

# Evaluering av aktuelle tiltak for å redusere faren for termisk opprissing i massive damkonstruksjoner i betong

**Eivind Hagen**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Amund Bruland, BAT

Medveileder: Sverre Smeplass, Skanska Norge AS

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for bygg, anlegg og transport





Oppgavens tittel: Evaluering av aktuelle tiltak for å redusere faren for termisk opprissing i massive damkonstruksjoner i betong.	Dato: 11.6.2012			
	Antall sider (inkl. vedlegg): 159			
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave	
Navn: Eivind Hagen				
Faglærer/veileder: Amund Bruland/ Sverre Smeplass				
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Sverre Smeplass				

Ekstrakt:

Oppgaven tar for seg opprissing i massive damkonstruksjoner i betong. Utgangspunktet for oppgaven er Skardfosdammen som Skanska skal bygge ved Rjukan i Tinn kommune, i Telemark.

I massive betongkonstruksjoner med store betongvolum, vil termisk induerte spenninger utgjøre en stor del av spenningsbildet i konstruksjonen. Dette kan føre til opprissing. Oppgaven ser på tiltak som kan iverksettes for å hindre eller redusere slik opprissing. Disse tiltakene er:

1. Redusere herdevarme ved å tilsette flyveaske i betong.
2. Redusere herdevarme ved å endre sementinnhold og hulrom i tilslag.
3. Redusere fersk betongtemperatur ved å benytte knust is under blanding av betong.
4. Redusere fastholding ved å legge inn et sjikt mellom konstruksjonen og omkringliggende flater.

Effekten av de fire tiltakene er funnet ved å simulere tiltakene i spesielle regneprogrammer. Programmene som er benyttet er CrackTeSt COIN og iDIANA. I tillegg er CrackTeSt COIN sammenliknet med regneprogrammet 4C Temp&Stress. Kostnaden av tiltakene er også anslått der dette har vært mulig.

Målet med oppgaven er å gi svar på hvor mye tiltakene kan endre rissindeksen og betongens herdetemperatur.

Stikkord:

1. Herdeteknologi
2. Termisk opprissing
3. Rissindeks
4. Massive betongkonstruksjoner

\_\_\_\_\_  
Signatur





## Forord

Denne masteroppgaven er besvarelsen i faget TBA4935 ANLEGG- OG PRODUKSJONSTEKNIKK VÅR 2012 på Institutt for bygg, anlegg og transport ved NTNU i Trondheim, våren 2012. Oppgaven er skrevet og utarbeidet som et selvstudium, med løpende veiledning. Masteroppgaven er skrevet delvis på instituttet, og delvis på Skanskas byggeplass ved Rjukan i Tinn kommune i Telemark. Faglærer ved Institutt for bygg, anlegg og transport ved NTNU er Prof. Amund Bruland. Oppgaven er skrevet for Skanska, med Prof. II Sverre Smeplass som faglig kontaktperson og veileder.

Oppgaven er knyttet opp mot et av Skanskas anleggsprosjekt ved Rjukan i Tinn kommune i Telemark. Prosjektet er en del av en større oppgradering av Rjukan- strengen i regi av Norsk Hydro. Denne oppgaven skal svare på enkelte produksjonstekniske problemstillinger rundt oppføringen av Skardfosdammen.

Jeg vil gjerne takke Prof. II Sverre Smeplass for god og konstruktiv veiledning. Smeplass har vært hjelpsom og positiv under hele prosessen, i tillegg til å dele sin faglige kompetanse innen betongteknologi. Andre personer jeg gjerne vil takke er Oliver Berget Skjølvik hos Skanska, for god hjelp med beregningsprogrammer og faglige løsninger. Stor takk til Jan Arve Øverli, førsteamanuensis ved Institutt for konstruksjonsteknikk, for god hjelp med simuleringer i dataprogrammet iDIANA.

I tillegg vil jeg takke de ansatte ved Skanskas anleggsprosjekt på Krokan ved Rjukan. Takk for god informasjon om prosjektet, og hyggelig dialog. En stor takk rettes til Sintef COIN, Skanska og NCC for tilgang til informasjon om betong med flyveaske.

Takk til medstudentene på 2-276 for godt arbeidsmiljø, og trivelige arbeidsdager.

Trondheim, 11.6.2012

---

Eivind Hagen



## Sammendrag

Oppgaven tar for seg opprissing av massive damkonstruksjoner i betong. Utgangspunktet for oppgaven er Skardfosdammen som Skanska skal bygge ved Rjukan i Tinn kommune i Telemark. Her skal Skanska rive den gamle dammen, og bygge en ny betongdam. Den nye dammen blir forholdsvis stor, og er estimert til omtrent 25 000 m<sup>3</sup> betong.

I massive betongkonstruksjoner med store betongvolum, vil termisk induuerte spenninger utgjøre en stor del av spenningsbildet i konstruksjonen. Slike spenninger oppstår på grunn av høye temperaturer i den herdende betongen. Opprissing grunnet ytre fastholding er spesielt interessant. Oppgaven ser på noen tiltak som kan iverksettes for å hindre eller redusere slik opprissing. Målet med oppgaven er å gi svar på hvor mye tiltakene kan endre rissindeksen og betongens maksimaltemperatur.

Disse tiltakene er:

1. Redusere herdevarme ved å tilsette flyveaske i betong.
2. Redusere herdevarme ved å endre sementinnhold og hulrom i tilslag.
3. Redusere fersk betongtemperatur ved å benytte knust is under blanding av betong.
4. Redusere fastholding ved å legge inn et sjikt mellom konstruksjonen og omkringliggende flater.

I tillegg nevner oppgaven tre andre tiltak for å hindre opprissing grunnet termisk induuerte spenninger.

