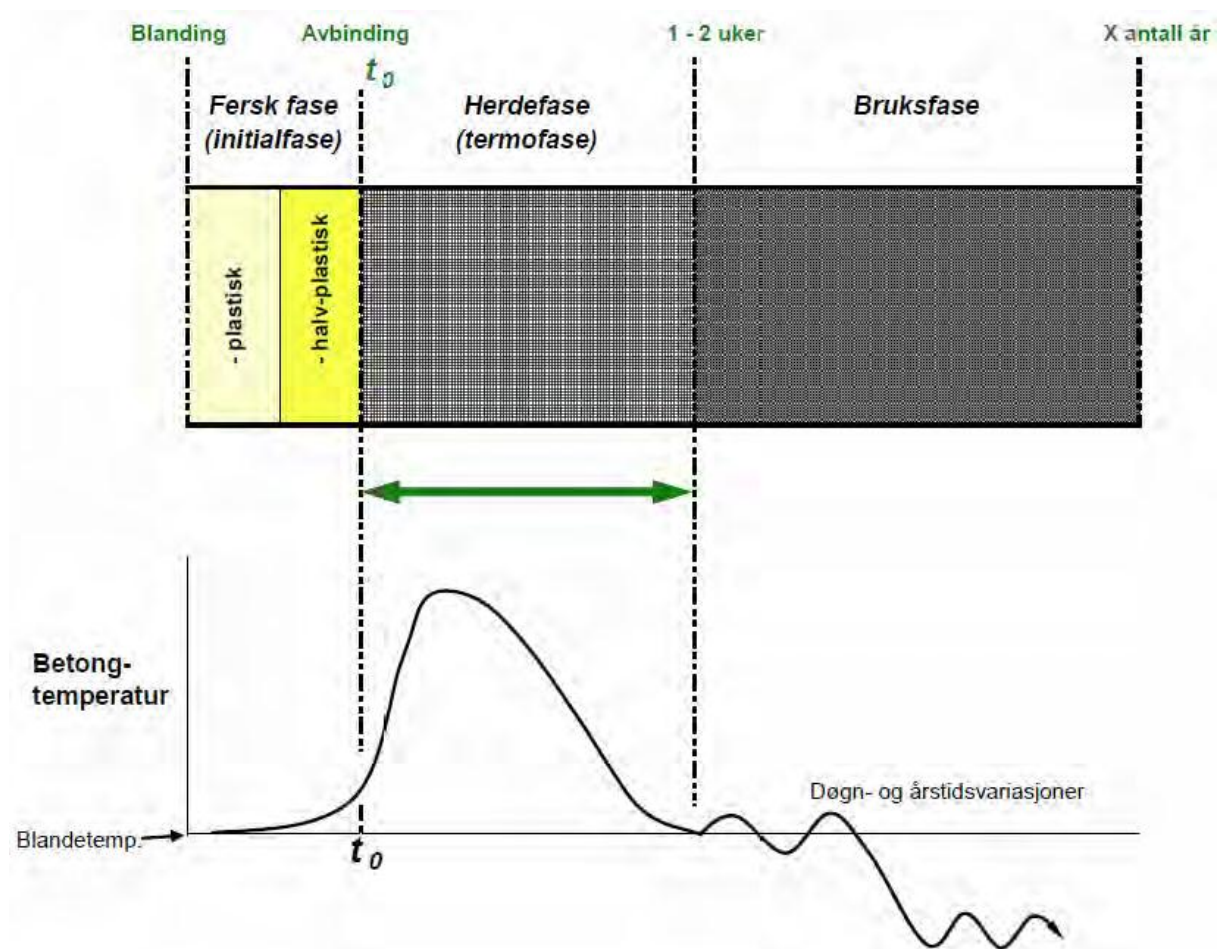
2.1 Formål

Formålet med dette kapitlet er presentere teori som kan være nyttig for leseren ved lesing av oppgaven. Teori som oppgaven bygger på er lagt fram så kort og enkelt som mulig,

2.2 Herdeteknologi

2.2.1 Generelt

Herdefasen er fasen mellom fersk- og bruksfase, her endres betongen karakter fra plastisk til stiv. Dette blir satt i gang av reaksjonsprosessen mellom sement og vann som kalles hydratisering. Dette er en eksoterm reaksjon som genererer betydelige mengder med varme. Betongens mekaniske egenskaper utvikles hovedsaklig i herdefasen. Hydratiseringsraten er veldig temperatursensitiv. Høye temperaturer fører til rask hydratisering som igjen fører til rask styrkeutvikling. Lave temperaturer resulterer i en tregere hydratisering og herdingen går tregere[1]. Figur 1 viser utviklingen til betong, fra fersk fase og til bruksfasen.



Figur 1 Betongens livsløp [2]

2.2.2 Varmeutvikling og termisk utvidelse av betong

Som nevnt er den kjemiske reaksjonen mellom varnn og sement en eksoterm prosess. Det er ulik sammensetning av klinker i forskjellige typer sement. Dette gir forskjellig varmetuvikling i ulike sementtyper, men en typisk portlandsement har en varmeutviling på 400-500 kJ/kg ved full hydratisering[1]. Under adiabatisk forhold - det vil si ingen varmeutveksling med omgivelsene, så vil all varmeutviklingen føre til temperaturstigning i betongen. I praksis vil man alltid ha en viss varmeutveksling med omgivelsen. Ligningen under viser varmeutviklingen i betong som følge av temperaturstigning ved adiabatisk forhold.

$$\Delta\theta = \frac{Q_{\infty} \cdot C}{\rho_c \cdot c_b}$$

der:

$\Delta\theta$ = temperaturstigning i betongen

Q_{∞} = utviklet varme per kilo sement [kJ/kg sement]

C = sementmengde, [kg]

ρ_c = betongens densitet, [kg/m³]

c_b = betongens spesifikke varmekapasitet, [kJ/m³ · C°]

Temperaturøkning fører til utvidelse av materiale. Ligning gitt under viser sammenheng mellom temperaturøkning ($\Delta\theta$) og lengdetøyning (ϵ_t).

$$\epsilon_t = \alpha_t \cdot \Delta\theta$$

der:

α_t = termisk utvidelseskoeffisient

2.2.3 Hastighetsfunksjon og aktiveringsenergi

Reaksjonshastigheten er som nevnt avhengig av temperaturen. Hydratiseringshastigheten er dobbel så høy ved 40°C som ved 20 °C [1]. Hastighetsfunksjonen sier noe om reaksjonshastigheten gitt ved en viss temperatur i forhold til en referansetemperatur på 20 °C.

Hastighetsfunksjonen er videreutviklet fra Arrhenius-ligningen. Den beskriver forholdet mellom temperaturen og den kjemiske aktiviteten i reaksjonen. $H(\Theta)$ gir hydratiseringshastigheten ved en gitt temperatur Θ , i forhold til en referansetemperatur på 20°C [1].

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

Der:

$E(\Theta)$ = aktiveringsenergien, [J/mol]

R = gasskonstanten, 8,314 [J/mol · °C]

Aktiveringsenergien er gitt ved:

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

$$E = A \quad \theta > 20^\circ\text{C}$$

Konstantene A og B varierer med sementtype, pozzolaninnhold og v/b-ratio, men har typiske verdier mellom 20 og 40 kJ/mol for A og 1,0 til 1,5 kJ/mol for B [1].

2.2.4 Modenhets

Modenhets sier noe om hvor lenge en betong må herde for å oppnå tilsvarende hydratiseringsgrad som den ville hatt om den herdet ved en referansetemperatur på 20°C. Modenhets etter en viss tid t , kan finnes ved å integrere hastighetsfunksjonen $H(\Theta)$ fra t_0 til t . [1]

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

Det er ikke alltid man kjenner til hastighetsfunksjonen. Da kan man finne modenhets ved å loggføre temperaturutviklingen til betongen ved n antall tidsintervall med lengde Δt_i . Noe som er lett å gjøre i praksis. For hvert intervall beregnes det en gjennomsnittstemperatur Θ_i og en tilsvarende hastighetsfunksjon $H(\Theta_i)$. Modenhets kan da beregnes ved summeformelen:

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

Modenhets er et nyttig prinsipp. Om man vet fasthetsutviklingene til betongen, så kan man bruke modenhetsprinsippet til å sammenligne betonger herdet ved forskjellige temperaturer. Man kan for eksempel bruke det til å forutsi når en betong har oppnått ønskelig trykkfasthet.

2.2.5 Styrke- og varmeutvikling

Ettersom styrkeutviklingen er avhengig av modenhets, så kan man bruke følgende empiriske ligning til å beskrive den [1].

$$f_c(M) = f_{c\infty} \cdot e^{\left(-\left(\frac{\tau_e}{M}\right)^\alpha\right)}$$

Der:

M = modenhets [t]

$f_{c\infty}$ = total trykkfasthet [MPa]

τ_e = retardasjonsparameter [t]

α = kurveparameter

Varmeutviklingen kan beskrives med en samme type ligning:

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

Der:

Q_∞ = Varmeutvikling etter “uendelig” lang tid [J/kg]

τ_e = retardasjonsparameter [t]

α = kurveparameter

2.2.6 Svensk modell for betongens varmeutvikling

Simuleringsprogrammet som brukes i denne oppgaven er CrackTest COIN. Programmet benytter seg av en litt annen funksjon for å beskrive varmeutviklingen.

$$Q(t_e) = W_\infty \cdot e^{(-\lambda_1 \cdot \ln(1 + \frac{t_e}{t_1})^{-\kappa_1}}$$

Der:

$Q(t_e)$ = Varmeutvikling som funksjon av modenhet [J/kg]

W_∞ = Varmeutvikling etter “uendelig” lang tid [J/kg]

t_e = Modenhet [t]

κ_1, λ_1, t_1 = kurveparametre

2.2.7 Autogen deformasjon

Når sement reagerer med vann så reduseres volumet av betongen. Grunnen til dette er at reaksjonsproduktene har lavere volum enn reaktantene (vann og sement). Denne effekten kalles kjemisk svinn og starter når vannet kommer i kontakt med sement, og pågår så lenge sementen reagerer. Kjemisk svinn utgjør omtrent 0.06 cm^3 per gram sement som reagerer. Ved full hydratisering utgjør dette en endring i volum på rundt 8% [3].

Reduksjonen i volum som følge av kjemisk svinn leder til selvuttørkning. Som følge av selvuttørkningen skapes det kapillærkrefter og undertrykk i porevannet. Dette trykket overføres til faststoffet og det skapes en sammetrekning av betongen. Dette kalles autogen deformasjon.

2.3 Materialmodeller

Funksjonen for varmeutvikling kan brukes til å uttrykke egenskapsfunksjoner for trykkfasthet, strekkfasthet og E-modul. I følge Kanstad et al [4] uttrykker de følgende ligningene egenskapsfunksjonene:

Trykkfasthet:

$$f_c(M) = f_{c28} \cdot e^{\left(s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{\frac{M}{24} - \frac{t_0}{24}}} \right) \right)}$$

Strekkfasthet:

$$f_t(M) = f_{t28} \cdot e^{\left(s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{\frac{M}{24} - \frac{t_0}{24}}} \right) \right)^{n_t}}$$

E-modul:

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

Der:

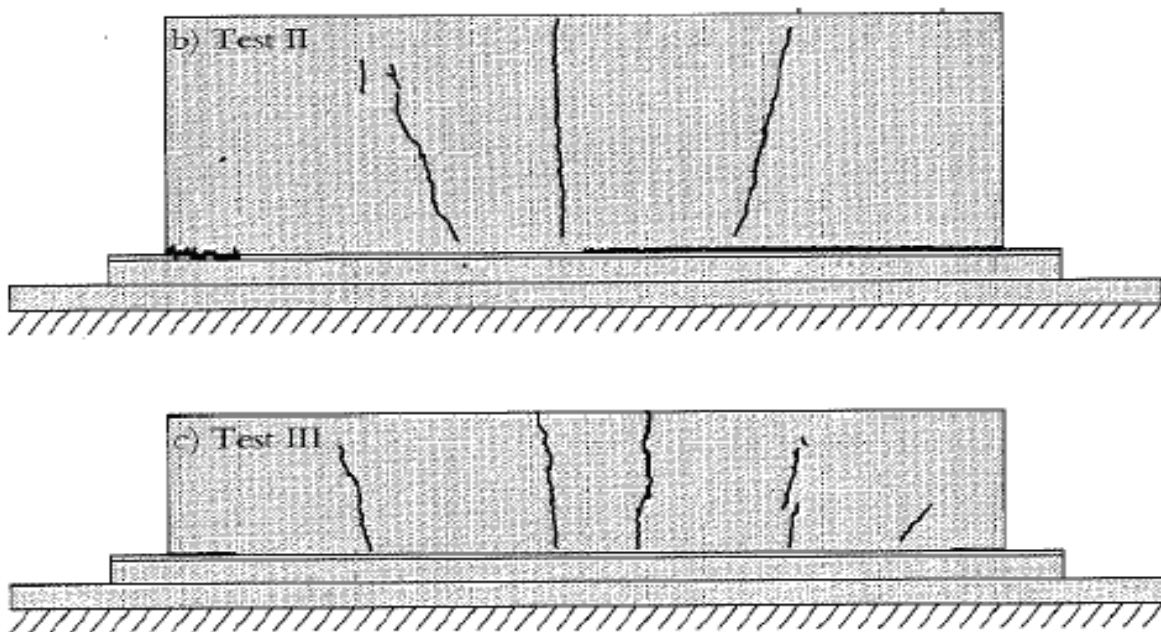
s og n = kurvetilpassingsparameter

X_{28} = egenskapens verdi etter 28 døgn.

2.4 Fastholding

Indre fastholding oppstår når det er store temperaturvariasjoner over et tverrsnitt. Overflaten som er i kontakt med omgivelsen vil kjøles ned raskere enn kjernen av betongen. Den indre delen av betongen er fastholdt mot å eksapandere fritt. Dette fører til trykkspenninger i betongkjernen. For å kompensere for dette oppstår det strekkspenninger i betongoverflaten. Overstiger disse spenningene strekkfastheten oppstår det overflateriss i betongen. Når betongen kjøles ned igjen reduseres strekkspenningene og rissene lukkes. [5]. Selv om rissene har en tendens til å lukke seg så kan de likevel være skadelig. De kan opptre som svake punkter ved senere volumendringer av betongen. For å unngå overflate riss grunnet temperaturforskjeller over tverrsnittet, så anbefales det at temperaturdifferansene i tverrsnittet ikke overstiger 20°C [1].

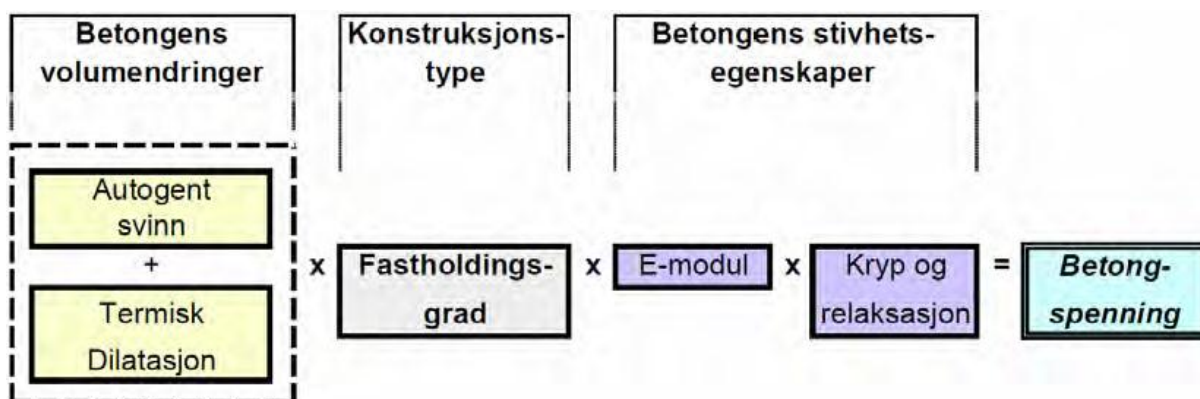
Ytre fastholding skyldes fastholdning fra tilstøtende konstruksjoner [1]. Et typiske eksempel er når det støpes en vegg på et gammelt betongdekke. Det modne betongdekket vil ha høyere E-modul og høyere stivhet enn den herdende veggen. Når den ferske betongen herdes utvikles det varme og veggen utvider seg. Når betongen så avkjøles så vil konstruksjonen trekke seg sammen. Etersom veggen har festet seg i fundamentet så får ikke veggen trekke seg sammen uhindret og vi får strekkspenninger i veggen. Dersom strekkspenningen overskrider betongens strekkfasthet så vil det oppstå gjennomgående riss som er uønsket, se figur 2.



Figur 2 Eksempel på rissmønster i to vegger grunnet fastholding fra bunnplaten [3]

2.5 Rissrisiko

Opprissing grunnet ytre fastholdning inntreffer - som tidligere nevnt – dersom strekkspenningen i betongen overskrider strekkfastheten. Det er flere parametre som har en innvirkning på spenningsoppbyggingen i betongen. Se figur 3.



Figur 3 Parametere som påvirker betongspenning [2]

Betongens volumendringer: Hoveddrivkraften bak volumendringene i betongen er termisk dillatasjon, men også autogent svinn bidrar, spesielt for betong med lavt v/c-tall [3].

Konstruksjonstype: Konstruksjonstypen angir hvilken fastholdningsgraden. Dette er viktig for speningsoppbyggingen. Fastholdningsgraden angir i hvilken grad deformasjoner hindres [2]

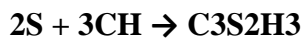
Betongens stivhetsegenskaper: Betongens stivhetsegenskaper bestemmer hvor mye spenning som genereres for en gitt fastholdt deformasjon [3]. Høy E-modul gir høy stivhet, noe som er ugunstig med tanke på opprissing. Kryp/relaksasjon er med på redusere spenninger over tid. Lav E-modul og høy relaksasjon er dermed gunstig om man vil unngå for høye strekkspenninger i betongen.