Effekten av de fire tiltakene er funnet ved å simulere tiltakene i spesielle regneprogrammer. Programmene som er benyttet er CrackTeSt COIN og iDIANA. I tillegg er CrackTeSt COIN sammenliknet med regneprogrammet 4C Temp&Stress. Kostnaden av tiltakene er også anslått der dette har vært mulig.

De fire nevnte tiltakene gir en reduksjon i både rissindeks og maksimaltemperatur i konstruksjonen. Ikke alle tiltakene er like enkle å gjennomføre, og det må kanskje brukes en kombinasjon av flere tiltak for å oppnå ønsket resultat.



## English summary

The main subject of this thesis is the cracking of concrete in massive dams due to restraint and temperature dilatation in. The basis for this thesis is the construction of the Skardfoss dam near Rjukan in Tinn municipality in Telemark in Norway. At Skardfoss, Skanska will build a new concrete dam downstream of the existing dam. The new dam will be large, and is estimated to contain about 25 000 m<sup>3</sup> of concrete.

In massive concrete structures, thermally induced stresses constitute a large portion of the tensions within the structure. Such tensions are caused by high temperatures in the curing concrete. In this thesis, cracking due to external restraint and high temperatures in the structure are of interest. Furthermore the thesis looks at some measures to reduce such cracking. The aim of this thesis is to determine the effects of the measures to reduce thermally induced stresses in the structure.

The measures are:

1. Reducing the curing temperature by adding fly ash.
2. Reducing the curing temperature by changing the voids in the aggregate and the content of cement.
3. Reducing the temperature of fresh concrete by using crushed ice during the mixing.
4. Reducing the degree of restraint by adding a material layer between the structure and surrounding surfaces.

In addition, three other measures that can prevent thermally induced stresses in massive concrete structures are also mentioned.

The effects of the four measures are found by finite element simulations. The programs used are CrackTeSt COIN and iDIANA. In addition, the simulation program CrackTeSt COIN is compared with 4C Temp&Stress.

The four above-mentioned measures provide a reduction in both crack- index and the maximum temperature in the structure. A combination of several measures may be needed to achieve the desired result.



## **Innhold**

1.	Innledning og hensikt.....	1
1.1.	Innledning.....	1
1.2.	Hensikt med oppgaven .....	1
1.3.	Valg av inputdata.....	2
1.4.	Begrensinger ved oppgaven.....	2
1.5.	Oppbygning av oppgaven.....	2
2.	Teorigrunnlag.....	3
2.1.	Innledning.....	3
2.2.	Definisjoner .....	3
2.3.	Herdeteknologi .....	5
2.3.1.	Varmeutvikling og termisk utvidelse av betong .....	6
2.3.2.	Hastighetsfunksjon og aktiveringsenergi .....	7
2.3.3.	Modenhetsprinsippet .....	8
2.3.4.	Styrkeutvikling .....	9
2.3.5.	Varmeutvikling.....	9
2.3.6.	Svensk modell for betongens egenskaper .....	10
2.4.	Fastholding .....	12
2.4.1.	Indre fastholdings .....	12
2.4.2.	Ytre fastholding.....	13
2.5.	Flyveaske i betong .....	15
3.	Beregningsprogrammer.....	17
3.1.	Innledning.....	17
3.2.	4C Temp&Stress.....	17
3.3.	CrackTeSt COIN .....	18
3.4.	Viktige forskjeller.....	18
3.4.1.	Svensk og dansk beregningsmodell .....	18
3.4.2.	Kryp.....	18
3.5.	Resultatsammenlikning .....	20
3.5.1.	Resultater fra simuleringene.....	22
4.	Massiv betongdam på Skardfoss.....	27
4.1.	Innledning.....	27

4.2.	Betong og logistikk.....	28
4.3.	Simulering av rissindeks og temperatur .....	31
4.3.1.	Simuleringsmodell og parametere.....	31
4.3.2.	Resultater.....	33
5.	Tiltak for å begrense opprissing.....	37
5.1.	Tiltak 1: Flyveaske i betong .....	39
5.1.1.	Endring av betongparametere og andel flyveaske.....	39
5.1.2.	Simulering av rissindeks og temperatur .....	44
5.2.	Tiltak 2: Hulrom i tilslag og sementinnhold i betong.....	47
5.2.1.	Tilslagsstørrelser i andre massive betongdammer .....	48
5.2.2.	Beregning av hulrom og sementreduksjon.....	49
5.2.3.	Simulering av rissindeks og temperatur .....	51
5.3.	Tiltak 3: Knust is i betongen ved blanding.....	53
5.3.1.	Enkel beregning av nødvendig mengde is.....	53
5.3.2.	Simulering av rissindeks og temperatur .....	56
5.4.	Tiltak 4: Sjikt mellom fjell og betong .....	59
5.4.1.	Anvendelser og bruksområder.....	60
5.4.2.	Simulering av sjiktets effekt.....	61
6.	Kombinasjon av tiltak .....	69
7.	Konklusjon.....	71
8.	Anbefalinger til videre arbeider .....	73
	Referanser.....	75
	Vedlegg .....	77
A.	Oppgavetekst .....	79
B.	Plantegninger for Krokandammen .....	83
C.	Plantegninger for Skardfossdammen.....	85
D.	Dokumentasjon fra 4C Packing .....	89
E.	Endring av sementmengde i betong med redusert matriksvolum .....	93
F.	Betongdata for betonger med flyveaske .....	97
G.	Low heat concrete (40 % fly ash) .....	117
H.	Rapport fra CrackTeSt COIN .....	123



## Figurligste

Figur 1: Betongens faser (1).....	6
Figur 2: Temperaturfølsomhet (1).....	8
Figur 3: Faktorer som påvirker opprissing i herdefasen (1).....	12
Figur 4: Opprissing grunnet indre fastholding .....	13
Figur 5: Betongens faser og ytre fastholding .....	14
Figur 6: Fastholdingsgrad.....	14
Figur 7: Krypmodell fra 4C Temp&Stress.....	19
Figur 8: Krypmodell fra CrackTeSt COIN .....	19
Figur 9: Simulert støpeseksjon .....	20
Figur 10: Snitt, Krokandammen.....	21
Figur 11: Geometri og FEM- nett fra CrackTeSt COIN .....	21
Figur 12: Geometri og FEM- nett fra 4C Temp&Stress .....	22
Figur 13: Temperaturforløp, 4C Temp&Stress .....	22
Figur 14: Temperaturforløp, CrackTeSt COIN .....	23
Figur 15: Rissindeks, 4C Temp&Stress .....	24
Figur 16: Rissindeks, CrackTeSt COIN .....	24
Figur 17: Sammenlikning av rissindeks i begge programmene i samme punkt.....	25
Figur 18: Plantegning Skardfoss .....	27
Figur 19: Plassering av Skardfosdammen .....	28
Figur 20: God lagring av tilslag på anleggsplass .....	30
Figur 21: Geometri og flater.....	32
Figur 22: FEM- nett.....	32
Figur 23: Plantegning av simulert snitt .....	33
Figur 24: Temperatur .....	34
Figur 25: Rissindeks.....	34
Figur 26: Total varme.....	40
Figur 27: E- modul .....	41
Figur 28: Trykkfasthet.....	42
Figur 29: Strekkfasthet .....	42
Figur 30: Aktiveringsenergi, parameter A .....	43
Figur 31: Aktiveringsenergi, parameter B.....	43
Figur 32: Temperatur .....	44
Figur 33: Rissindeks.....	44
Figur 34: Temperatur og innhold av flyveaske .....	45
Figur 35: Rissindeks og innhold av flyveaske .....	46
Figur 36: Hulrom med én gradering.....	47
Figur 37: Hulrom med to graderinger .....	47
Figur 38: Førrevassdammen.....	48
Figur 39: Synk og matriksvolum (1).....	50
Figur 40: Temperatur .....	51

Figur 41: Rissindeks.....	52
Figur 42: Fersk betongtemperatur og andel is.....	55
Figur 43: Temperatur .....	56
Figur 44: Rissindeks.....	57
Figur 45: Maksimal herdetemperatur og fersk betongtemperatur.....	58
Figur 46: Rissindeks og fersk betongtemperatur.....	58
Figur 47: Prinsippskisse for bruk ved støp av betongdam .....	60
Figur 48: Prinsippskisse for bruk i tunnel .....	61
Figur 49: FEM- nett og geometri .....	62
Figur 50: Simulering 1 .....	63
Figur 51: Simulering 2 .....	64
Figur 52: Simulering 3 .....	65
Figur 53: Effekt av sjiktets tykkelse.....	66
Figur 54: Reduksjon av rissindeks og tykkelse av sjikt .....	67

## Tabell- liste

Tabell 1: Forskjeller mellom modellene .....	20
Tabell 2: Oppsummering.....	25
Tabell 3: Behov for tilrettelegging .....	29
Tabell 4: Lagerareal for tilslag .....	30
Tabell 5: Betongdata .....	31
Tabell 6: Modellparametere .....	31
Tabell 7: Endring av betongparametere med økende andel flyveaske.....	39
Tabell 8: Oppsummering av resultater .....	45
Tabell 9: Tetthet og hulrom for tilslagsfraksjoner .....	49
Tabell 10: Beregnet hulrom i sammensatt tilslag.....	49
Tabell 11: Endring i hulrom for sammensatt tilslag.....	49
Tabell 12: Beregnet sementinnhold.....	51
Tabell 13: Oppsummering av resultater .....	52
Tabell 14: Parametere for beregning av fersk betongtemperatur .....	54
Tabell 15: Fersk betongtemperatur med økende mengde is.....	55
Tabell 16: Oppsummering av resultater .....	57
Tabell 17: Modellparametere .....	62
Tabell 18: Oppsummering.....	65



## Formel- liste

Formel 1: v/c- tall.....	3
Formel 2: v/b- tall.....	3
Formel 3: Andel flyveaske, Statens Vegvesen.....	4
Formel 4: Andel flyveaske .....	4
Formel 5. Rissindeks .....	4
Formel 6: Kryp .....	5
Formel 7: Varmeutvikling i betong.....	6
Formel 8: Termisk utvidelse .....	7
Formel 9: Betongens hastighetsfunksjon .....	7
Formel 10: Modenhet .....	8
Formel 11: Modenhet som sum.....	8
Formel 12: Fasthetsutvikling.....	9
Formel 13: Varmeutvikling.....	9
Formel 14: Aktiveringsenergi .....	10
Formel 15: Modenhet .....	10
Formel 16: Modenhet, forenklet.....	11
Formel 17: Fasthetsutvikling.....	11
Formel 18: Varmeutvikling.....	11
Formel 19: Sement- og pozzolanreaksjon .....	15
Formel 20: Redusert matriksmengde .....	50
Formel 21: Fersk betongtemperatur .....	54



# **1. Innledning og hensikt**

## **1.1. Innledning**

Herdeteknologi handler om å bruke betongens temperatur og herdetid for å si noe om dens egenskaper. Uttrykket “herdeteknologi” ble introdusert av danskene Freiesleben- Hansen og Pedersen på slutten av 70- tallet. Uttrykket ble benyttet om betongens egenskapsutvikling som funksjon av tid. Freiesleben- Hansen og Pedersen utviklet en metode for å bestemme betongens fasthet, basert på herdetemperatur og tid. Dette konseptet har fått navnet modenhet i Norge. Modenhet for betong har mye til felles med “døgngrader”, som benyttes ved modning av kjøtt. Modenhet kan benyttes til å kalkulere blant annet betongens strekk- og trykkfasthet.