Rissindeksen er det løpende forhold over tid mellom den genererte spenningen i betongen, og den utviklede strekkfastheten [3]. Overstiger rissindekse 1.0 så indikerer dette at opprissing vil inntreffe.

$$Rissindeks(t) = \frac{Betongspenning(t)}{Strekkfasthet(t)}$$

2.6 Flyveaske

Pozzolaner er aktive tilsetninger som reagerer med hydratiseringsproduktet kalsiumhydroksid fra sementhydratiseringen. Denne reaksjonen kalles pozzolanreaksjonen. Etersom pozzolanreaksjonen er avhengig av tilgjengelig kalsiumhydroksid fra hydratisering av sement, så vil fasthetsutviklingen i betong med flyveaske ligge etter betonger uten flyveaske. Dette være en ulempe dersom det er strenge krav til tidligfastheten i betongen. Men på grunn av den tregere pozzolanreaksjonen vil også varmeutviklingen skje tregere, noe som er fordelaktig dersom man vil oppnå lavere temperaturer i betongkonstruksjonen. Lavvarmebetong benytter derfor flyveaske til å erstatte deler av sementen. Pozzolanreaksjonen er gitt under[6]:



Silika + kalsiumhydroksid → kalsiumsilikathydrat

Flyveaske er – sammen med silikastøv – det vanligste pozzolanet i Norge [7]. Flyveaske er et biprodukt fra kullkraftverk og har vært tilgjengelig siden tidlig på 1930-tallet. Det har en glassaktig struktur, og en finhet omtrent lik sement [8].

I tillegg til å redusere temperaturen er det andre fordeler ved å benytte seg av flyveaske. Tidligere ble flyveasken sluppet direkte ut i atmosfæren. I dag lagres den i deponier eller på kraftverkene [8j]. Ved å ta det i bruk i betongen så hindrer man at det blir sluppet ut i naturen som følge av plassmangel. Produksjon av sement bidrar til store utslipp av karbondioksid[7]. Ved å erstatte deler av sementen med flyveaske vil man redusere sementbehovet, noe som bidrar til å redusere karbondioksid-utslippene. Bruk av flyveaske bidrar også vanligvis til en økning i bearbeideligheten til betong [7]

2.7 Flyveaskeinnhold i sement

I Norge brukes det to ulike formler for å angi flyveaskeinnholdet i sement. Statens Vegvesen definerer andel flyveaske på denne måten:

$$\text{Andel flyveaske} = \frac{\text{Masse flyveaske}}{\text{Masse semenet}} \cdot 100\%$$

Litteraturen benytter seg vanligvis av denne definisjonen:

$$\text{Andel flyveaske} = \frac{\text{Masse flyveaske}}{\text{Masse sement} + \text{masse flyveaske}} \cdot 100\%$$

Hvor stort flyveaskeinnholdet blir definert til vil som følge av de to ulike definisjonene variere ettersom virken formel man benytter seg av. Bruker man definisjonen til Statens Vegvesen vil flyveaskeinnholdet i Norcem Anleggssement FA være 25%, men dersom man benytter seg av formelen fra litteraturen vil flyveaskeinnholdet være definert til 20%. I denne oppgaven er den nederste definisjonen benyttet

2.8 CrackTest COIN

Programmet som benyttes til analysene i denne oppgaven er dataprogrammet CrackTest COIN. CrackTest COIN er et beregningsprogram for temperatur- og spenningssimulasjoner. Det er en norskmodifisert utgave av det svenske programmet ConTeSt Pro. Programmet er utviklet Jejems Concrete i Sverige. Initiativet til utviklingen kom i forbindelse med et COIN-prosjekt i 2011 [9]. Programmet er elementmetodebasert.

CrackTest COIN er et såkaldt “2 ½D”-program. Det vil si at selv om temperaturberegningene blir gjort i to dimensjoner, så kan brukeren angi grad av rotasjon- og tøyingsfrihet for konstruksjonen [9.]

3 Materialdata

3.1 Formål

Formålet med dette kapitlet er å presentere materialdata for de betongene ble brukt i analysene.

3.2 Materialdata

3.2.1 Betongtype

Betongene som ble valgt ut til analysene tilhører alle COIN P3.1-serien. Dette er en betongserie som har blitt utviklet innen COIN. Formålet med denne betongserien er å undersøke hvordan det å erstatte sement med flyveaske vil påvirke de mekaniske egenskapene til betong[10]. Tilsetningsstoffer, sementtype, forhold mellom vann og bindemiddel og hvilket tislag som brukes kan alle være med å påvirke egenskapene til betong. Derfor er sement- og flyveaskeinnholdet det eneste som varierer. Flyveaskeinnholdet i betongene som blir analysert er henholdsvis 20%, 30% og 40%.

3.3.1 Herdekasseforsøk

Bortsett fra varmeutvikling så er all materialdata som som ble tatt i bruk i oppgaven undersøkt og beregnet av COIN. Etter ønske fra COIN ble det i forbindelse med denne masteroppgaven gjort nye undersøkelser av varmeutvikling i laboratoriet. Herdekasseforsøk ble dermed gjennomført for alle de utvalgte betongtypene.

En herdekasse er et semi-adiabatisk kalorimeter. Herdekassen er en godt isolert boks med plass til betongprøver på mellom 5 og 15 liter. I semi-adiabatiske kalorimetre antar man at varmestrømmingen ut av kalorimeteret er proporsjonal med med temperaturforskjellen mellom prøven og omgivelsene.

Varmeutviklingen blir målt og konvertert til en funksjon av modenhet. Resultatene er rimelig nøyaktige for de første 100 til 200 modenhetstimene. Temperaturutviklingen blir målt ved hjelp av en datalogger og temperaturen blir målt i intervaller mellom 10 og 15 minutter[1].

Herdekassene som ble benyttet er vist i figur 4.



Figur 4 Herdekasse [11]

Reseptene er formet av COIN og ble kun justert for fuktinnhold i sanden. Tabell 1 viser blandingskjema for de tre uvalgte betongene. Sementen som ble brukt for alle betongene er Norcem Anlegg FA.

Tabell 1 Blandingskjema

	20% FA	30% FA	40% FA
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
Sement	368,9	327,4	287
Fyveaske	0	36,4	71,8
Silikastøv	18,4	18,2	17,8
Årdal 0-2 mm	200,2	200,2	200,2
Årdal 0-8 mm	737,1	737,1	737,1
Årdal 4-8 mm	273,8	273,8	237,8
Årdal 8-16 mm	611,5	611,5	611,5
Vann, totalt	173,2	171,9	169,6
SP-stoff	2,0	1,8	2,5

Forsøkene ble gjort etter “NS 3657:1993 Måling av varmeutvikling”[12]. Etter blanding ble betongene plassert i herdekassene. Videre ble kassene satt inn i et varmeskap som ble stilt inn til å holde en konstant temperatur på 40°C. Dette ble gjort for å redusere temperaturforskjellen mellom betongen og omgivelsene, noe som fører til midre varmetap. Både betongtemperaturen og omgivelsestemperaturen ble logget ved hjelp av dataloggere som var koblet til en datamaskin. Temperatur ble loggført hvert 15 minutt. Temperaturloggingen foregikk i minst syv døgn.

Etter forsøkene var ferdig så ble all data kopiert over i herdekasse-regneark som er utviklet av Sverre Smeplass. Nødvendig inndatata til regnearket ble hentet fra tidligere forsøk

gjennomført via COIN. De finnes i tabell 3-5. Regnearket bearbeidet så dataene slik at man kunne hente ut informasjon om varmeutviklingen. Resultatene er presentert i tabell 2.

Tabell 2 Resultater fra herdekasseforsøk

	20% FA	30% FA	40% FA
Q_{∞}	292	266	248
τ	19,16	20,98	22,84
α	1,07	1,05	0,95
Makstemperatur	54.2° C	51.1° C	47.3° C

Som forventet oppnår betongen med minst flyveaske den høyeste temperaturen under herdeforløpet og makstemperatur er synkende med økende flyveaskemengde. Varmemengden (Q_{∞}) avtar også med økende mengde flyveaske.

Usikkerheter i forsøket kan være tiden det tok før loggingen startet. På grunn av problemer med plass inne i varmeskapet tok det over 20 minutter fra blanding og til herdekassene var plassert inne i skapet. En annen feilkilde kan være det faktumet at temperaturen i varmeskapet varierte i fra 32°C til 42°C. Grunnen til dette er at varmeskapet er termometerregulert og at det er litt treghet i dette systemet. Den skrur seg av når ønsket temperatur er oppnått, men temperaturen kan falle en del under ønsket verdi før den igjen skrur seg på.

3.3.2 Inndata for spenningsberegning i CrackTest COIN

Materialdata som ble brukt i forbindelse med rissrisikoanalysene ble tilsendt fra Gunrid Kjellmark som er involvert i COIN. Dataene er samlet inn via forsøk gjort i SINTEF-laben i Trondheim. Resultatene fra herdekasseforsøkene erstattet varmeutviklingsdata som tidligere var gjort. Inndata ble lagt inn i CrackTest COIN ved å bruke programmet “Material Editor” som følger med. Det var ikke tilgjengelig data om relaksasjon, så relaksasjonsdata fra en av lavvarmebetongene som allerede lå inne i programmet ble benyttet for alle betongene. All data er presentert i tabellene 3-5.

Tabell 3 diverse materialdata

	20% FA	30% FA	40% FA
Parameter A	31988 J/mol	33655 J/mol	36806 J/mol
Parameter B	269 J/(mol·°C)	307 J/(mol·°C)	65 J/(mol·°C)
Densitet	2390 kg/m ³	2380 kg/m ³	2390 kg/m ³
Varmekapastiet	1.050 kJ/(kg·°C)	1.048 kJ/(kg·°C)	1.050 kJ/(kg·°C)
Varmeledningsevne	2.2 W/mK	2.2 W/mK	2.2 W/mK
α_t	$9,2 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$9,2 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$9,2 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
f_{c28}	73.15 MPa	70.77 MPa	61.27 MPa
s	0.233	0.256	0.298
t_0	8.98 t	8.00 t	8.00 t
f_{t28}	3.29 MPa	3.28 MPa	3.05 MPa
n_t	0.510	0.610	0.611
E_{28}	30.55 GPa	27.70 GPa	27.80 GPa

Tabell 4 Autogen deformasjon

	20% FA	30% FA	40% FA
Modenhets [t]	Autogen deformasjon [10⁻⁶]	Autogen deformasjon [10⁻⁶]	Autogen deformasjon [10⁻⁶]
0	0	0	0
11	-7,34	2,53	-3,93
12	-6,56	2,43	-6,21
17	-20	3,06	-9,31
22	9,68	1,43	-10,8
26	9,70	0,95	-8,30
42	11,6	10,5	5,12
72	14,6	14,0	8,88
120	16,4	11,8	-5,27
168	18,0	10,8	-3,86
336	36,2	15,0	16,5
500	49,7	28,4	9,92
672	69,5	33,4	19,4

Tabell 5 Diskret data for varmeutvikling

20% FA		30% FA		40% FA	
Modenhhet[t]	Varme [kJ/kg sement]	Modenhhet[t]	Varme [kJ/kg sement]	Modenhhet[t]	Varme [kJ/kg sement]
0	0	0	0	0	0
7.3	10	8.3	10	8.4	10
9.0	20	10.1	20	10.5	20
11.2	40	12.4	40	13.3	40
13.2	60	14.7	60	16.1	60
15.1	80	16.9	80	18.8	80
16.9	100	19.1	100	21.9	100
19.1	120	22.7	120	28.0	120
22.5	140	29.0	140	38.9	140
28.1	160	29.5	160	47.0	150
37.1	180	55.9	180	57.1	160
50.8	200	65.9	190	69.7	170
68.4	220	77.0	200	84.7	180
79.0	230	89.6	210	101.2	190
91.7	240	105.5	220	120.9	200
109.1	250	128.4	230	132.8	205
137.2	260	146.1	235	146.8	210
190.6	270	170.8	240	165.8	215
257.7	275	212.0	245	195.5	220
318.0	277	284.0	249	266.5	226

4 Flyveaskedoseringens innvirkning på rissrisiko

4.1 Formål

Formålet med dette kapittelet er å analysere effekten flyveaskeinnhold har på rissindeksen for betongkonstruksjoner der fastholdningseffekter gjør konstruksjonen utsatt for opprissing. Analysene ble gjort i CrackTest COIN og på en rekke ulike geometrier og med betonger med ulikt innhold av flyveaske. Framgangsmåte og resultater vil bli presentert, og kvaliteten på materialdata vil bli diskutert sammen med resultatene. Materialene som benyttes er presentert i kapittel 3.

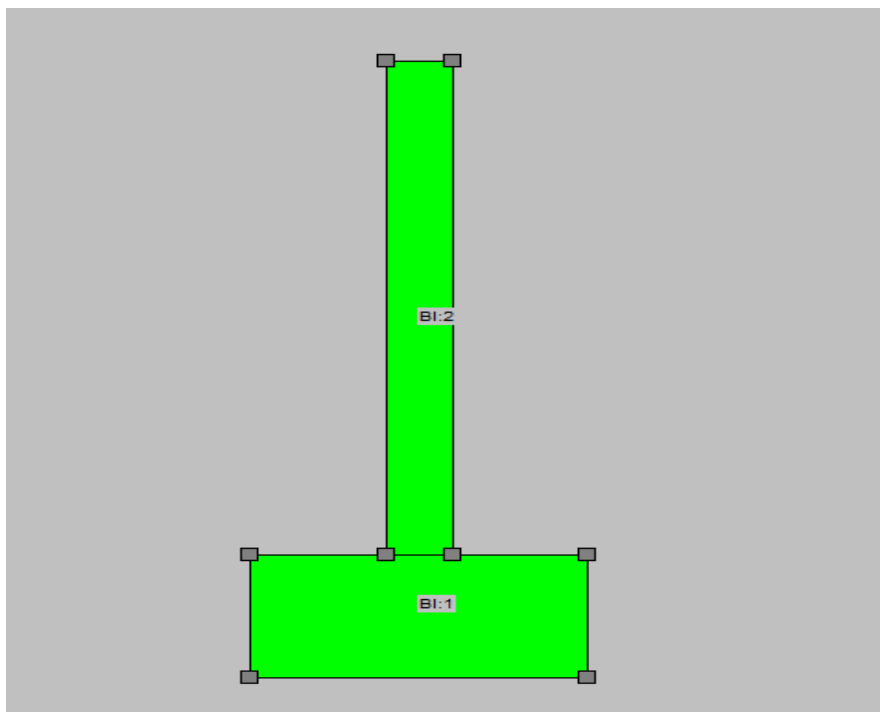
4.2 Geometri og randbetingelser

Simuleringene ble gjort på en betongvegg som støpes oppå en moden betongplate. Det ble gjort undersøkelser av rissindeks for fire ulike veggtykkelser. Dimensjonene til betongplaten ble holdt konstant. Temperaturen til den ferske betongen ble satt til 20°C. Bakketemperatur, lufttemperatur og temperaturen i bunnplata ble alle satt til 2°C. Veggforskalingen består av 21 mm kryssfiner som fjernes tre døgn etters støpning. Vinnhastigheten er 2 m/s og veggen støpes med en hastighet på 1 m/t. De utvalgte dimensjonene vises i tabell 6.

Tabell 6 dimesjoner for konstruksjonen

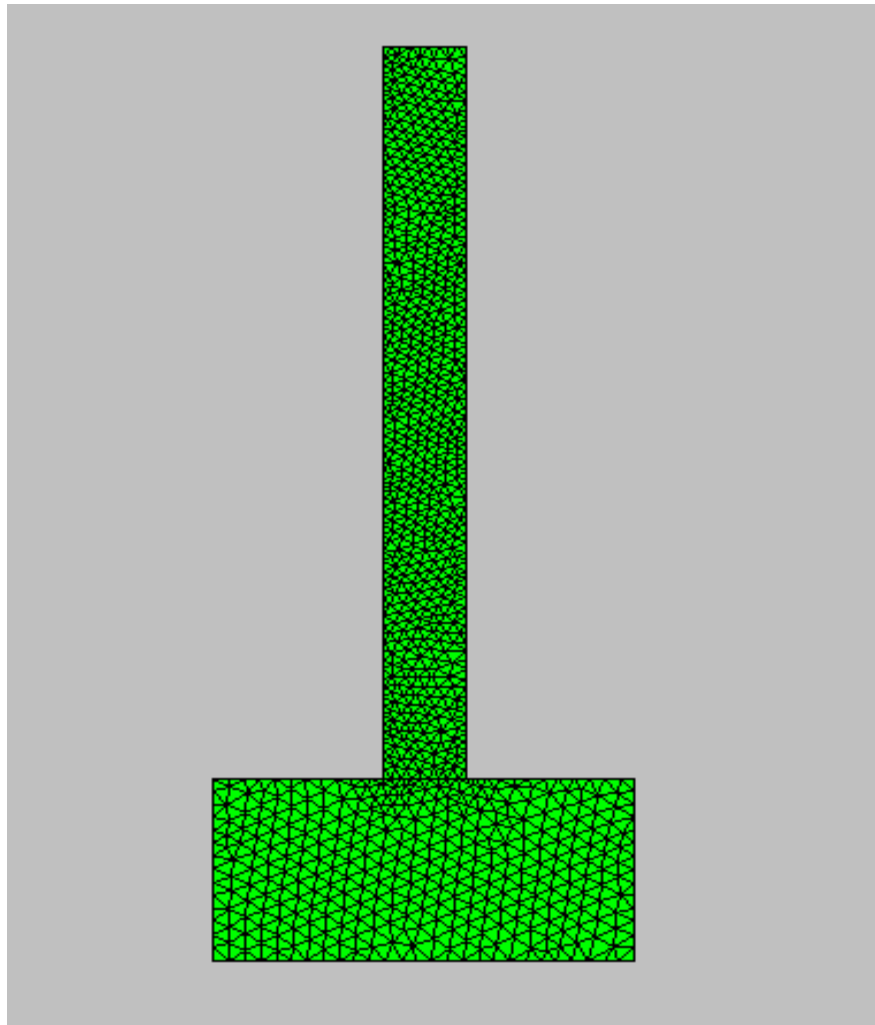
Veggtykkelse[m]	Vegghøyde[m]	Platetelengde[m]	Platehøyde[m]
0,6	8	4	2
0,8	8	4	2
1,0	8	4	2
1,2	8	4	2

Figur 5 viser hvordan konstruksjon ble modellert.