Når sement og vann reagerer, utvikles det betydelige mengder varme. Dermed oppstår det temperaturgradienter mellom konstruksjonens overflater og kjerne. Gradientene fører til temperaturinduserte spenninger i konstruksjonen. Vi vil alltid ha en underliggende problematikk knyttet til termisk induserte spenninger i herdende betongkonstruksjoner.

Herdende betong utvikler varme, og vil utvide seg. Når konstruksjonen avkjøles, vil den trekke seg sammen. Siden konstruksjonen nå har høy stivhet, vil den ikke kunne trekke seg sammen uhindret. Selve konstruksjonen er stiv, og betongen er kanskje fastholdt av tilstøtende konstruksjoner. Temperaturinduserte spenninger i konstruksjonen vil ofte være et stort problem. Slike spenninger kan føre til opprissing.

Ved å simulere herdeforløpet til en betongkonstruksjon kan spenningene i betongen estimeres. Dette er til stor hjelp, da man kan avgjøre om det er nødvendig å gjennomføre ekstraordinære tiltak for å hindre opprissing. Med dagens datateknologi finnes det mange regneprogrammer som kan estimere dette. Bruk av slike programmer gir et godt grunnlag for å fatte avgjørelser om tiltak mot opprissing bør iverksettes. Simuleringer vil også gi informasjon om effekten av de tiltak som velges. Dermed kan eventuelle problemer knyttet til opprissing forutsees, og dyre reparasjonsarbeider unngås.

## **1.2. Hensikt med oppgaven**

Oppgaven tar for seg en massiv damkonstruksjon i betong. I slike konstruksjoner med store betongvolum, vil termisk induserte spenninger utgjøre en stor del av konstruksjonens spenningsbilde. Ved å simulere konstruksjonens herdeforløp med hensyn på temperatur og spenning, vil det være mulig å beregne om opprissing forekommer. Opprissing skjer når strekkspenningen i konstruksjonen er større enn betongens strekkfasthet.

Det hører med til oppgaven å bestemme effekten av eventuelle tiltak som kan iverksettes for å hindre opprissing. Hensikten med dette er å finne tiltak som kan redusere spenningene i konstruksjonen tilstrekkelig, slik at opprissing kan unngås.

### **1.3. Valg av inputdata**

Modellene som lages i regne- og simuleringsprogrammer trenger inputdata fra brukeren. Dataene brukeren putter inn i programmet bør være av høy statistisk og akademisk kvalitet. Erfaringstall med god forankring, resultater fra eksperimenter i laboratorier og “in- situ”-målinger er eksempler på gode data. Det er viktig å huske på at resultatet fra et simulerings- eller regneprogram aldri er bedre enn de inputdata brukeren setter inn.

I denne oppgaven er det brukt inputdata fra Skanska, NCC og Sintef COIN. Mye av dette er faktiske prosjektdokumenter og beskrivelser fra det aktuelle prosjektet. Spesielt viktig er det å ha korrekte, og gode data for de betongene som skal brukes i simuleringene. Det har vært viktig for forfatteren å skaffe så gode og eksakte data som mulig, da simuleringer er en stor del av denne oppgaven.

### **1.4. Begrensinger ved oppgaven**

Opgaven er begrenset ved kun å se nærmere på fire tiltak for å hindre opprissing. Disse tiltakene er valgt i samråd med Prof. II Sverre Smeplass.

Det er også valgt å holde enkelte parametere i simuleringsprogrammene konstante. Disse parametere er kryp og utvikling av E- modul.

### **1.5. Oppbygning av oppgaven**

Opgaven starter med en innføring i nødvendig teoretisk stoff, for deretter å sammenlikne to beregningsprogrammer. Disse programmene er 4C Temp&Stress og CrackTeSt COIN. Her belyses de mest vesentlige forskjellene mellom regneprogrammene, samtidig som det gis en kort introduksjon til CrackTeSt COIN som brukes videre i oppgaven.

Deretter følger simuleringer av herdeforløpet i Skardfosdammen, utført i CrackTeSt COIN. Simuleringsmodellen som er benyttet, er laget med utgangspunkt i tegningsgrunnlaget fra Skanska.

Skardfosdammen simuleres først uten de aktuelle tiltakene. Dette gjøres for å se om betongdammen vil risse. Deretter simuleres konstruksjonen med de fire tiltakene. Simuleringene brukes som grunnlag for å si noe om effekten av disse.

Etter simuleringene følger en kort del, der kombinasjoner av tiltakene diskuteres. Her gjøres ingen simuleringer, og effekten anslås kvalitativt på bakgrunn av de foregående kapitlene.

Opgaven avsluttes med en kort konklusjon, litteraturliste og vedlegg.



## 2. Teorigrunnlag

### 2.1. Innledning

Denne delen av oppgaven skal gi leseren en kort innføring i den viktigste teorien oppgaven bygger på. På den måten kan leseren bedre forstå resultatene, og hvordan de fremkommer. Teoridelen er gjort så kort og lettfattelig som mulig. Kapittelet er bygget opp slik at den mest generelle teorien kommer først. På den måten vil leseren få en innføring i mer komplisert teori utover i kapittelet.

### 2.2. Definisjoner

**v/c- tall:**

Forholdet mellom vann og sement i betongen.

$$\frac{v}{c} = \frac{\text{vanninnhold}}{\text{sementinnhold}}$$

Der vanninnhold og sementinnhold oftest benevnes [ $\text{kg/m}^3$ ]

**Formel 1: v/c- tall**

**v/b- tall:**

Forholdet mellom vann og bindemiddel i betongen. Bindemiddel er alle komponenter med pozzolane eller sement- liknende egenskaper.

$$\frac{v}{b} = \frac{\text{vanninnhold}}{\text{bindemiddel}} = \frac{v}{c + \sum_i (p_i * k_i)}$$

Der :

$v$  = vanninnhold [ $\text{kg/m}^3$ ]

$c$  = sementinnhold [ $\text{kg/m}^3$ ]

$p$  = pozzolaninnhold [ $\text{kg/m}^3$ ]

$k$  = virkningsfaktor [-]

**Formel 2: v/b- tall**

### **Flyveaskeinnhold i betong:**

I norsk sammenheng finnes det to måter å angi andelen flyveaske i betong. Statens Vegvesen bruker følgende definisjon:

$$\text{Andel flyveaske} = \frac{\text{Masse flyveaske}}{\text{Masse sement}} * 100\%$$

#### **Formel 3: Andel flyveaske, Statens Vegvesen**

I sementstandarder og i litteraturen benytter man en annen definisjon:

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

#### **Formel 4: Andel flyveaske**

Dette gir oss dermed to forskjellige notasjoner for samme faktiske innhold av flyveaske i betong eller sement. For eksempel vil en Norcem Anleggsement FA inneholde 25 % flyveaske i følge formel 3, men kun 20 % etter formel 4. Disse to måtene å angi askemengden på kan være en kilde til forvirring og misforståelser.

I denne oppgaven brukes formel 4 for å angi mengden flyveaske i betong.

### **Rissindeks:**

Rissindeks sier noe om det oppstår riss i konstruksjonen. Dette skjer når spenningene i konstruksjonen er høyere enn fastheten. Definisjonen er gjengitt nedenfor.

$$\text{Rissindeks} = \frac{\text{Strekkspenning}}{\text{Strekfasthet}}$$

#### **Formel 5. Rissindeks**

Som vi ser av brøken, vil det oppstå riss når strekkspenningen i betongen er høyere enn strekkfastheten. Dette gir oss en rissindeks  $> 1,0$ .

## **Kryp:**

Deformasjon i et materiale over tid grunnet belastning, kalles kryp. Lasten kan være egenlast eller en ytre påkjent last. Kryp- deformasjonen kan deles opp i en elastisk og en plastisk del. Del elastiske deformasjonen går tilbake ved avlastning av materialet, mens den plastiske gir varig deformasjon.

Kryp bidrar til å senke materialets effektive E- modul. E- modul medregnet kryp kalles effektiv E- modul og betegnes i Eurocode 2 som  $E_{\text{effektiv}}$  eller  $E_{\text{eff}}$ . Alle materialer har et visst kryp, men materialer som betong og tre kan ha spesielt stort kryp.

Kryp i betong beregnes som oftest ved å bestemme et kryptall etter Eurocode 2. Dette kryptallet er med på å senke betongens E- modul. Det vil si at med økende krypbidrag, blir betongens effektive E- modul mindre. Betongen blir dermed mindre stiv. Dette vises av formel 6, som er hentet fra Eurocode 2. Etterhvert som herdeposessen forløper, endres kryptet i betongen. I ung betong er kryptet forholdsvis stort, mens i ferdig herdet betong er kryptet lite. Med andre ord vil kryptallet i formel 6 bli mindre med økende grad av herding i konstruksjonen.

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty, t_0)}$$

Der

$E_{c,eff}$  = effektiv E- modul

$E_{cm}$  = betongens E- modul

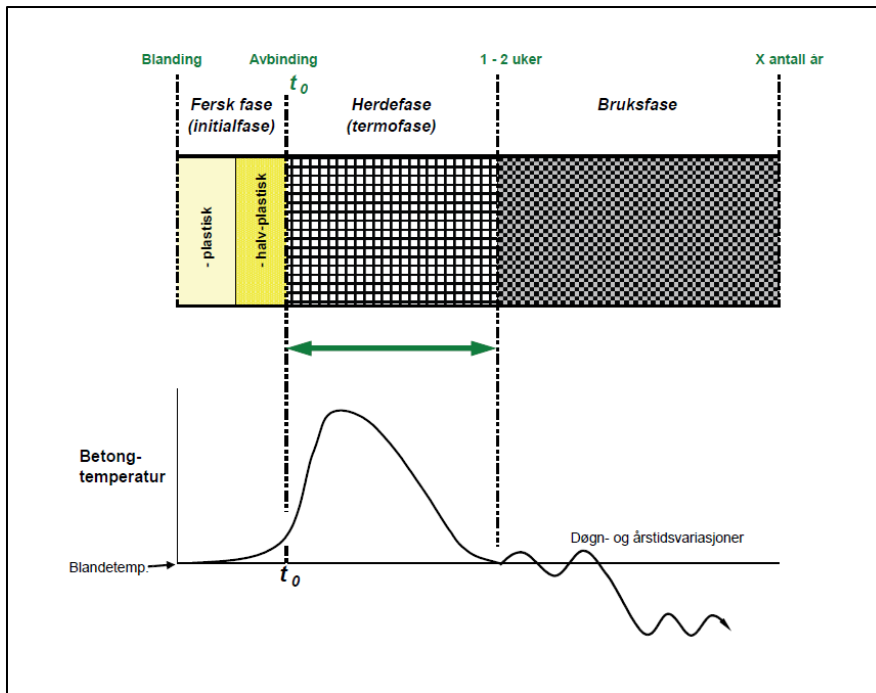
$\varphi(\infty, t_0)$  = kryptall

### **Formel 6: Kryp**

## **2.3. Herdeteknologi**

Herdeteknologi handler om betongens herdefase. Betong er et materiale som i hovedsak er sammensatt av sement, vann, tilslag og eventuelle tilsetninger. Når sementen reagerer med vannet i betongblandingen, stivner betongen. Herdeteknologi tar for seg fasen der betongen stivner. I herdefasen vil betongen utvikle varme, og dette er med på å bidra til opprissing. Betongtemperaturen vil typisk nå toppunktet etter 18- 24 timer for husbygg, og 1- 2 dager for massive konstruksjoner (2).