Figur 5 Geometri

For å oppnå minst åtte elementer i alle retningene av tverrsnittet ble størrelsen på elementene i veggen gjort mindre enn i platen. Elementenstørrelsen i veggen ble satt til 0.1 mot 0.15 i platen. Figur 6 viser simuleringmodellen med FEM-nett.

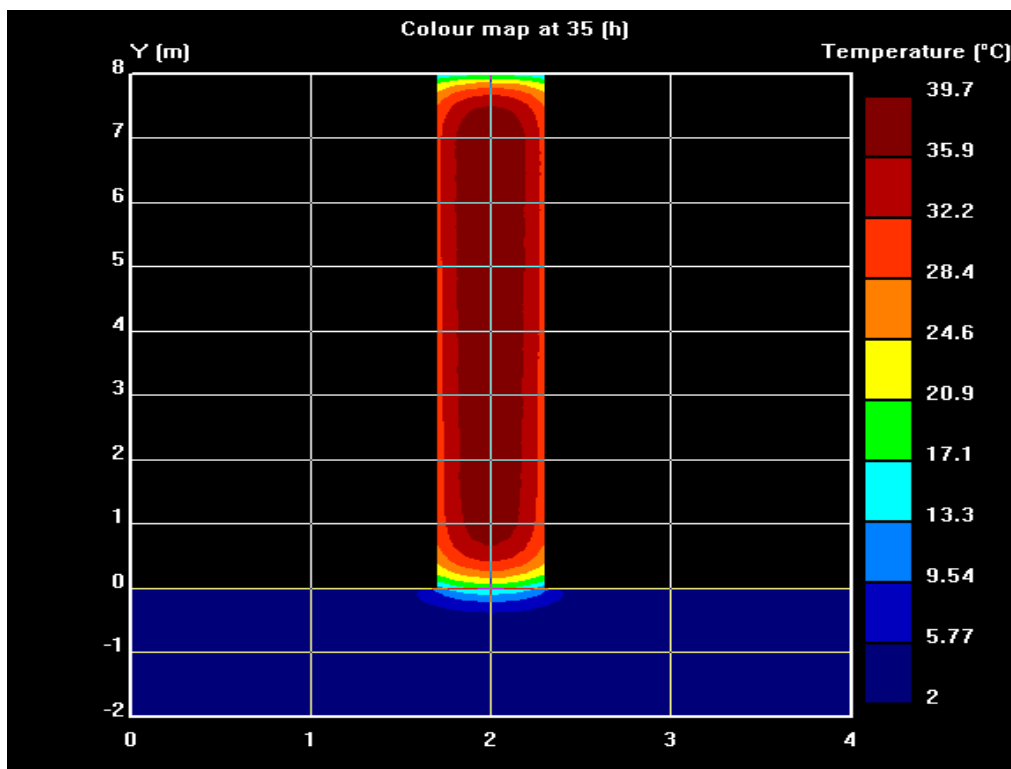


Figur 6 FEM-nett

Før simuleringen startet ble fastholdningen satt. I og med at tverrsnittet er symmetrisk er fri rotasjon tillatt; både om x- og y-aksen.

4.3 Resultater fra simuleringene

Figur 7 viser temperaturfordelingen i tverrsnittet for betongen med 20 % flyveaske og veggtykkelse på 0.6 meter etter 35 timer. Som det kommer fram av av illustrasjonen så er den høyeste temperaturen i midten av veggen. Dette er forventet i og med at varmetapet til omgivelsen vil skje ved overflaten, og den midterste delen er isolert av den omliggende betongen.

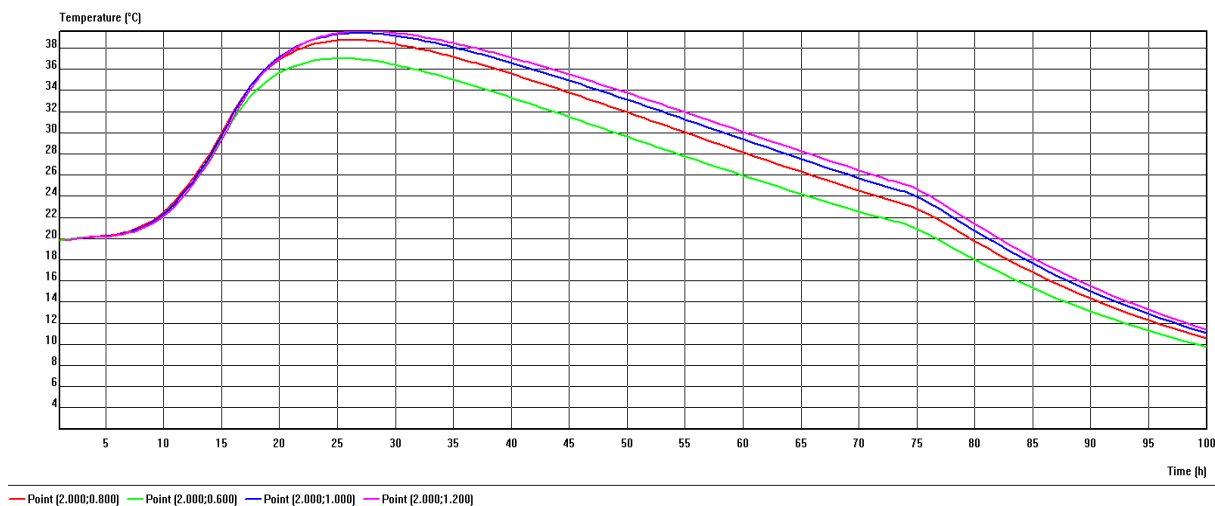


Figur 7 Temperaturfordeling i tverrsnittet etter 35 timer

Ut i fra dette ble det valgt ut fire punkter som ble undersøkt for maksimal temperatur og maksimal rissindeks. Disse punktene er alle sentrisk plassert i veggen med en avstand ned til fundamentet på henholdsvis 0.6, 0.8, 1.0 og 1.2 meter.

For tynne veggtykkelser kan den store overflaten relativt til tverrsnittsarealet føre til at maksimal rissindeks ikke oppstår sentrisk i veggen. For sikkerhets skyld ble rissindeksen derfor kontrollert for punkter som var plassert nærmere veggoverflaten, men det viste seg at høyeste verdier for rissindeks alltid var sentrisk plassert i veggen.

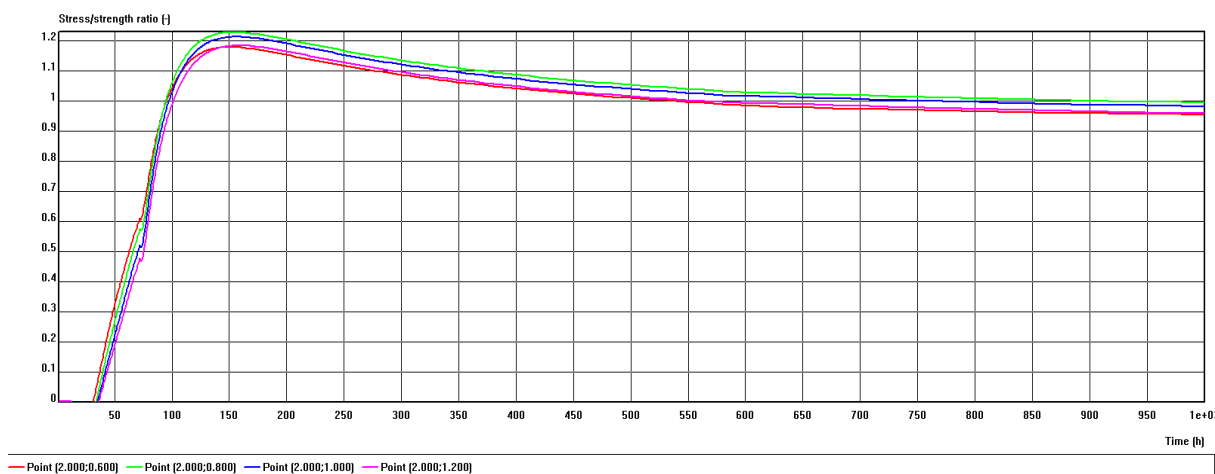
Figur 8 viser temperaturutviklingen i veggen for 0.6 meter tykk vegg og et flyveaskeinnehold på 20 %.



Figur 8 temperatur i vegg for de fire utvalgte punktene

Varmeutviklingen går langsomt de første par timene. Etter det akselererer kurven og en maksimaltemperatur på 39.6°C oppnås etter omtrent 27.5 timer.

Figur 9 viser rissindeksforløpet for den samme vegg.



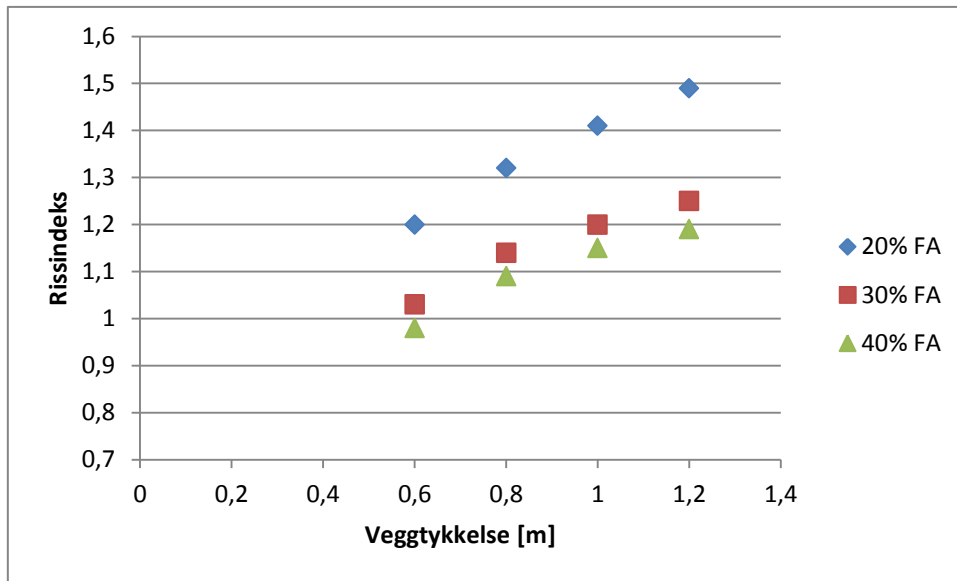
Figur 9 Rissindeks for de fire utvalgte punktene

Simuleringene ble så gjentatt for alle geometrier og med alle betongtypene. Tabell 7 viser rissindeksen for alle betongtypene og de ulike veggtykkelsene (d).

Tabell 7 Rissindeks

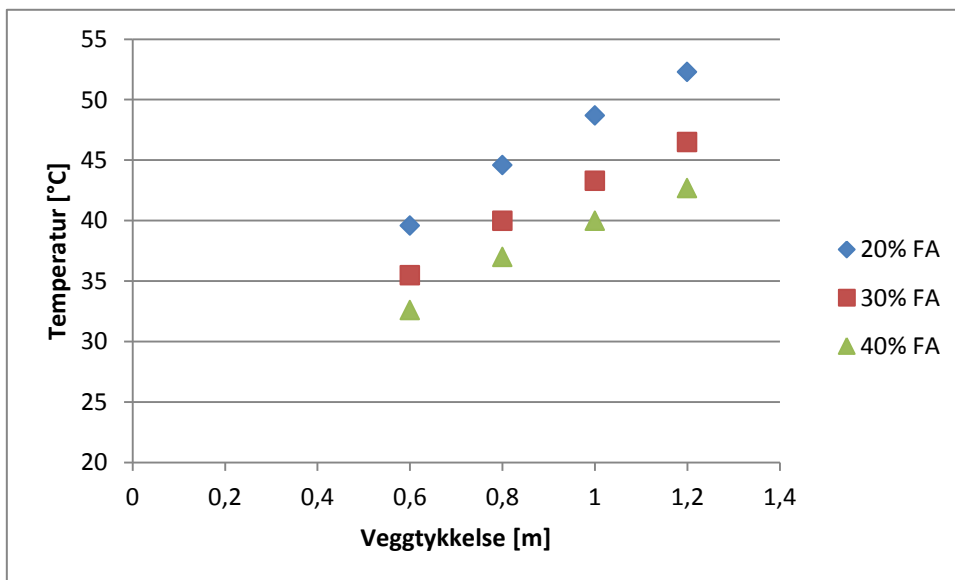
	d = 0,6 m	d = 0,8 m	d = 1,0 m	d = 1,2m
20% FA	1.23	1.36	1.44	1.5
30% FA	1.03	1.14	1.2	1.25
40% FA	0.98	1.09	1.15	1.18

Resultatene fra tabell 7 er gjengitt grafisk i figur 10.



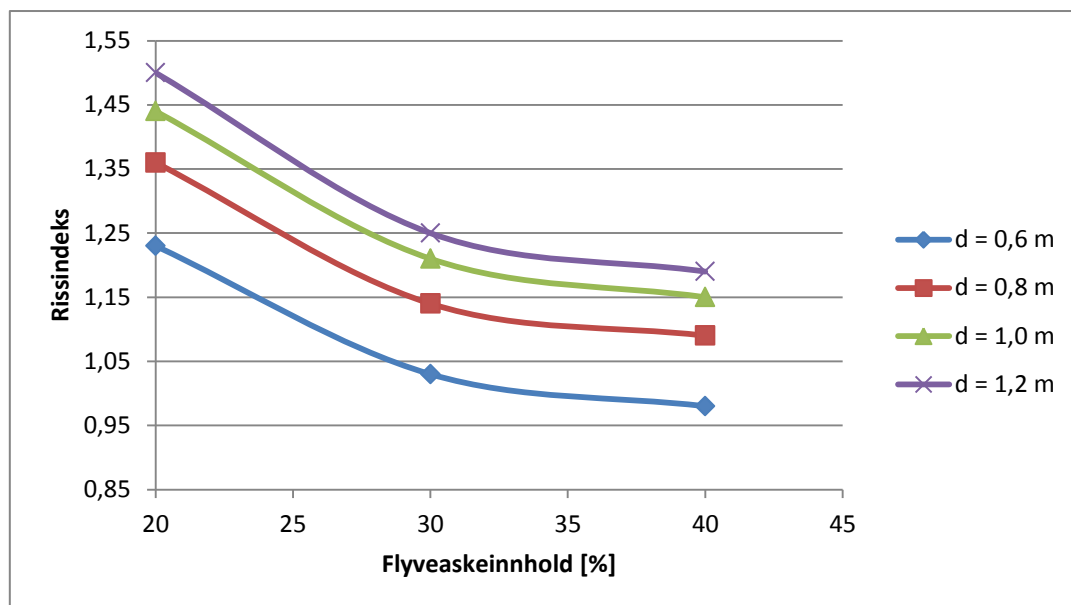
Figur 10 Rissindeks plottet mot veggykkelse

Figuren illustrerer at rissindeksen øker med økt veggykkelse for alle tre betongene. Ikke overraskende da større veggykkelse gir mer betong og dermed mer varme, se figur 11. Temperaturdifferansen mellom vegg og fundament blir da større og man får høyere spenninger, noe som fører til høyere rissindeks.



Figur 11 Makstemperatur i vegg plottet mot veggykkelse

Resultatene viser også at rissindeksen reduseres når mer sement erstattes av flyveaske. En bedre illustrasjon på dette kan ses i figur 12.



Figur 12 Rissindeks mot flyveaskeinnhold for de ulike veggtykkelsene, d

Grafen viser at 20 % FA kommer klart ugunstigst ut, mens forskjellen mellom 30 % FA og 40 % FA er små. Sistnevnte oppnår lavest rissindeks for alle veggtykkelsene.

Figuren viser også at økningen i rissindeksen blir mindre jo tykkere veggen blir. Ettersom bunnplaten har konstante dimensjoner så vil fastholdingen avta når veggtykkelsen øker. Dette vil delvis kompensere for den stigende temperaturen i veggen og rissindeksen øker ikke like raskt.

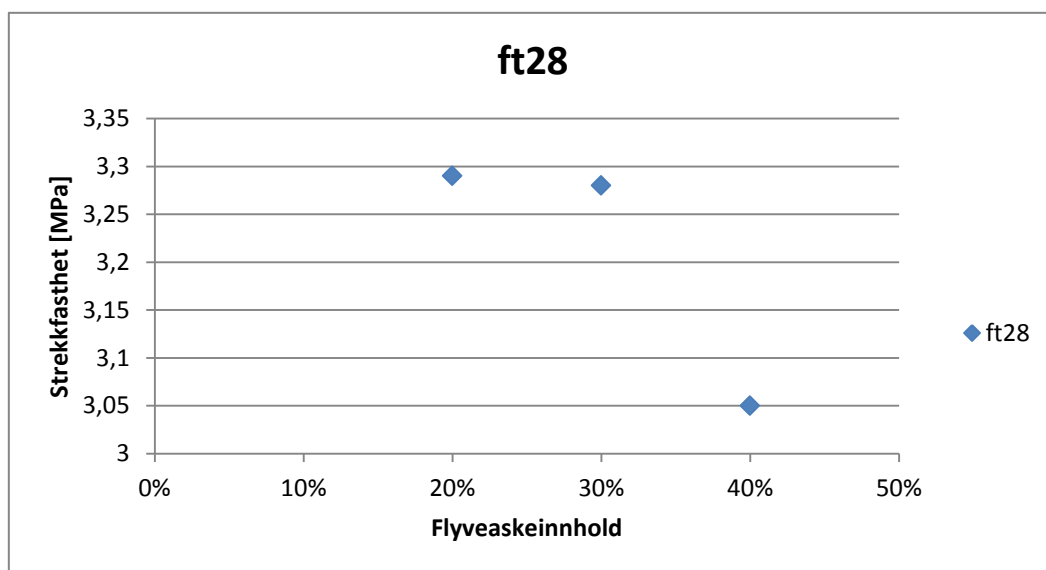
4.4 Evaluering av materialdata

4.4.1 Generelt

Det vil alltid være usikkerheter når man på skal ta resultater som er samlet inn via enkelte forsøk og så benytte seg av dem på generell basis. Før det kan sies noe om hvor realistiske resultatene fra CrackTest-simuleringene er, må dermed kvaliteten av materialdata vurderes. De parameterne som har størst innvirkning på rissindeks og de det knytter seg størst usikkerhet til vil bli evaluert. Eventuelle avvik og konsekvensen av de vil følgelig bli diskutert.

4.4.2 Strekkfasthet

Strekkfastheten benyttes direkte i ligningen for rissindeks. Det er klart at den da vil ha enorm betydning for den beregnede rissindeksen. Den oppgitte strekkspenningen til COIN P3.1-serien er i figur 13 plottet mot varierende flyveaskeinnhold



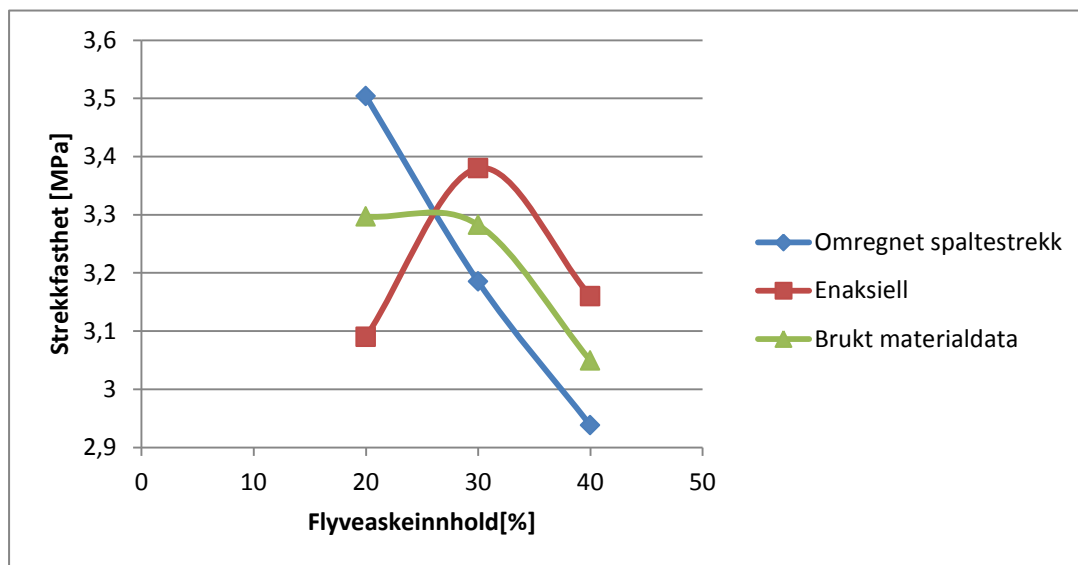
Figur 13 Strekkfasthet

Figuren viser at strekkfastheten omtrent er lik for 20 % FA og 30 % FA. Det er dog store forskjeller når flyveaskeinnholdet økes til 40 %, og sistnevnte har den klart laveste strekkfastheten. I kapittel 2 så ble det nevnt at det å erstatte sement med flyveaske fører til tregere varmeutvikling noe som igjen fører til en forsinket styrkeutvikling. Ut i fra dette skulle det forventes en gradvis reduksjon av fasthet når flyveaskeinnholdet i betongen økes og det kan dermed settes spørsmålsteget ved nøyaktigheten av den oppgitte strekkfastheten.

En grundigere vurdering av strekkfastheten kan gjøres ved å studere forsøksrapporten som bestemte de mekaniske egenskapene [10]. Fra den kommer det fram at strekkfastheten er beregnet ved å bruke resultater fra både spaltestrekkeforsøk og enaksielle strekkeforsøk.

Spaltestrekkeforsøk pleier som regel å overestimere strekkfastheten[13], så resultatene fra spaltestrekkeforsøkene har blitt regnet om til mer “realistiske” verdier. Dette gjorde de ved å finne en korrelasjon mellom resultatene fra de to ulike prøvemethodene. Denne korrelasjonsfaktoren ble brukt til å finne reduserte verdier for spaltestrekke. De endelige strekkfasthetsdataene er gjennomsnittsverdien av enaksiekk strekk og omregnet spaltestrekke.

Dette er illustrert i figur 14. Der er resultatene for omregnet spaltestrekke plottet sammen med enaksiekk strekk og de endelige verdiene for strekkfasthet.



Figur 14 Ulike strekkfasthetsforløp

Den blå kurven viser de omregnede måleresultatene for 28 dagers-strekkfasthet fra spaltestrekkeforsøk. Den har en gradvis reduksjon når flyveaskemengden øker. Det er resultatene fra de enaksielle forsøkene som gjør at strekkfasthetsfordelingen avviker fra forventningene; der er den målte strekkfastheten lavest for 20 % FA.

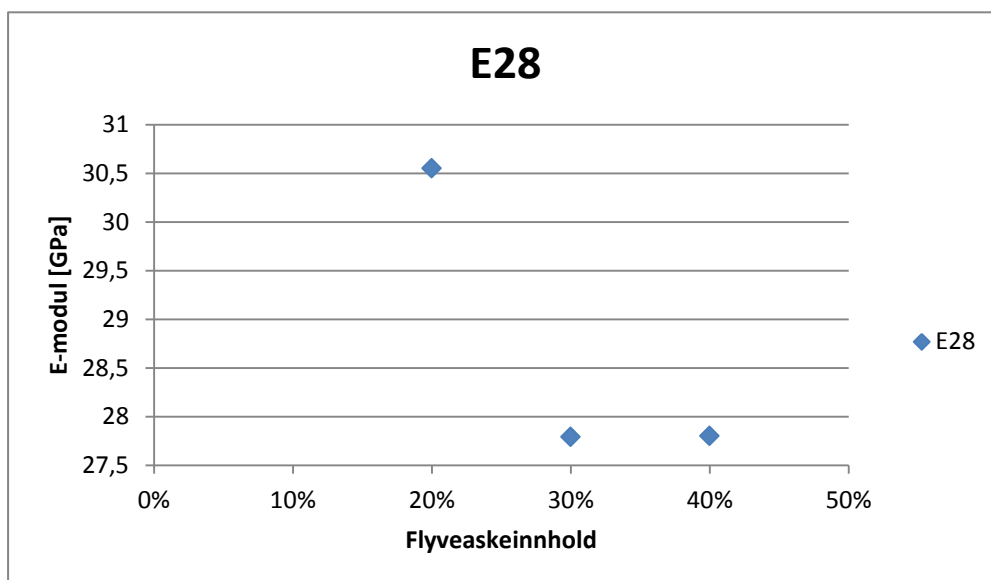
I masteroppgaven til Oliver Skjølvik ved NTNU[13], skriver han at “*mye taler for at enaksiekk strekkfasthet er for unøyaktig som testmetode for betonger med flyveaske i sementen*” (s.63). Baseret på forventninger med grunnlag i teorien på vil resultatene fra figur 14 være med på å underbygge påstanden til Skjølvik. Det likevel ikke tilstrekkelig måledata til å trekke noen endelig konklusjon.

Det at forholdet i strekkfasthet for 30 % FA og 40 % FA stemmer så godt overens som det

gjør, så vil det være rimelig å si at det er 20 % FA det er tilknyttet størst usikkerhet rundt med tanke på strekkfasthet. Dette være en av grunnene til tilfellet med 20 % flyveaskeinnhold kommer så mye mer ugunstig ut for opprissingsrisiko.

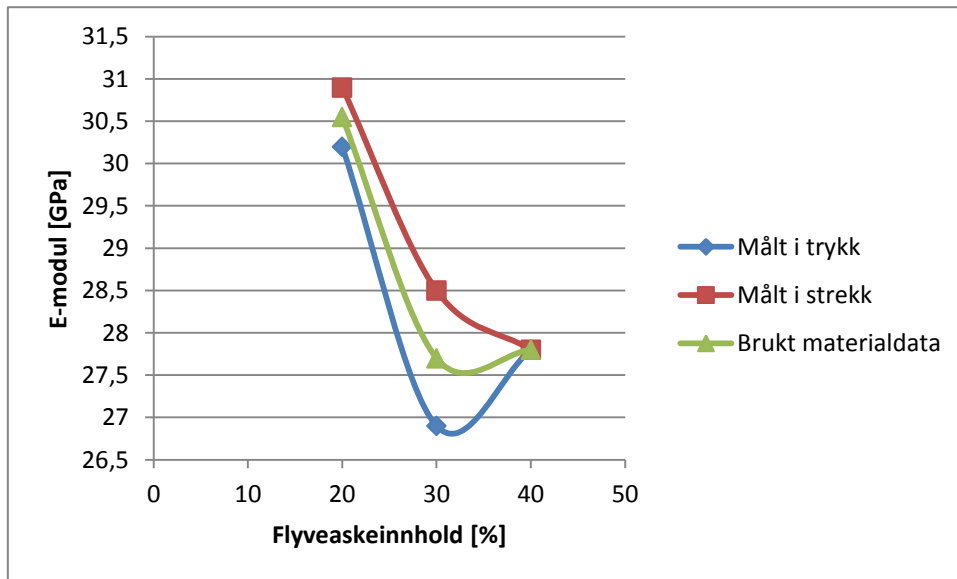
4.4.3 Emodul

E-modul er en parameter som har stor innvirkning på rissriskokalkulasjoner[9]. Høy E-modul bidrar til høy stivhet og høy spenningsutvikling i tverrsnittet. Derfor er er en lav E-modul gunstig for å redusere rissrisikoen. Figur 15 viser E-modulene for de utvalgte betongene.



Figur 15 E-modul for P3.1-serien

Figuren viser at 30 % FA oppnår den laveste E-modulen. Igjen motstrider dette forventningene. Fra forsøksrapporten [10] kommer det fram at også for E-modul er det utført to ulike forsøk for beregning av egenskapen. E-modulen er mål i både trykk og i strekk. Gjennomsnittsverdien av resultatene fra disse to forsøkene ble brukt til å bestemme de endelige verdiene for E-modul. Se figur 16.



Figur 16 Ulike E-modul-forløp

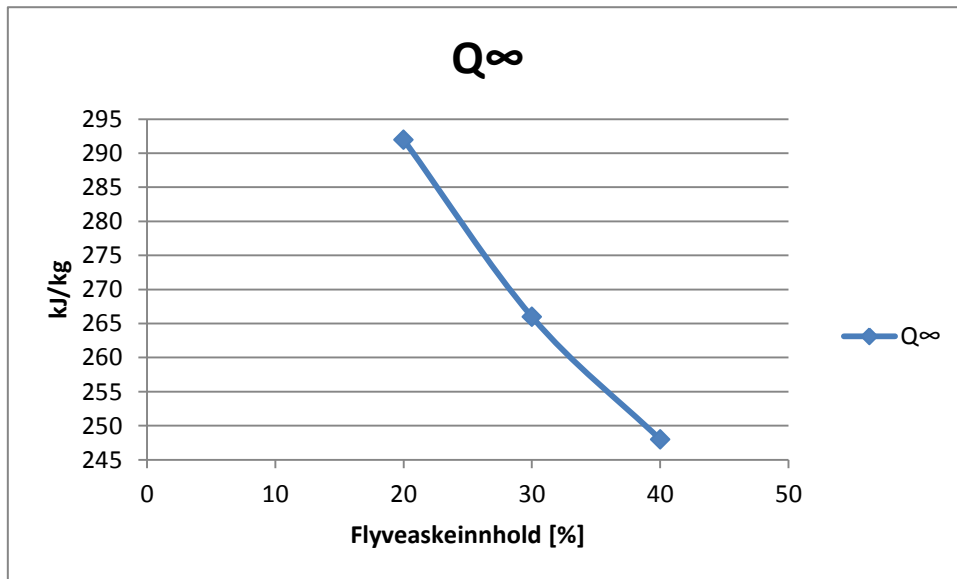
Figuren viser at begge måle metodene gir den samme E-modulen for 40 % FA. Det er litt forskjell mellom kurvene for 20 % FA og store forskjeller for 30 % FA.

De enaksielle forsøkene gir her et resultat som samsvarer bedre med forventningene til E-modul utvikling med varierende flyveaskeinnhold. Usikkerheten anslås dermed til å være størst for E-modulen til betongen med 30 % FA. Å se bort i fra E-modulen som er beregnet i trykktester så ville rissindeksene økt litt for 20 % og 30 % FA.

4.4.4 Varmeutvikling

Varmeutviklingen er en veldig viktig parameter for beregning av rissindeks. Det er temperaturforskjeller mot tilstøtende konstruksjoner som er hoveddrivkraften bak spenningsoppbyggingen i herdende konstruksjoner.

Figur 17 viser at varmeutviklingen stemmer godt overens med forventningene. Den totale varmeutviklingen minker med økt dosering av flyveaske. Data for varmeutvikling som ble benyttet i analysene ser dermed ut til å stemme bra. Alle de viktigste feilkildene fra forsøkene vil gjelde like mye for alle tre betongene.



Figur 17 Varme plottet mot FA-innhold

4.4.5 Andre parametere

Ettersom det ikke var tilgjengelig data for relaksasjon så ble relaksasjonsdata fra lavvarmebetongen som allerede lå inne i CrackTest COIN benyttet for alle de tre betongene i analysen. Det er ikke mulig å si hvor godt de stemmer overens med den virkelige relaksasjonen til betongene. I følge Bjøntegaard [9] så vil det være høyere kryp i betong som inneholder flyveaske. Dette fører til høyere relaksasjon, noe som er med på å senke spenningene. Høy relaksasjon er dermed ønskelig for å unngå opprissing. Relaksasjon er ikke en av de parameterene som har størst innvirkning på rissindeks[9], så usikkerhente her blir ikke diskutert for mye. Skulle det blitt gjort en antagelse så ville det vært at den benyttede relaksjonen gjør at rissindeksen til 40 % FA kommer litt konservativ ut, spesielt i forhold til 20 % FA.

Volumforandring grunnet termisk dilatasjon er hoveddrivkraften bak spenningsoppbyggingen i herdende betongkonstruksjoner. Autogene deformasjoner bidrar likevel til økte volumforandringer. I P3.1 betong-serien så minker den autogene deformasjonen når det tilsettes mer flyveaske. Dette bidrar til mindre volumforandring og dermed mindre spenninger i betongen. I en studie gjort av Tarun et.al [14], så kom de fram til betong med flyveaske hadde mindre autogent svinn de første 14 til 56 dagene. I følge resultatene fra denne studien vil det da være hensiktsmessig å benytte flyveaske noe som gjenspeiles i materialdata for P3.1-serien.

I følge Bjøntegaard og Kjellsen[15], så skal parameteren B reduseres med økt flyveaskemengde og parameteren A økes med økt flyveaske mengde. I de brukte inndataene så A-verdiene i samsvar med dette. Verdien for B er dog litt høyere for 30% enn for 20% FA. A- og B-verdiene har lite å si for for rissrisikoen [13], og forskjellene er små, så eventuelle usikkerheter her ses bort i fra.

4.4.6 Innvirkning på resultatene

For å være helt sikker på at materialdataen er representativ så måtte forsøkene vært forsøkt å blitt gjenskapt. Ut i fra den evalueringen som er blitt gjort så ser det ut som det kan være noe usikkerhet tilknyttet enkelte data. Av de viktigste parameterne er det spesielt strekkfasthet som ikke endrer seg som forventet og som har høye spredning i forsøksdata. Evalueringen av strekkfastheten viser at det er grunn til å tro at strekkfastheten for et flyveaskeinnhold på 20 % er underestimert. Dette kan forklare hvorfor 20 % FA kommer så mye dårligere ut enn de andre to for rissindeks. Hadde resultatene fra spaltestrekforsøkene vært brukt til å beregne rissindeks ville 20% FA havnet nærmere de to andre. Av de andre paramterne så kan det se ut E-modulen er litt overestimert for 30 % FA. Dersom mistankene skulle vise seg å stemme så ville det blitt midre spredning i resultatne for rissindeksen, men det overordnede resultatet som viser at rissindeksen synker ville likevel fremdeles vært gjeldende.

4.5 Sammenligning med andre betongtyper

Hvis brukeren selv ikke legger inn noen betonger i CrackTest COIN så kan de betongene som følger med programmet benyttes i analysene. I programmet kan man blant annet velge mellom en semi-lavvarmebetong med et flyveaskeinnhold på 20% og en lavvarmebetong med et flyveaskeinnhold på 40%. Det er ikke kun flyveaskeinnhold som er forskjellen mellom disse to betongene og valg av tilslag har mye å si for de mekaniske egenskapene til betong. Det ble gjort analyser av rissindeks på én av de utvalgte geometriene for disse betongene. Dette for å sammenligne med resultatene fra de tidligere analysene. Fra nå og utover vil disse betongene bli referert til som CrackTest-serien.

For å ha sammenligningsgrunnlag med P3.1-serien for alle mengdene flyveaske så ble det hentet inn data av en betong med 30 % flyveaske i CrackTest. Semi-lavvarmebetongen som ligger inne i CrackTest fra før er basert på en betongresept som er brukt i forbindelse med senketunnellen i Bjørvika som opprinnelig hadde 30% flyveaske. Eneste forskjellen er et at varmeutviklingsdata er erstattet med restultater fra forsøk der flyveaskemengden er redusert til 20% [13]. Av den grunn kan det tenke seg at semi-lavvarmebetongen har noe høyere fasthetsegenskaper enn oppgitt. Materialdataene til semi-lavvarmebetongen ble dermed kopiert og varmeutviklingsdata ble erstattet med data hentet fra forsøk på betongen med 30% flyveaske slik at det nå også tre betonger i CrackTest-serien [13]. Materialdata finnes i tabell 8.