Det finnes flere forskjellige modeller for å beskrive herdefasen i en betong. I denne oppgaven beskrives den danske og den svenske modellen. Den danske modellen er den gjeldende modellen i Norge, og brukes av regneprogrammet 4C Temp&Stress. I Sverige brukes en annen modell, som er basert på arbeidene til blant andre Jan Erik Jonasson fra Luleå Tekniske Universitet. Denne modellen er beskrevet i kapittel 2.3.6. Regneprogrammet CrackTeSt COIN er basert på den svenske modellen for herdeteknologi.



Figur 1: Betongens faser (1)

### 2.3.1. Varmeutvikling og termisk utvidelse av betong

I herdefasen vil betongen utvikle varme. Denne varmen er et produkt av hydrasjonsprosessen. Prosessen er en eksoterm kjemisk prosess, som skjer når sement kommer i kontakt med vann. Hydrasjonen gjør at betongen stivner og blir hard. Når betongen varmes opp, vil materialet utvide seg i tråd med mekanikkens termiske lover. En typisk portlandsement kan utvikle så mye som 400- 500 kJ/kg sement. Dette tilsvarer en betydelig mengde energi, når sementen ofte utgjør 300- 350 kg/m<sup>3</sup> betong (1).

Temperaturstigningen i betong kan kalkuleres med følgende formel:

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

Der :

$\Delta\theta$  = temperaturøkning [<sup>o</sup>C]

$Q_{\infty}$  = total varmetvikling i sement [kJ/kg]

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

$c_b$  = spesifikk varmekapasitet for betong [kJ/kg\* <sup>o</sup>C]

$\rho_r$  = betongdensitet [kg/m<sup>3</sup>]

Formel 7: Varmeutvikling i betong

Den termiske utvidelsen kan kalkuleres fra formel 8. Betongens varmekapasitet og termiske ekspansjon påvirkes som regel mest av tilslaget.

$$\varepsilon_T = \alpha_T * \Delta T$$

Der :

$\varepsilon_T$  = utvidelse

$\alpha_T$  = termisk utvidelseskoeffisient [ $1/^\circ C$ ]

$\Delta T$  = temperaturendring i materialet [ $^\circ C$ ]

**Formel 8: Termisk utvidelse**

### 2.3.2. Hastighetsfunksjon og aktiveringsenergi

Hastighetsfunksjonen som brukes i den danske modellen for herdeteknologi er Arrhenius-likningen. Denne likningen beskriver forholdet mellom temperatur og kjemisk aktivitet i termisk aktiverte prosesser. Det vil si hydratasjonsraten som funksjon av tilført energi. Her brukes Freiesleben- Hansen og Pedersens modell for temperaturfølsomhet. Denne modellen sier at aktiveringsenergien for temperaturer over  $20^\circ C$  er konstant, mens den øker med synkende temperatur. Dermed vil en høyere tilførsel av energi, gi en raskere reaksjon. Likningen sier noe om følsomheten til en betong. Det vil si hvor mye aktiveringsenergien endrer seg for hver grad. Dette er vist i figur 2.

Formelen er ikke vitenskapelig utledet, men baserer seg på numeriske beregninger. Dette gjør at formelen ikke er 100 % presis. Den brukes likevel, da den gir svar med tilfredsstillende nøyaktighet. Likningen er gjengitt i formel 9.

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

Der :

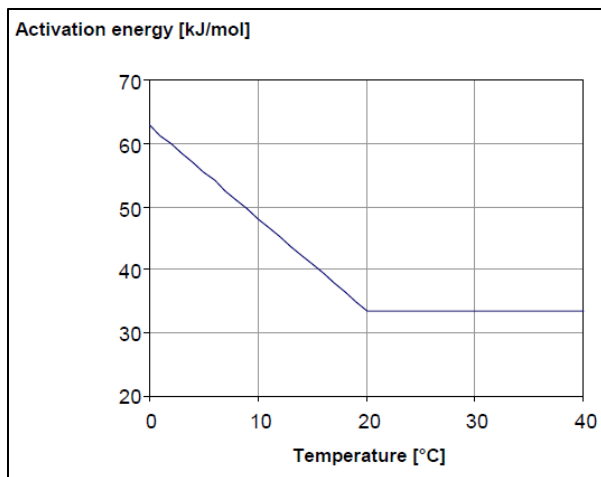
$$H(\theta) = \text{temperaturfølsomhet} \quad E = A + B * (20 - \theta) \quad \theta \leq 20^\circ C$$

$$E(\theta) = \text{aktiveringsenergi [kJ/mol]} \quad E = A \quad \theta > 20^\circ C$$

$\theta$  = temperatur [ $^\circ C$ ]

$R$  = gasskonstant [ $8,314 \text{ J/mol} * ^\circ C$ ]

**Formel 9: Betongens hastighetsfunksjon**



**Figur 2: Temperaturfølsomhet (1)**

Konstantene A og B i likningen er typisk påvirket av sementtype, pozzolanaktivitet, og til noen grad v/c- forholdet i betongen. Typiske verdier for disse faktorene varierer mellom 20-40 kJ/mol for A, og 1,0- 1,5 kJ/mol for B (1).