Tabell 8 Materialdata, "CrackTest"-serien

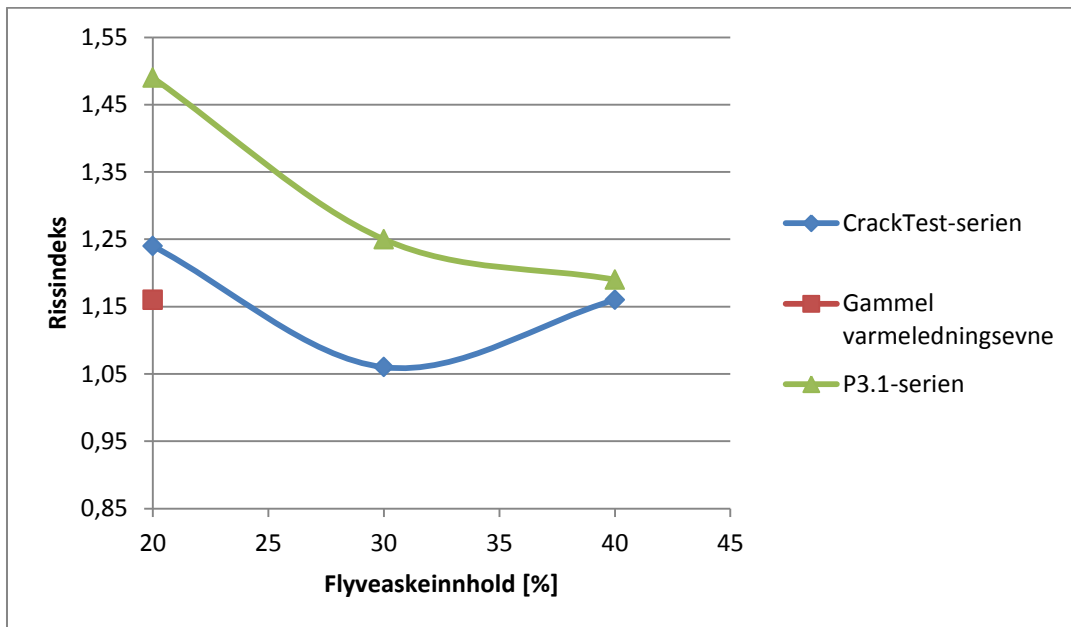
	Q_{∞} [kJ/m ³]	t_0 [t]	Λ [W/mK]	f_{cc28} [MPa]	f_{t28} [MPa]	E_{28} [GPa]
20% FA	350	11	2.1*	50.7	3.13	29.3
30% FA	276**	11	2.1	50.7	3.13	29.3
40% FA	330	12	2.1	50	3	39.4

* Semi-lavvarmebetongen hadde oppgitt en varmeledningsevne på 3.7 W/mK, noe som er for høyt. Den ble justert ned til 2.1 W/mK, en verdi de andre også ble satt til.

** CrackTest benytter den svenske modellen for varmeutvikling, det var kun oppgitt verdier fra den danske. Data for varmeutvikling ble derfor satt inn som diskrete verdier.

Alle betongene hadde oppgitt samme verdier for autogen deformasjon. Alle start- og randbetingelser ble satt lik de tidligere simuleringene. Geometrien som ble valgt var 1.2 meter tykk vegg.

Figur 18 viser resultatene fra analysen plottet sammen med resultatene funnet med P3.1-serien. Den blå kurven viser rissindeksen for CrackTest-serien. Den grønne kurven viser rissindeksen for P3.1-serien som ble testet i forbindelse med denne matsteroppavene. Det røde punktet viser hvilken rissindeks semi-lavvarmebetongen fra CrackTest-serien ville oppnått dersom den tidligere oppgitte varmeledningsevnen på 3.7 W/mK hadde blitt benyttet.



Figur 18 Sammenligning av ulike betongtyper

Som figuren viser så endrer ikke CrackTest-serien seg på samme måte som P3.1-serien. 30 % FA kommer her gunstigst ut, etterfulgt av 40 % FA. Ettersom semi-lavvarmebetongens mekaniske egenskaper er hentet fra senketunnellbetongen med 30% flyveaske så vil det være rimelig å anslå den har noe unøyaktige materialdata og at rissindeksen for 20 % FA er overestimert.

En av grunnene til at 40% flyveaske oppnår en høyere rissindeks enn 30% er på grunn av den høye E-modulen. Dette kommer av tilslaget som er brukt i betongen.

Rissindeksen er jevnt over høyere for P3.1-serien enn for CrackTest-serien. Dette viser at selv om flyveaskemengden er lik så er det andre delmaterialer som for eksempel tislag som påvirker betongegenskapene og dermed hvor utsatt betongen vil være for opprissing.

Sammenligningen viser at dersom det eneste som varierer i betongsammensetningen er mengden sement som erstattes med flyveaske, så vil rissindeksen synke når flyveaskeinnholdet øker. Om det der i mot er to ulike betongtyper der også andre sammensetninger varierer så holder det ikke å si at den med høyest flyveaske vil ha lavest

rissindeks. Undersøkelse av betongegenskapene å gjennomføres og en sammenlign av betongene må utføres i et analyseprogram som for eksempel CrackTest COIN.

5 Bruk av varmekabler for å redusere rissrisiko

5.1 Formål

Bruk av flyveaske er med på å redusere temperaturen i den ferske betongen, noe som reduserer temperaturdifferansen mot tilstøtende konstruksjoner. En annen måte å redusere temperaturforskjellen i kaldskjøter er å varme opp den tilstøtende konstruksjonen [3].

Hensikten med dette kapitlet er å undersøke hvordan bruk av varmekabler i tilstøtende konstruksjon kan bidra til å redusere faren for opprissing, og hvor stort omfang oppvarmingen må ha. Anaysene ble utført i CrackTest COIN og på en rekke ulike geometrier. Det ble også gjort undersøkelser på kombinasjonstiltak av flyveaske og varmekabler for en av de utvalgte geometriene.

5.2 Geometri og grensebetingelser

Simuleringene ble igjen gjort på en betongvegg som skal støpes på en moden betongplaste. Denne gangen er ikke tverrsnittet symmetrisk om y-aksen. Høyden på veggen ble satt til 6 meter for alle simuleringen. For å oppnå tilstrekkelig høy stivhet ble betongplatens lengde satt til 10 meter. Tabell 9 viser de utvalgte geometriene.

Tabell 9 Dimensjoner

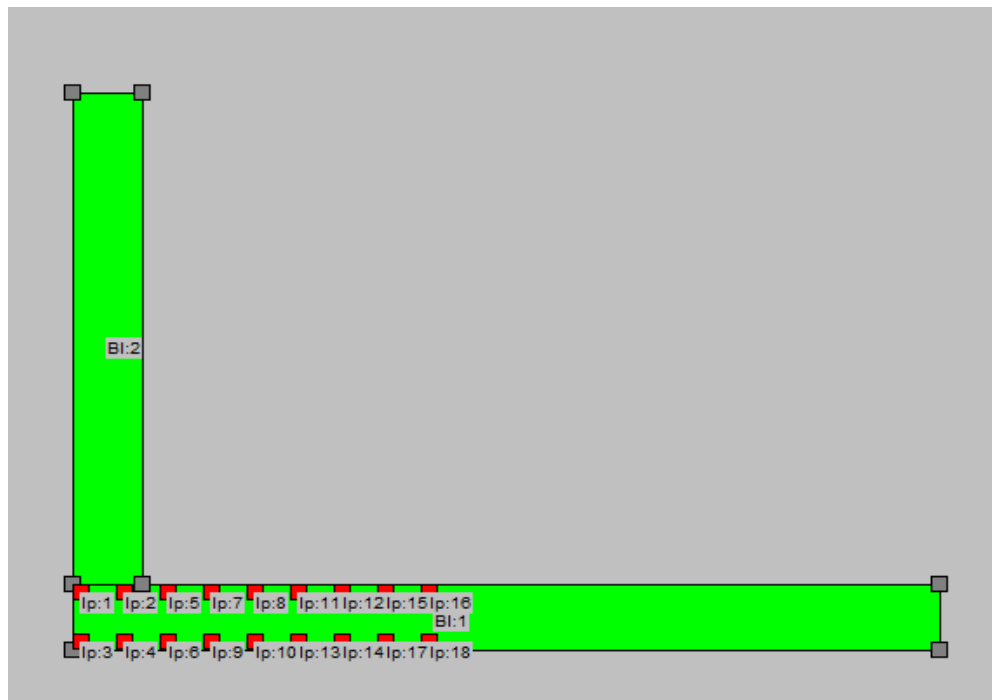
Veggtykkelse[m]	Vegghøyde[m]	Platetlengde[m]	Platehøyde[m]
0,8	6	10	0,8
1	6	10	0,8
0,8	6	10	1,2
1	6	10	1,2

Betongtypene som ble brukt i analysene var tradisjonell betong uten tilsatt flyveaske (gitt som Trad. Concrete CEM I i CrackTest COIN). Den ferske betongtemperaturen ble satt til 20°C. Det er temperaturlikevekt mellom bunnplaten, omgivelsene og bakken. Disse ble satt til 5°C. Vindhastigheten er 2 m/s og forskalingen består av 20 mm kryssfiner som tas bort tre døgn etter støping.

Ettersom tykkelsen på bunnplaten er såpass stor så ble varmekablene lagt i to lag – ett i toppen og ett i bunnen av platen. Overdekningen til kablene ble satt til 100 mm i alle retningene og effekten av varmekablene ble satt til 30 W/m. Toppen av bunnplaten ble dekket med et 50 mm tykt lag av plastisolasjon. Denne isolasjonen ble tatt bort når støping av veggen pågikk for så å legges på igjen. Isolasjonen fjernes for godt når varmekablene skrus av.

Det er alltid noe usikkerhet tilknyttet hvordan resultatene fra simuleringer henger sammen med virkelige situasjoner. Av den grunn ble ønsket rissindeks for analysene satt til 0.75. Senteravstanden mellom varmekablene og tidspunktet de skur seg på ble dermed variert for å komme under en rissindeks på 0.75.

Figur 19 viser simuleringsmodellen.

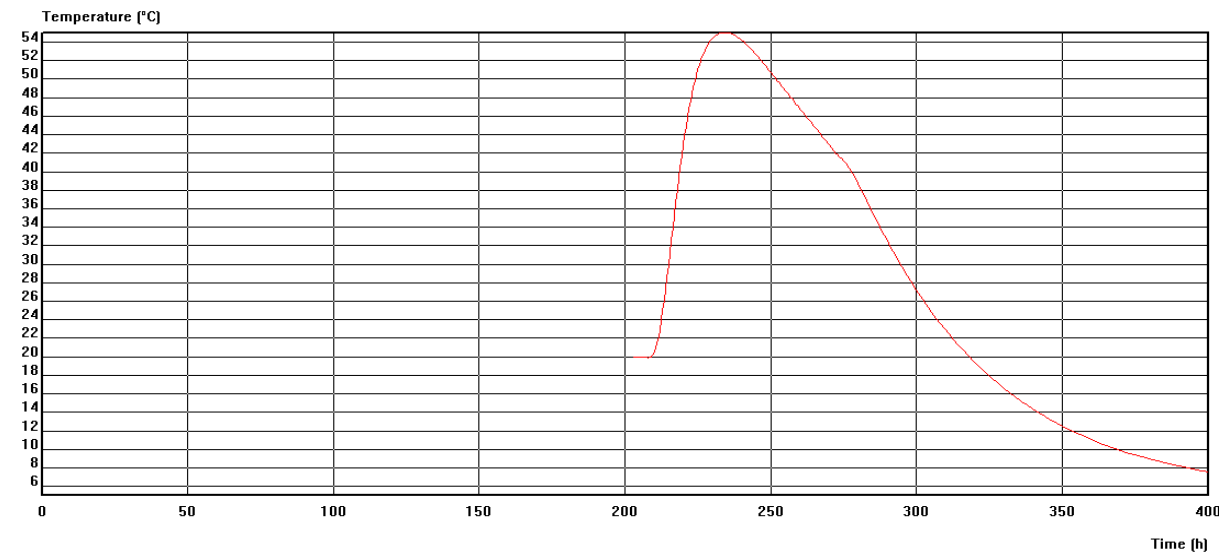


Figur 19 Vegg støpt på bunnplate med varmekabler

Ettersom tverrsnittet ikke er symmetrisk vil det kunne oppstå noe rotasjon om x-aksen. Dette vil dog være så lite at det kan neglisjeres. Rotasjonen ble dermed satt til fri om begge aksene.

5.3 Simulering i CrackTest COIN

Først ble det kjørt simuleringer av alle geometriene uten varmekabler. Dette for å finne tidspunkt for makstemperatur i veggen, slik at tidspunktet kablene skal skrus av kan bestemmes. Figur 20 viser temperaturforløpet midt i veggen for en av geometriene.

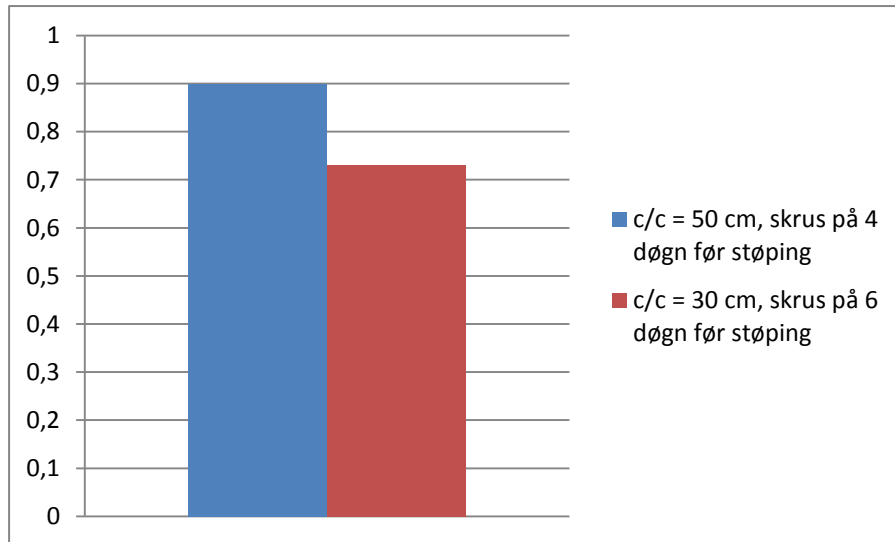


Figur 20 Temperaturforløpet mitt i veggen

Som figuren viser så når veggen maksimaltemperatur omtrent 35 timer etter støping. Dette gjalt for alle vegg- og platetykkelsene. Den lille knekken i grafen som inntreffer etter 72 timer kommer av at forskalingen tas bort og veggen mister da den isolerende effekten den hadde. Temperaturen reduseres dermed hurtigere fra dette tidspunktet.

Til å begynne med ble tidspunktet kablene slås på satt til fire døgn før støping.

Senteravstanden mellom kablene ble satt til 50 cm, men for konstruksjonene med den høyeste platetykkelsen var ikke dette nok til å komme under en rissindeks på 0.75. Senteravstand og tidspunktet kablene skrus på ble justert til 30 cm og seks døgn før støping. Figur 21 viser forskjellen i minste rissindeks for de to ulike betingelsene

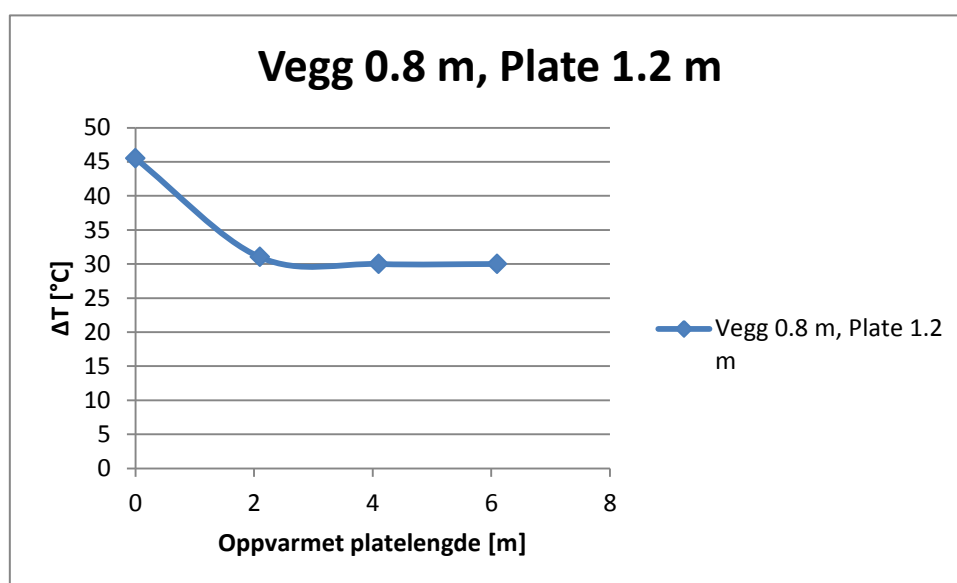


Figur 21 Rissindeks for de to ule betingelsene. Veggykkelse på 0.8 m og platetykkelse på 1.2 m

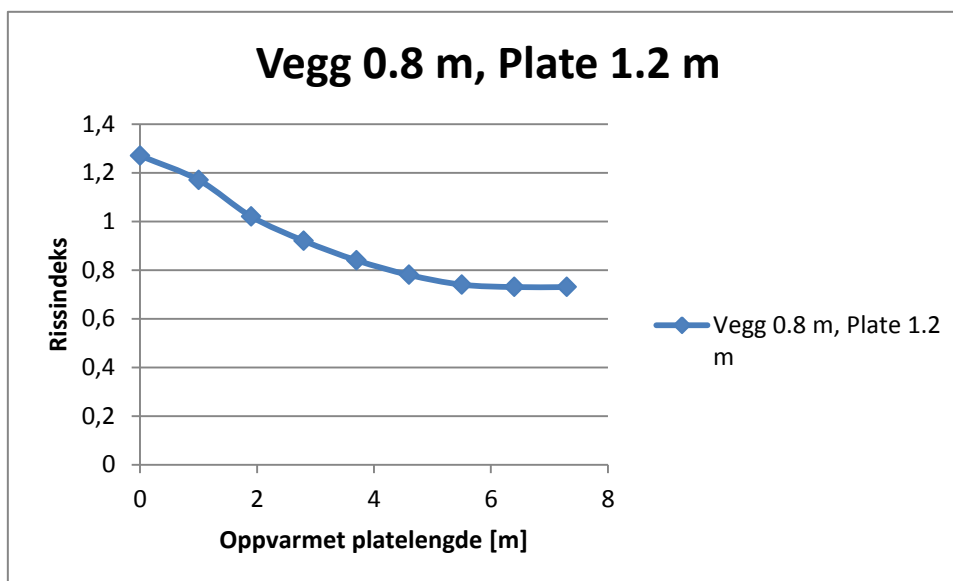
Tidspunktet varmekablene skrus på ble dermed satt til seks døgn for støping. De geometriene med den tynneste platetykkelsen beholdt en senteravstand mellom kablene på 50 cm.