### 2.3.3. Modenhetsprinsippet

Modenhet er en funksjon av temperaturen under herding, og tid. Betong herder med forskjellig hastighet ved forskjellig temperatur, som vist i forrige delkapittel. Dermed vil blant annet fastheten utvikle seg raskere ved høyere herdetemperaturer.

Modenhetsprinsippet gjør det mulig å kalkulere hvor langt hydratasjonsprosessen har kommet hvis man kjenner betongens temperaturforløp. Temperaturforløpet kan man akkvirere ved for eksempel å loggføre temperaturen ved gitte tidsintervall. Dette er nyttig fordi vi kan bruke dette til å forutsi når en betong har tilstrekkelig trykkfasthet, slik at forskalingen kan rives. Modenhet kalkuleres ved å integrere varmeutviklingen med hensyn på tid. Likningen vises under:

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

Hvor  $\theta = \theta(t)$  ; temperatur som funksjon av tid

#### Formel 10: Modenhet

Ved å lage et dataplott over temperaturforløpet ved gitte tidsinkrementer, kan man enkelt kalkulere modenhet ut ifra de akkvirerte dataene. Dermed kan modenheten beregnes av formelen under. Denne formelen er i realiteten kun en forenkling av integralet i formel 10.

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

#### Formel 11: Modenhet som sum

Denne formelen kan beskrive både varme- og styrkeutviklingen av betongen i ung alder. Varme- og fasthetsutvikling kan beskrives som entydige funksjoner av  $M(\theta)$  (1).

#### 2.3.4. Styrkeutvikling

Som nevnt i forrige delkapittel, kan styrkeutviklingen kalkuleres ut ifra modenheten. Styrkeutviklingen uttrykkes som en formfunksjon, og beskriver betongens fasthetsutvikling som en funksjon av modenhet. Kurveparameterne er empiriske, og finnes ved å bruke kurvetilpasning eller regresjon. Formelen som brukes for å beregne betongens trykkfasthet ut ifra modenhet er gjengitt under.

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

Der :

$f_{c\infty}$  = total trykkfasthet

$M$  = modenhet

$\tau_e$  = retardasjonsparameter

$\alpha$  = kurveparameter

Der  $\tau_e$  og  $\alpha$  er empiriske parametere

#### Formel 12: Fasthetsutvikling

#### 2.3.5. Varmeutvikling

Varmeutviklingen i betongen kan finnes fra omtrent samme formelen som over. Her benyttes i midlertid total hydrasjonsvarme i stedet for fasthet. Man finner dermed varmeutviklingen som en funksjon av modenheten. De empiriske kurveparameterne kan også her finnes ved regresjon eller kurvetilpasning. Formelen er gjengitt under:

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

Der :

$Q_\infty$  = total varme utviklet i betongen

$M$  = modenhet

$\tau_e$  = retardasjonsparameter

$\alpha$  = kurveparameter

Der  $\tau_e$  og  $\alpha$  er empiriske parametere

#### Formel 13: Varmeutvikling

Formlene basert på modenhet er i midlertid kun presise for betonger inntil omtrent 100 modenhetstimer. Dette gjelder både formlene for varme- og styrkeutvikling. Etter dette punktet vil ikke formlene gi ønsket presisjon, og andre metoder bør benyttes. Formlene tar heller ikke høyde for at betong herdet ved høye temperaturer vil ha en mindre total trykkfasthet. Dette vil si at funksjonene kun bør benyttes ved herdetemperaturer under 50°C (1).

### 2.3.6. Svensk modell for betongens egenskaper

I Sverige brukes en annen modell for å bestemme betongens egenskaper som funksjon av temperatur og tid. Denne modellen baserer seg på andre formler enn de overnevnte, som er basert på dansk modell. Regneprogrammet CrackTeSt COIN brukes i denne oppgaven, og er basert på den svenske modellen.

Aktiveringsenergien beregnes på en litt annen måte etter den svenske modellen. Formlene som brukes for å bestemme denne er gjengitt under.

$$\beta_T = \begin{cases} e^{\left(\theta \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T+273}\right)\right)} & \text{for } T > -10^\circ C \\ 0 & \text{for } T < -10^\circ C \end{cases}$$

Der  $\theta$  er gitt ved følgende formel:

$$\theta = \theta_{ref} \left(\frac{30}{T+10}\right)^{\kappa_3} \quad \text{for } T > -10^\circ C$$

Der  $\theta_{ref}$  og  $\kappa_3$  er empiriske konstanter som bestemmes ved kurvetilpasning og forsøk

#### Formel 14: Aktiveringsenergi

Modenhetsfunksjonen er gjengitt under. Denne er ikke veldig forskjellig fra den danske modellen, hvis man kun ser på formelen isolert. Definisjonen på modenhet er lik i begge modellene. Den svenske modellen bruker uttrykket “ekvivalent tid” ( $t_e$ ) i stedet for modenhet.

$\beta_\Delta$  er en justeringsfaktor, og settes ofte lik 1.  $t_{e,0}$  er en annen justeringsfaktor, og settes ofte til 0. Dette er også tilfellet i denne oppgaven. Derfor kan formelen forenkles.

$$t_e = \beta_\Delta \int_t \beta_T * dt + t_{e,0}$$

#### Formel 15: Modenhet



Forenklet:

$$t_e = \int_t \beta_T * dt$$

**Formel 16: Modenhet, forenklet**

Formel 16 kan i likhet med formel 10 også gjøres om til en sum. Dette er ikke gjort i dette kapitlet, men det er de samme matematiske prinsippene som gjelder.