Kablene ble først plassert ut i enden av bunnplaten, under veggen. Omfanget av oppvarmingen ble bestemt ved å øke antallet varmekabler gradvis slik at større og større dele av bunnplaten ble oppvarmet.

Figur 22, 24, 26 og 28 viser hvordan den maksimale temperaturforskjellen (ΔT) mellom et punkt midt i veggen og et punkt midt i bunnplaten sentrisk om veggaksen varierer ettersom hvor langt ut i platen kablene plasseres. Figur 23, 25, 27 og 29 viser rissindeks plottet mot den samme variasjonen.



Figur 22 Endring i temperaturdifferanse mot utbredelse av varmekabler



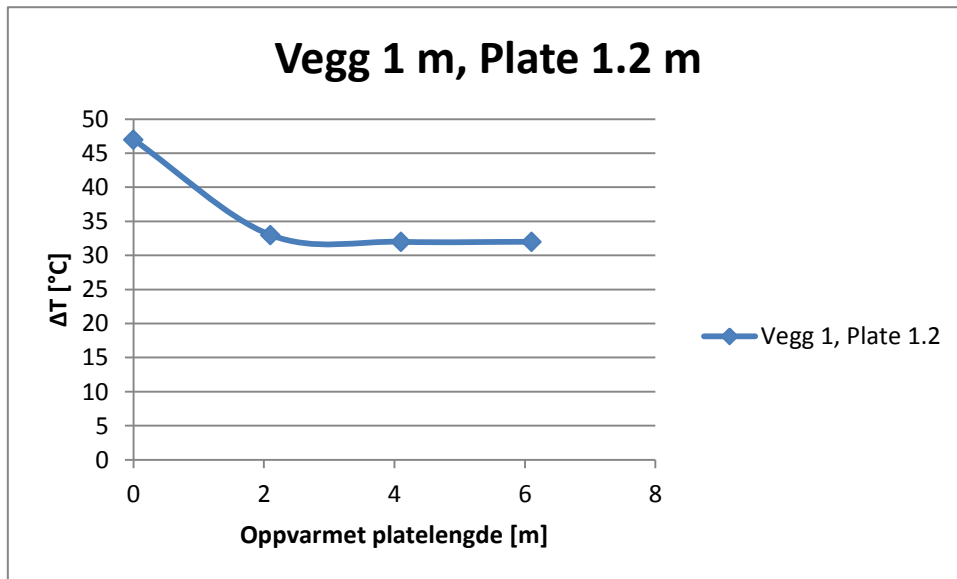
Figur 23 Rissindeks mot utbredelse av varmekabler

Figur 22 viser at temperaturdifferanse synker når varmekablene plasseres nært veggen. Ettersom større deler av bunnplaten varmes opp så flater ΔT ut.

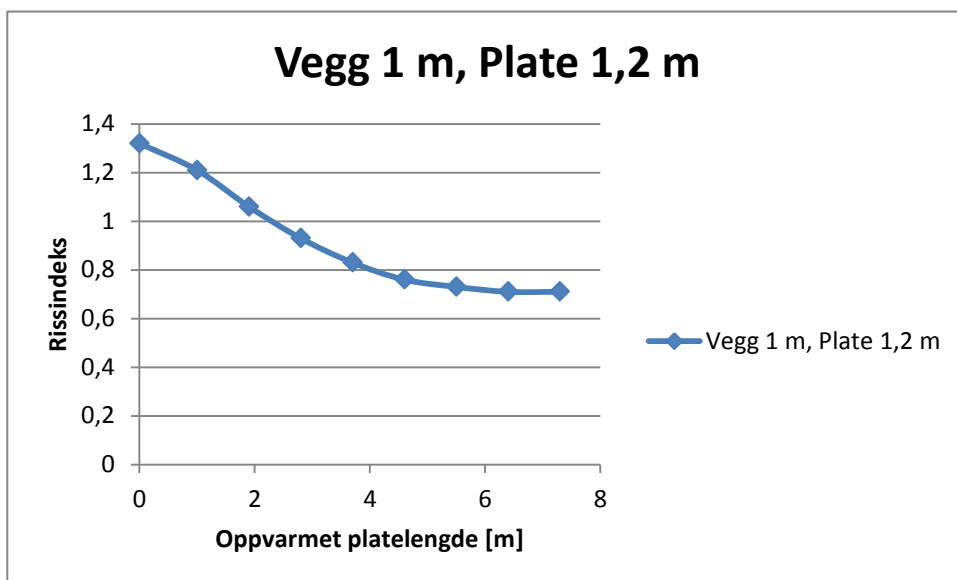
Figur 23 viser hvordan rissindeksen endrer seg for en veggtykkelse på 0.8 m og en platetykkelse på 1.2 m ettersom hvor langt ut i platen man plasserer varmekablene. Uten varmekabler er rissindeksen på 1.27.

I begynnelsen synker rissindeksen mye, mens oppvarming lengere ut i platen mindre effekt gir det på rissindeksen. Etter 5.5 meter har rissindeksen kommet under den ønskede verdien på 0.75. Etter 6 meter flater rissindeksen ut, og plassering av varmekabler lenger ut enn dette gir ingen effekt på rissindeksen

Den samme tendensen observeres når veggtykkelsen økes til 1 meter (figur 24 og 25). Etter som tverrsnittet av veggen er større blir det produsert mer varme og rissindeksen starter i dette tilfellet på 1.32. Den synker raskt når varmekablene plasseres de første meterene, før den også flater ut etter rundt 6 meter. Ønsket rissindeks på 0.75 oppnås etter omtrent 5 meter.

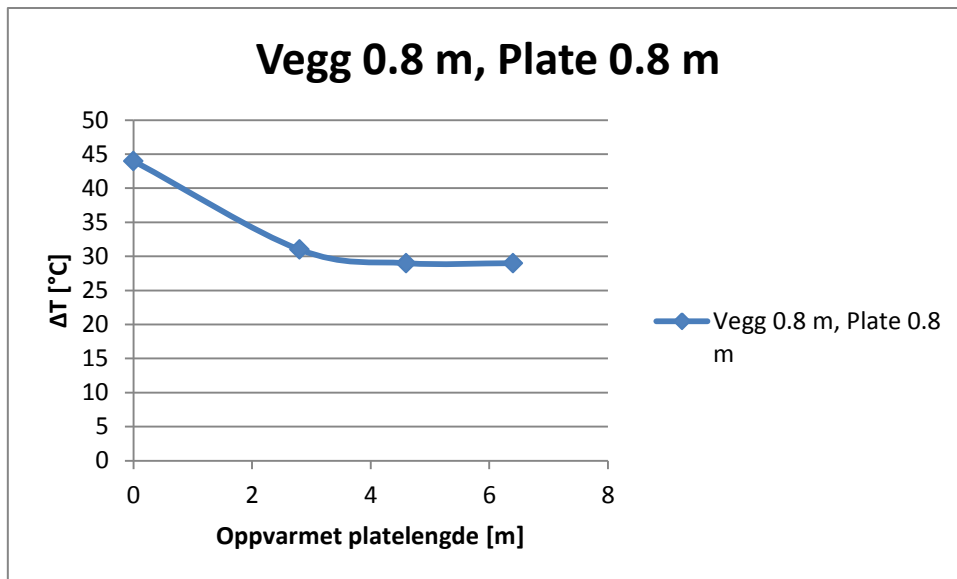


Figur 24 Endring i temperaturredifferanse mot utbredelse av varmekabler

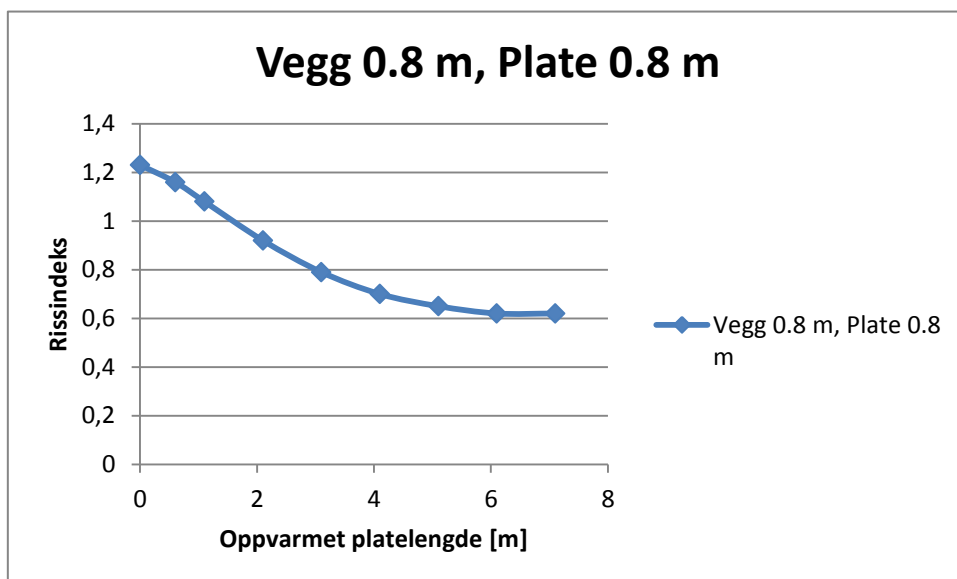


Figur 25 Rissindeks mot utbredelse av varmekabler

I figur 26 og 27 er veggtykkelsen og platetykkelsen blitt redusert til 0.8 meter. Selv om senteravstanden mellom varmekablene her er satt til 50 cm faller rissindeksen betydelig lavere enn i de to forige eksemplene. Rissindeksen er nede i 0.7 etter bare 4 meter. Rissindeksen flater ut på 0.62 etter rundt 6 meter.”

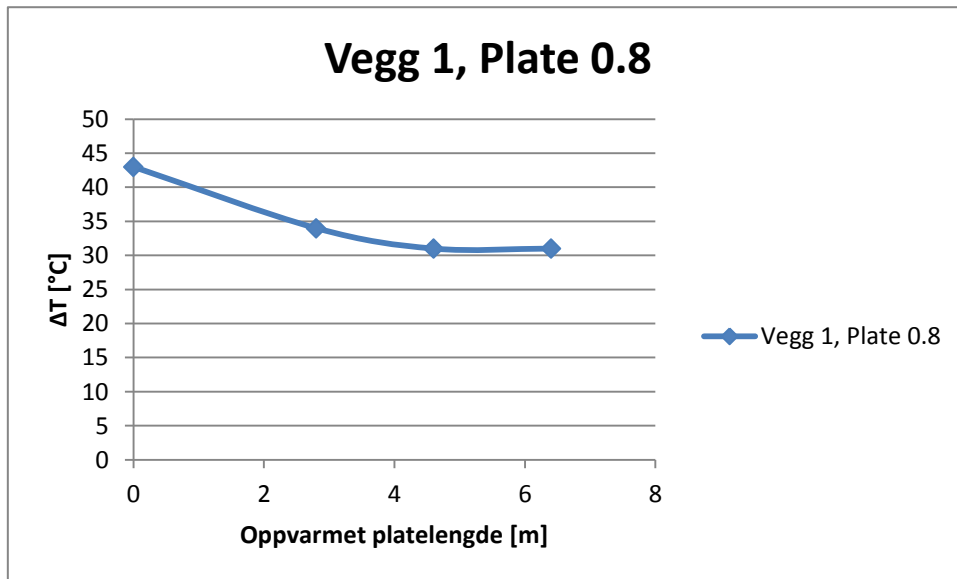


Figur 26 Endring i temperaturdiffere se mot utbredelse av varmekabler

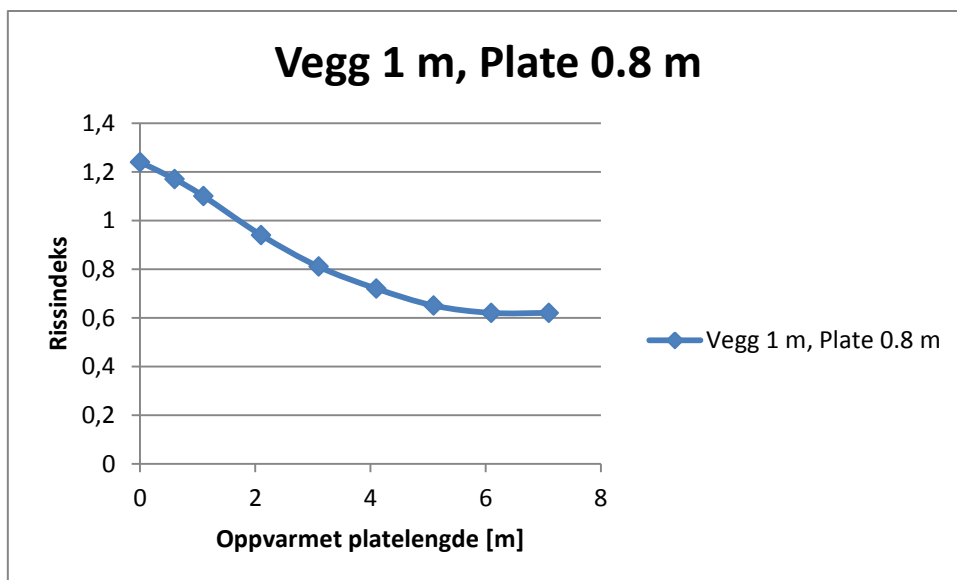


Figur 27 Endring i rissindeks mot utbredelse av varmekabler

For det siste tilfellet så får vi tilnærmet samme resultat som for for overnevnte tilfelle. Se figur 28 og 29.



Figur 26 Endring i temperaturdifferanse mot utbredelse av varmekabler



Figur 27 Endring i rissindeks mot utbredelse av varmekabler

Disse resultatene viser at det er tykkelsen på bunnplatene som hovedsaklig dikterer hvor stort omfang oppvarmingen må ha. En tykkere bunnplate vil ha mer masse noe som gjør den vanskeligere å varme opp. Når tykkelsen på bunnplaten reduseres med 33% (fra 1.2 meter til 0.8 meter), så oppnås det en lavere rissindeks selv om senteravstanden mellom varmekablene er 20 cm mer. I den tykkere platen må varmekablene plasseres nærmere hverandre for at oppvarmingen skal gi god nok effekt.

For alle geometriene så gir plassering av varmekabler langt ut i betongplaten liten effekt, og etter omtrent 6 meter så endrer ikke rissindeksen seg når man plasser ut varmekabler.

Grunnen til dette er at oppvarmingen langt ut i bunnplaten ikke vil ha noen innvirkning på fastholdningssituasjonen mellom veggen og platen. Når bunnplaten varmes opp så vil den ekspandere. Denne utvidelsen av platen gjør at bevegedifferansen mellom vegg og plate blir mindre og opprissingsfaren reduseres. Det å plassere varmekabler langt ut i bunnplaten ser ikke ut til å påvirke hvordan platen utvider seg under veggen.

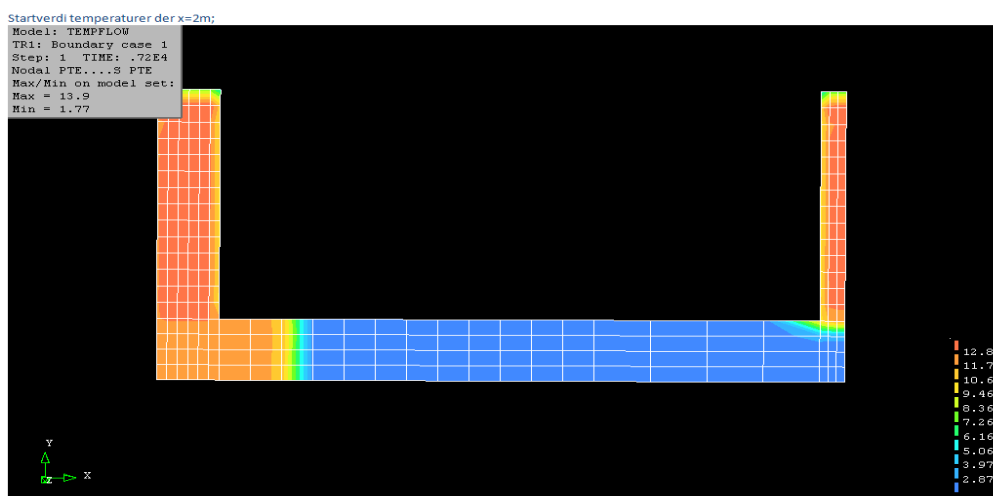
Oppvarming av tilstøtende konstruksjoner er helt klart en effektiv måte å redusere temperaturforskjeller i kaldskjøter, noe som bidrar til å redusere opprissingsfaren. Hvor stort omfang oppvarmingen må ha avhenger av størrelsen på konstruksjonen som må oppvarmes. I denne analysen måtte varmekablene plasseres fire meter ut i platen for den tynneste bunnplaten og omtrent fem meter for den tykkeste. I den tykkeste platen måtte i tillegg varmekablene plassere nærmere hverandre for å gi tilstrekkelig effekt.

En ulempe ved å benytte seg av varmekabler er at det krever energitilførsel utenifra for å oppnå den ønskede effekten. Alt etter hvor stor konstruksjonen som skal varmes opp er. For den tykkeste bunnplaten og tykkeste veggen så går det med 205 kWt/m (per meter innover i konstruksjonen) for å oppnå en rissindeks på 0.73. Tilvarende for den tynneste bunnplaten på den tykkeste veggen går det med 97 kWt/m for å varme opp platen nok til at rissindeksen blir så lav som 0.72. For disse tilfellene så vil man, om alt annet holdes konstant og man reduserer tverrsnittsarealet som skal oppvarmes med 33%, så reduserer man energimengden som behøves med 53% . I større konstruksjoner bør det vurderes å kombinere varmekabler med andre tiltak.

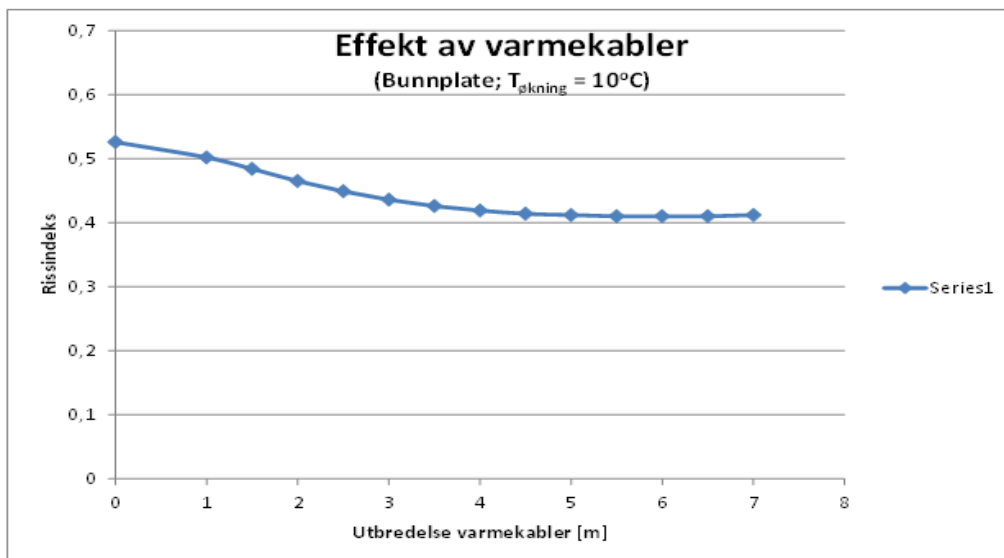
5.4 Sammenligning med resultater fra DIANA

Anja Klausen ved NTNU har sett på effekten av varmekabler ved å benytte seg av 3D-beregningsprogrammet Diana[16]. I denne undersøkelsen ble varmekablene modellert ved å variere starttemperaturen i bunnplaten. Den ferske betongtemperaturen ble her satt til 13°C, temperaturen i bunnplata til 2°C og omgivelsestemperaturen til -7°C. For å simulere varmekablene ble starttemperaturen endre til 12 °C. Hvilken betongtype som ble benyttet kommer ikke fram fra undersøkelsen.

Figur 26 viser simuleringens geometri. I denne figuren er utbredelsen av oppvarmingen 2 meter. Figur 27 viser resultatene fra 3D-analysen.



Figur 28 Geometri i Diana



Figur 29 Resultater fra Diana

Resultatene fra 3D-analysen viser samme tendensen som analysene fra CrackTest COIN. Det er varmekablene nærmest veggen som har størst invirkning på rissindeksen. Rissindeksen synker saktere jo lenger ut bunnplaten oppvarmes før den til slutt flater helt ut. I denne analysen gir en oppvarming lenger ut enn 5.5 meter i platen ingen effekt. Det er samsvarer bra med resultatene fra CrackTest der det ikke var noen effekt av å varme opp mer enn 6 meter inn i platen.

Det er ikke mulig å foreta en helt nøyaktig sammenligning av disse to analysene. Geometrien er ikke helt lik og det er ulike rand- og startbetingelser. En annen viktig forskjell er måten varmekablene er modellert på. I CrackTest-analysen ble varmekablene lagt inn i platen som varmekabler. I DIANA ble varmekablene som nevnt modellert ved å endre starttemperaturen på den modne betongen.

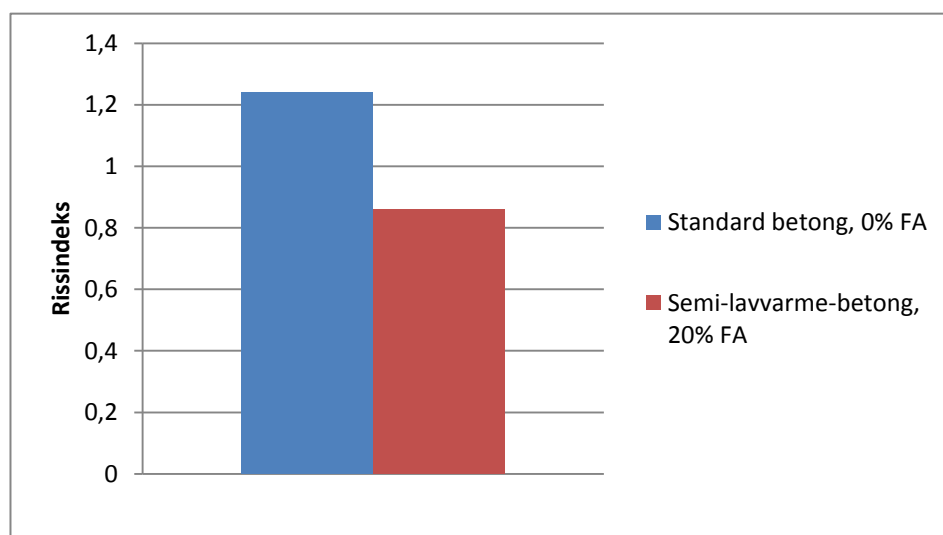
Det er også verdt å nevne at i det tilfellet som ble simulert i Diana så ville det ikke vært behov for varmekabler. Rissindeksen er på ca. 0.52 selv uten oppvarming av bunnplaten. Det ville vært interessant å se hvordan utviklingen hadde vært for et mer ugunstig tilfelle.

5.5 Kominasjon av flyveaske og varmekabler

Som vist tidligere er bruk av varmekabler en effektiv måte å redusere temperaturforskjeller og dermed redusere faren for opprissing som følge av ytre fastholding. Likevel krever bruken av varmekabler tilført energi. Elektrisitetsbehovet kan bli stort dersom det er mye masse som skal varmes opp. På grunn av dette er det kjørt en analyse der bruken av varmekabler kombineres med bruk av flyveaskebetong.

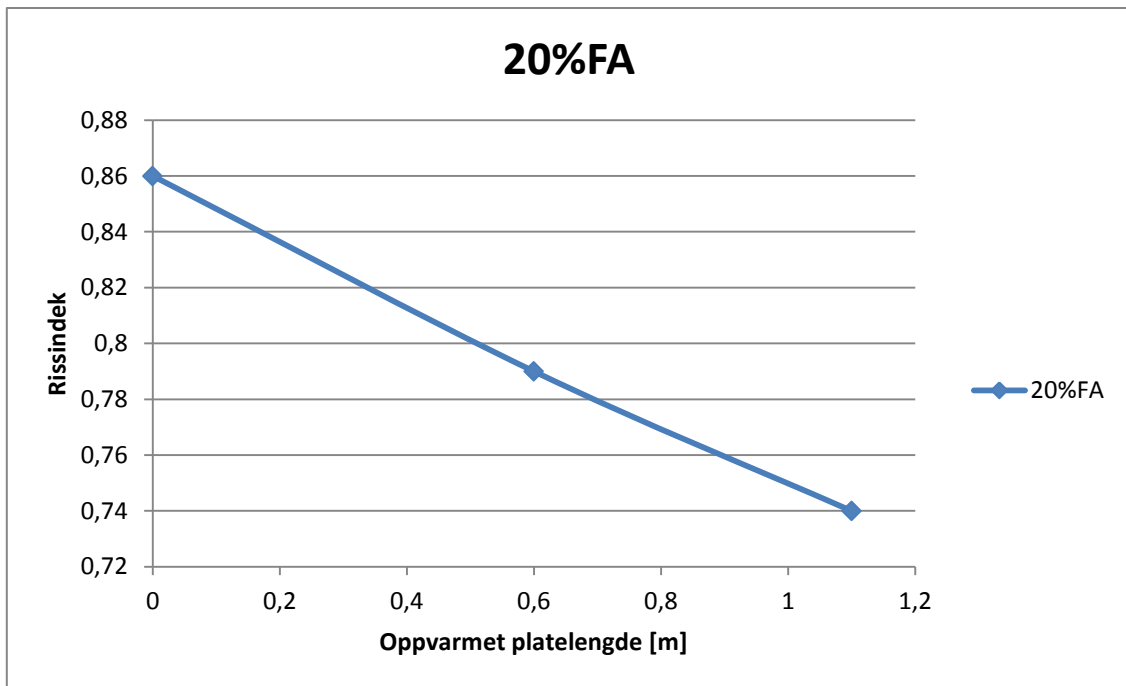
For situasjonen med veggtykkelse og platetykkelse på 0.8 meter, ble det gjennomført en analyse på effekten av å kombinere flyveaske og varmekabler. Alle betingelsene ble satt lik de forrige simuleringene, men den ferske betongen ble endret til semi-lavvarmebetong med et flyveaskeinnhold på 20 %. (gitt som Semi low-heat concrete, 20% FA i CrackTest COIN).

Figur 28 viser hvordan rissindeksen uten varmekabler endret seg når man endret betongtype.



Figur 30 Rissindeks for standard betong og sem-ilavvarmebetong

Å endre betongtype reduserte rissindeksen fra 1.24 til 0.86. Varmekablene ble så plassert ut med senteravstand på 50 cm helt til rissindeksen ble lavere enn 0.75. Resultatene er vist i figur 29 på neste side.



Figur 31 Rissindeks mot ubredelse av varmekabler

Som det er mulig å se fra figuren så er rissindeksen lavere enn 0.75 etter å ha plassert varmekablene kun 1.1 meter ut i platen. Dette oppvarmingstilfellet gir kun et energibehov på 32 kWt/m.

Å kombinere varmekabler med flyveaske er et effektivt tiltak. Flyveasken senker temperaturen i den ferske betongen slik at den tilstøtende konstruksjonen ikke på varmes opp i like stor grad. Dersom det er strenge krav til tidligfastheten til en konstruksjon kan bruk av varmekabler supplere bruken av lavvarmebetong i stede for å øke flyveaskemengden ytterligere.

6 Konklusjon

Analysene viser at dersom alle andre delmaterialer holdes konstant så gir økt flyveaskeinnhold (som erstatning for sement) laver rissindeks. For alle geometrier kom det høyeste flyveaskeinnholdet – 40 % flyveaske – gunstigst ut med tanke på opprissingsfare. Basert på resultatene som er presentert i denne oppgaven ville det for tilfeller der det er strengere krav til tidligfaseegenskapene vært mest fornuftig å benytte seg av 30 % flyveaske, ettersom den betongtypen har gunstigere fasthet i både trykk og strekk.

Tilfellet med 20 % flyveaske kom klart dårligst ut av rissindeksanalysene, men i fra materialdataevalueringen så det kan tyde på at strekkfastheten til denne betongen er underestimert. For å kunne avgjøre dette så må det grundigere laboratorieundersøkelser til.

Bruk av varmekabler for å minske temperaturforskjeller i kaldskjøter er en effektiv måte å redusere faren for opprissing. Resultatene viser at varmekablene gir en effekt på rissindeksen så langt som seks meter ut i platen. Det negative med dette er at en alltid vil være avhengig av energitilførsel. I veldig massive konstruksjoner kan det også bli kostbart å bruke varmekabler ettersom massen som skal varmes opp blir stor.

Varmekabler kan godt brukes til å supplere bruken av lavvarmebetong. Bruken av varmekabler sammen med lavvarmebetong kan være spesielt hensiktsmessig der det er strenge krav til tidligfasthet, noe som setter en grense for hvor mye flyveaske som kan tilsettes.

7 Videre arbeid

Som anbefaling til videre arbeid vil jeg foreslå følgende:

- Gjøre grundige laboratorieundersøkelser angående materialdataen til COIN P3.1-serien. Dersom det viser seg at de materialdata som er tilgjengelig i dag er unøyaktige så bør analysene gjøres om igjen.
- Gjøre samme de samme risikorisiko-analysene i et 3D-basert beregningsprogram. Sammenlign resultatene.
- Undersøke effekten av andre tiltak for å redusere temperaturforskjeller, slik som for eksempel kjølerør i den ferske betongen. Gjerne i kombinasjon med lavvarmebetong og/eller oppvarming av tilstøtende konstruksjon.

Referanser

- [1] S. Smeplass, "Curing technolog," i *Concrete technology 1*, S. Jacobsen, Red., Trondheim, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU, 2003, Chapter 11.
- [2] Ø. Bjøntegaard. Teknologirapport nr 2565, Volumendringer og risstendens i betong. Statens Vegvesen, 2009.
- [3] Ø. Bjøntegaard "Shrinkage, Cracking" i *Concrete Technology 1*, S.Jacobsen, Red., Trondheim, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU, 2003, Chapter 13
- [4] 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*, Trondheim, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU, 2001, pp. 226-230.
- [5] M. Maage, "Practice" i *Concrete Technology 1*, S.Jacobsen, Red., Trondheim, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU, 2008, Chapter 13
- [6] E. J. Sellevold, "Hydration," *Concrete technology 1*, S. Jacobsen, Red., Trondheim, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU, 1990, Chapter 6.
- [7] E. J. Sellevold, "Pozzolana" *Concrete technology 1*, S. Jacobsen, Red., Trondheim, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU, 2008, Chapter 7
- [8] ACI Committee 232 "Use of Fly Ash in Concrete", ACI 232.2R-03, 2004
- [9] Ø. Bjøntegaard, "Basis for and practical approach to stress calculations and crack risk estimation in hardening concrete structures," COIN, Trondheim, 2011.
- [10] Ukjent forfatter, "Mechanical Testing COIN P3.1-series", upublisert COIN-rapport, tilsendt på epost fra Gunrid Kjellmark 11. juni 2013.
- [11] Ukjent forfatter, "TKT 4215 – Concrete Technology 1, Lab exercise 2", NTNU, 2012.
- [12] Standard Norge, «NS 3657:1993 Måling av varmeutvikling,» Standard Norge, 1993.
- [13] O. B. Skjølsvik, "Beregning og evaluering av rissrisiko pga fastholdningseffekter i støpeskjøter", Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU, Trondheim, 2011.
- [14] Tarun R. Naik, Yoon-moon Chun og Rudolph N. Kraus, "Shrinkage of concrete with and without fly ash", department of Civil Engineering and Mechanics College of Engineering and Applied Science, University of Wisconsin-Milwaukee, 2007
- [15] Ø. Bjøntegaard og K. Kjellsen, "Property development and cracking tendency in hardening concrete: Effect of cement type and fly ash content", COIN, Trondheim, 2012,
- [16] A. Klausen, "Utbredelse av varmekabler", tilsendt på epost fra Terje Kanstad, 11 juni 2013

Vedlegg A - Resepter

Blandevolum:	25 liter
Dato:	2013-04-09
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	Seehuus / Kjellmark
Utført av:	

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg	
Norcem Anlegg FA (T 3-11)	368,9	9,223			9,223	
Elkem Microsilica 920-D (A)	18,4	0,461	0	0,000	0,461	
Flyveaske LN 21-02	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
Fritt vann	162,3	4,058		-1,032	3,026	3,324
Absorbent vann	11,9	0,298			0,298	
Årdal 0-2 mm (A-3995)	200,2	5,005	6,9	0,345	5,350	
Årdal 0-8 mm (A-3995)	737,1	18,427	2,9	0,534	18,962	
Årdal 4-8 (A-4003)	273,8	6,845	0,5	0,034	6,879	
Årdal 8-16 mm (A-3995)	611,5	15,288	0,5	0,076	15,364	
	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	
	0	0,000	72	0,000	0,000	
Sika ViscoCrete FB2	2,0	0,051	82	0,042	0,051	
Tss3	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
Tss4	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
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					
Utbredelsesmål					
Luft					
Densitet					

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
TSTM rigg					
Dilatasjonsrigg					
Herdeksse					
Referanseterninger (3 stk)					
Logg start					

Prosj./id.:	Basis Anlegg FA + 10 % FA - COIN P3.1 Masteroppgave Gøran
--------------------	--

Blandevolum:	25 liter
Dato:	2013-04-09
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	Seehuus / Kjellmark
Utført av:	

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg	
Norcem Anlegg FA (TF 3-11)	327,4	8,185			8,185	
Elkem Microsilica 920-D (A-	18,2	0,454	0	0,000	0,454	
Flyveaske LN 21-02	36,4	0,909	0	0,000	0,909	
Fritt vann	160,0	4,001		-1,027	2,974	3,272
Absorbert vann	11,9	0,298			0,298	
Årdal 0-2 mm (A-3995)	200,2	5,005	6,9	0,345	5,350	
Årdal 0-8 mm (A-3995)	737,1	18,427	2,9	0,534	18,962	
Årdal 4-8 (A-4003)	273,8	6,845	0,5	0,034	6,879	
Årdal 8-16 mm (A-3995)	611,5	15,288	0,5	0,076	15,364	
	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	
	0,0	0,000	72	0,000	0,000	
Sika ViscoCrete FB2	1,8	0,045	82	0,037	0,045	
Tss3	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
Tss4	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
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					
Utbredelsesmål					
Luft					
Densitet					

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
TSTM rigg					
Dilatasjonsrigg					
Herdekske					
Referanseterninger (3 stk)					
Logg start					

Proporsjonering av betong

Prosj.id.: Basis Anlegg FA + 20 % FA - COIN P3.1 Masteroppgave Gøran



© 2004-12-02:rr

Initialparametre	Verdi	k
v/(c+Σkp)	0,40	-
s/c (silikastøv) [%]	6,2	2,00
f/c (filler, flyveaske) [%]	25,0	1,00
Luftinnhold [%]	2,0	-
Tilsetningsstoff	% av C	% av S
	0,00	0,00
Sika ViscoCrete FB2	0,87	0,00
Tss3	0,00	0,00
Tss4	0,00	0,00
Fiber	Vol %	
Stålfiber	0,0	
PP-fiber	0,0	
Matriks	Verdi	
Ønsket matriksvolum [l/m ³]	326	
Oppnådd matriksvolum** [l/m ³]	326	
Volum sementlim [l/m ³]	295	
v/p	0,34	



Utført av	Firma	Dato
Kjellmark og Kjellsen	SINTEF Byggforsk	09.04.2013

Materiale	Densitet* [kg/m ³]	Tørrestoff [%]	Alkalier [%]	Klorider [%]
Norcem Anlegg FA (T3-11/A-3718)	2980	-	0,00	0,00
Elkem Microsilica 920-D	2200	100	0,00	0,00
Flyveaske LN 21-02	2220	100	0,00	0,00
	0	1100	28	0,00
Sika ViscoCrete FB2	1040	18	0,00	0,00
Tss3	1200	0	0,00	0,00
Tss4	1000	0	0,00	0,00
Stålfiber	7800	-	-	-
PP-fiber	1000	-	-	-

*For sement, pozzolaner og fillere oppgis densitet av tørrestoff. For TSS oppgis våt densitet.

** Tilpass matriksvolum; Ctrl M

*** Nullstill korreksjon; Ctrl K

Proporsjonert betong		Ønsket Oppnådd		Fersk betong		Volumkorreksjon***		
Materialer	kg/m ³	kg	kg	Egenskap		korr.luft	korr.dens	Korrigert
Norcem Anlegg FA (T3-11/A-3718)	287,0	7,2	7,2	Ønsket volum	25,0	0,0	0,0	287,0
Elkem Microsilica 920-D	17,8	0,4	0,4	Innveid volum (l)	25,0	0,0	0,0	17,8
Flyveaske LN 21-02	71,8	1,8	1,8	Luftinnhold (%)	2,0	0,0	0,0	71,8
Fritt vann	157,7	3,9	3,9	Målt betongdensitet (kg/m ³)	2369	0,0	0,0	157,7
Absorbert vann	11,9	0,3	0,3	Effektivt v/(c+Σkp)	0,400	0,0	0,0	11,9
Årdal 0-2 mm (A-3995)	200,2	5,0	5,0			0,0	0,0	200,2
Årdal 0-8 mm (A-3995)	737,1	18,4	18,4			0,0	0,0	737,1
Årdal 4-8 (A-4003)	273,8	6,8	6,8			0,0	0,0	273,8
Årdal 8-16 mm (A-3995)	611,5	15,3	15,3			0,0	0,0	611,5
	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/m ³]	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	0,00	0,00	0,00			0,0	0,0	0,00
Sika ViscoCrete FB2	2,50	0,06	0,06			0,0	0,0	2,50
Tss3	0,00	0,00	0,00			0,0	0,0	0,00
Tss4	0,00	0,00	0,00			0,0	0,0	0,00
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 ³)	2369					0,0	0,0	2369

volum ok

Prosj./id.:

**Basis Anlegg FA + 20 % FA - COIN P3.1
Masteroppgave Gøran**

Blandevolum:	25 liter
Dato:	2013-04-09
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	Seehuus / Kjellmark
Utført av:	

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg	
Norcem Anlegg FA (T3-11/	287,0	7,175			7,175	
Elkem Microsilica 920-D	17,8	0,445	0	0,000	0,445	
Flyveaske LN 21-02	71,8	1,794	0	0,000	1,794	
Fritt vann	157,7	3,943		-1,042	2,902	3,200
Absorbert vann	11,9	0,298			0,298	
Årdal 0-2 mm (A-3995)	200,2	5,005	6,9	0,345	5,350	
Årdal 0-8 mm (A-3995)	737,1	18,427	2,9	0,534	18,962	
Årdal 4-8 (A-4003)	273,8	6,845	0,5	0,034	6,879	
Årdal 8-16 mm (A-3995)	611,5	15,288	0,5	0,076	15,364	
	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	
	0	0,000	72	0,000	0,000	
Sika ViscoCrete FB2	2,5	0,062	82	0,051	0,062	
Tss3	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
Tss4	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
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					
Utbredelsesmål					
Luft					
Densitet					

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
TSTM rigg					
Dilatasjonsrigg					
Herdekasse					
Referanseterninger					
Logg start					

Vedlegg B – Herdekasseark

20 % FA:

Concrete parameters

Temp. trans. coeff.	0.0195
Density	2390
Heat capacity (fresh)	1.05
Heat capacity (hardened)	0.98
Cement content	387
Set time	9
A - set time	31988
B - set time	225
A - hydration	31988
B - hydration	225
Adia. start temperature	20

Temp. trans. coeff.

dQ/dm	0.01
m ₀	300
m _∞	350

Heat function

m-limit	300
Q _∞	232
τ	19.16
α	1.07
R ²	0.9876
ΣΔQ	17520

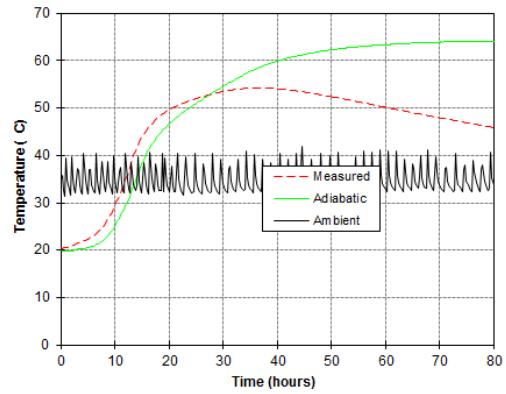
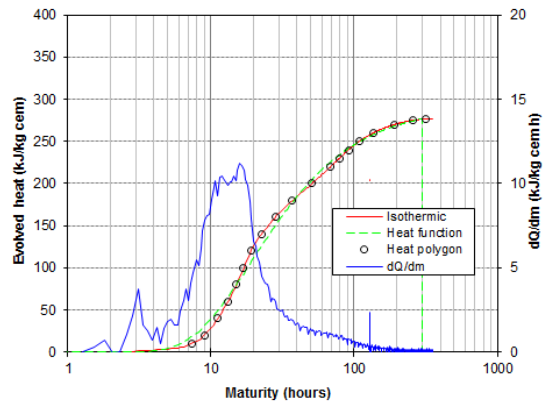
Heat polygon

Reference heat [kJ/kg cem]	Corresp. maturity [h]
0	-0.3
10	7.3
20	9.0
40	11.2
60	13.2
80	15.1
100	16.9
120	19.1
140	22.5
160	28.1
180	37.1
200	50.8
220	68.4
230	79.0
240	91.7
250	109.1
260	137.2
270	190.6
275	257.7
277	318.0

Adapt the temperature transmission coefficient: <Ctrl> t
Adapt the heat function: <Ctrl> h



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



Project

Name	Worksheet development
Test id	Random data
Perf. by	Sverre Smeplass, Skanska Norge AS
Date	06.02.2012

30 % FA:

Concrete parameters

Temp. trans. coeff.	0,0198
Density	2380
Heat capacity (fresh)	1,05
Heat capacity (hardened)	0,98
Cement content	382
Set time	9,8
A - set time	33655
B - set time	307
A - hydration	33655
B - hydration	307
Adia. start temperature	20

Temp. trans. coeff

dQ/dm	0,01
m>	280
m<	330

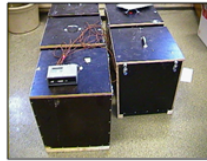
Heat function

m-limit	300
Q _∞	266
τ	20,98
α	1,05
R ²	0,9831
ΣΔQ	7026

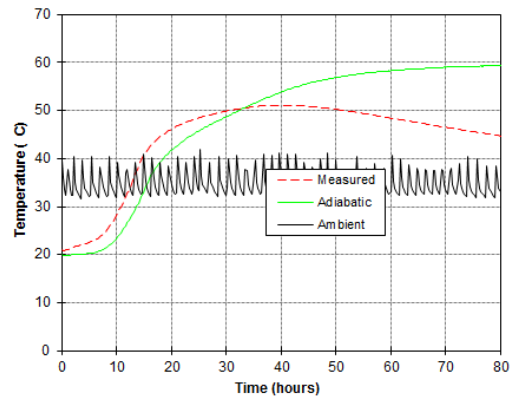
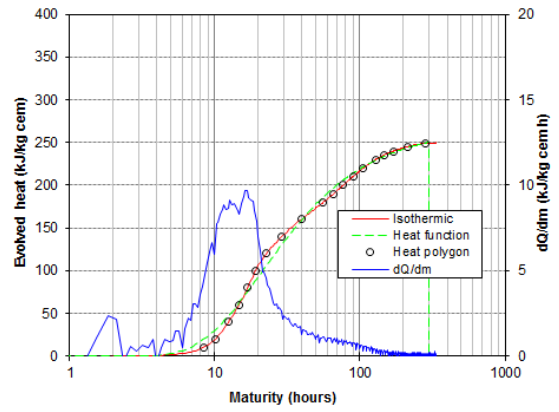
Heat polygon

Reference heat [kJ/kg cem]	Corresp maturity [h]
0	-0,3
10	8,4
20	10,1
40	12,4
60	14,7
80	16,9
100	19,1
120	22,7
140	29,0
160	39,5
180	55,9
190	65,9
200	77,0
210	89,6
220	105,5
230	128,4
235	146,1
240	170,8
245	212,0
249	284,0

Adapt the temperature transmission coefficient: <Ctrl> t
Adapt the heat function: <Ctrl> h



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



Project

Name	Worksheet development
Test id	Random data
Perf. by	Sverre Smeplass, Skanska Norge AS
Date	06.02.2012

40 % FA:

Concrete parameters	
Temp. trans. coeff.	0,0193
Density	2370
Heat capacity (fresh)	1,05
Heat capacity (hardened)	0,99
Cement content	376
Set time	11
A - set time	36806
B - set time	65
A - hydration	36806
B - hydration	65
Adia. start temperature	20

Temp. trans. coeff.	
dQ/dm	0,01
m	270
m'	320

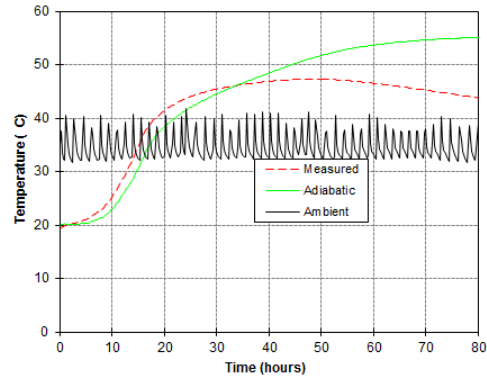
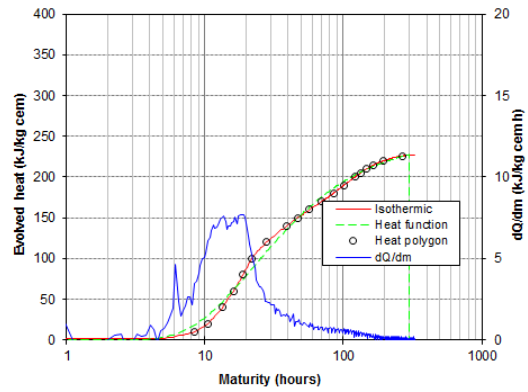
Heat function	
m-limit	300
Q _∞	248
τ	22,84
α	0,95
R ²	0,9875
ΣΔQ	7191

Heat polygon	
Reference heat [kJ/kg cem]	Concrete maturity [h]
0	0,0
10	8,4
20	10,5
40	13,3
60	16,1
80	18,8
100	21,5
120	28,0
140	38,9
150	47,0
160	57,1
170	69,7
180	84,7
190	101,2
200	120,9
205	132,8
210	146,8
215	165,8
220	195,5
226	265,5

Adapt the temperature transmission coefficient: <Ctr> t
Adapt the heat function: <Ctr> h



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



Project	
Name	Worksheet development
Test id	Random data
Perf. by	Sverre Smeplass, Skanska Norge AS
Date	06.02.2012

Vedlegg C – Tilsendt Materialdata

Norcem Anlegg FA – COIN P3.1 serie

Referanse:

Resept

Materiala	[kg/m ³]
Norcem Anlegg FA	366,9
Silika	18,3
Totalt vanninnhold	173,4
Årdal sand 0-8 mm	939,5
Årdal stein 8-16 mm	887,5
TSS	2,02
Air [%] / Density [kg/m ³]	2,0 / 2400

Diverse inputparametere

Aktiveringsenergi	
Parameter A	31988 J/mol
Parameter B	225 J/(mol · °C)
Varmeutvikling og termisk dilatasjon	
Densitet	2390 kg/m ³
Varmekapasitet	1,050 kJ/(kg · °C)
Termisk utvidelseskoeffisient (α_T)	9,2 · 10 ⁻⁶ / °C

Varmeutvikling

Modenhet [timer]	Varme [kJ/kg c+pozz]
0,0	0
4,9	10
6,7	20
8,9	40
10,7	60
12,6	80
14,4	100
16,2	120
18,8	140
23,2	160
30,2	180
41,2	200
56,2	220
74,9	240
112,5	260
268,9	280
442,0	300
449,4	305
456,8	310
461,2	313

Autogen deformasjon

Modenhet [timer]	Autogen deformasjon [10 ⁻⁶]
0	0
11	-7,34
12	-6,56
17	-20,0
22	9,68
26	9,70
42	11,6
72	14,6
120	16,4
168	18,0
336	36,2
500	49,7
672	69,5

Modellparametere for trykkfasthet

f_{c28} [MPa]	s	t_0 [hours]	t_A [hours]	n_A
73,15	0,233	8,98	9,48	1,80

Modellparametere for strekkfasthet

f_{t28} [MPa]	n_t
3,29	0,510

Modellparametere for E-modul

E_{28} [GPa]	n_E
30,55	0,334

Norcem Anlegg FA + 10 % FA– COIN P3.1 serie

Referanse:

Resept

Material	[kg/m ³]
Norcem Anlegg FA	325,6
Silika	18,1
Flygeaske	36,2
Totalt vanninnhold	171,2
Årdal sand 0-8 mm	939,5
Årdal stein 8-16 mm	887,5
TSS	1,79
Air [%] / Density [kg/m ³]	2,0 / 2400

Diverse inputparametere

Aktiveringsenergi	
Parameter A	33655 J/mol
Parameter B	307 J/(mol · °C)
Varmeutvikling og termisk dilatasjon	
Densitet	2380 kg/m ³
Varmekapasitet	1,048 kJ/(kg · °C)
Termisk utvidelseskoeffisient (α_T)	$9,2 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Varmeutvikling

Modenhet [timer]	Varme [kJ/kg c+pozz]
0,0	0
7,1	10
8,8	20
10,7	40
12,2	60
15,0	80
18,0	100
20,1	120
22,7	140
32,0	160
43,1	180
55,4	200
74,5	220
110,7	240
222,9	260
445,2	280
477,0	300
484,9	305
492,9	310
497,6	313

Autogen deformasjon

Modenhet [timer]	Autogen deformasjon [10 ⁻⁶]
0	0
11	2,53
12	2,43
17	3,06
22	1,43
26	0,95
42	10,5
72	14,0
120	11,8
168	10,8
336	15,0
500	28,4
672	33,4

Mekaniske egenskaper

Prøvedata tilpasset etter MC-ligningen (1)

Modellparametere for trykkfasthet

f_{c28} [MPa]	s	t_0 [hours]	t_A [hours]	n_A
70,77	0,256	8,00	8,50	1,80

Modellparametere for strekkfasthet

f_{t28} [MPa]	n_t
3,28	0,610

Modellparametere for E-modul

E_{28} [GPa]	n_E
27,70	0,278

Norcem Anlegg FA + 20 % FA – COIN P3.1 serie

Referanse:

Resept

Material	[kg/m ³]
Norcem Anlegg FA	285,4
Silika	17,7
Flygeaske	71,4
Totalt vanninnhold	168,9
Årdal sand 0-8 mm	939,5
Årdal stein 8-16 mm	887,5
TSS	2,48
Air [%] / Density [kg/m ³]	2,0 / 2400

Diverse inputparametere

Aktiveringsenergi	
Parameter A	36806 J/mol
Parameter B	65 J/(mol · °C)
Varmeutvikling og termisk dilatasjon	
Densitet	2370 kg/m ³
Varmekapasitet	1,046 kJ/(kg · °C)
Termisk utvidelseskoeffisient (α_T)	$9,2 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Varmeutvikling

Modenhets [timer]	Varme [kJ/kg c+pozz]
0,0	0
7,4	10
9,8	20
12,2	40
15,0	60
18,0	80
21,5	100
22,6	120
36,0	140
44,3	160
48,2	180
95,8	200
109,8	220
205,2	240
451,6	260
503,5	280
539,5	300
548,5	305
557,5	310
562,9	313

Autogen deformasjon

Modenhets [timer]	Autogen deformasjon [10 ⁻⁶]
0	0
11	-3,93
12	-6,21
17	-9,31
22	-10,8
26	-8,30
42	5,12
72	8,88
120	-5,27
336	-3,86
396	16,5
500	9,92
672	19,4

Modellparametere for trykkfasthet

f_{c28} [MPa]	s	t_0 [hours]	t_A [hours]	n_A
61,27	0,298	8,00	8,50	1,80

Modellparametere for strekkfasthet

f_{t28} [MPa]	n_t
3,05	0,611

Modellparametere for E-modul

E_{28} [GPa]	n_E
27,80	0,318