Fasthetsutviklingen er gitt ved formelen under. Denne formelen er noe komplisert, og trenger en del parametere som må bestemmes empirisk eller fra forsøk i laboratoriet. Dette gjør at det er noe tungvint å bruke denne formelen for å finne fasthetsforløpet.

$$f_{cc}^{ref} = \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ ((t_{eT} - t_s) / (t_A - t_s))^{n_A} * f_A \\ e^{(s * (1 - \frac{672 - t^*}{t_{eT} - t^*})^{n_{cc,28d}})} * f_{cc,28d} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{for } 0 \leq t_{eT} < t_s \\ \text{for } t_s \leq t_{eT} < t_A \\ \text{for } t_{eT} > t_A \end{array}$$

Der

$$t^* = \frac{672 - \delta_c * t_A}{1 - \delta_c}$$

$$\delta_c = (1 - \frac{\ln(f_A / f_{cc,28d})}{s})^{\frac{1}{n_{cc,28d}}}$$

$f_{cc,28d}$ ,  $s$ ,  $n_{cc,28d}$ ,  $t_s$ ,  $t_A$  og  $n_A$  er empiriske parametere som kan bestemmes ved forsøk.

**Formel 17: Fasthetsutvikling**

Formelen for varmeutvikling i betong (Q i dansk modell) er gitt ved W i formelen under.

$$W(t_e) = C * W_c * e^{(-\lambda_1 (\ln(1 + \frac{t_e}{t_1}))^{-\kappa_1})}$$

Der

$W_c$  = varme fra sement [kJ/kg]

$C$  = sementinnhold [kg/m<sup>3</sup>]

$t_e$  = modenhetstid [h]

$\lambda_1$ ,  $t_1$  og  $\kappa_1$  er empiriske parametere

**Formel 18: Varmeutvikling**

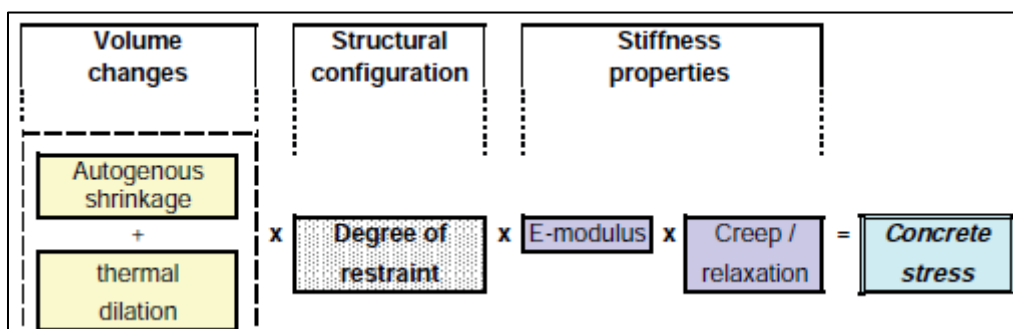
Vi ser i dette kapittelet at formlene for varme- og fasthetsutvikling i den svenske modellen er én gang overbestemt. Dette kan sies på bakgrunn av at vi må bestemme én parameter mer enn det som er nødvendig.

## 2.4. Fastholding

Fastholding kan være et stort problem i massive betongkonstruksjoner. Hvis volumendringene i en fersk betongkonstruksjon holdes igjen, kan dette forårsake spenninger. Fastholdingen bestemmes av konstruksjonens geometriske utforming, den tilstøtende konstruksjonens størrelse, og plassering i forhold til den.

Ved høye temperaturer i konstruksjonen vil betongen oppleve autogent svinn og termisk dilatasjon. Dette gjør at betongen vil utvide seg i herdefasen, og trekke seg sammen i avkjølingsfasen. Hvis konstruksjonen er fastholdt, og ikke kan utvide og trekke seg sammen uhindret, kan riss forekomme.

Spenninger i en herdende betongkonstruksjon er et sammensatt problem, og har flere faktorer som virker sammen. Autogent svinn og termisk utvidelse er drivkreftene bak rissdannelsen. Graden av fastholding og betongens stivhet og kryp er med på å bestemme alvorligheten av påkjenningene. Figuren under viser sammenhengen mellom faktorene.

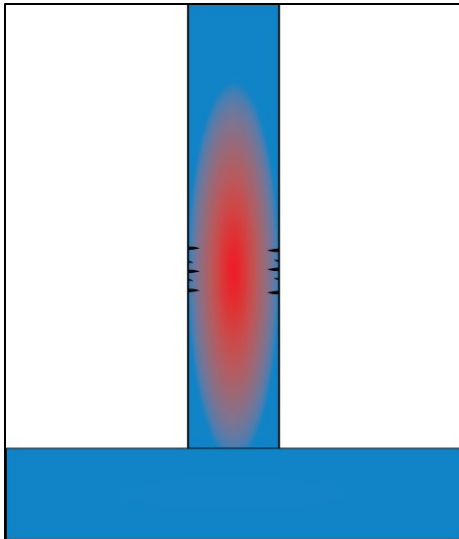


Figur 3: Faktorer som påvirker opprissing i herdefasen (1)

Fastholding deles ofte inn i to typer; indre- og ytre fastholding. Det er de samme mekanismene som virker i begge typene, men det er enkelte distinktive forskjeller.

### 2.4.1. Indre fastholdings

Denne typen fastholding induseres av temperaturgradienter over tverrsnittet av konstruksjonen. Når gradienten er høy, vil den indre fastholdingen øke. Materialer som opplever en oppvarming vil utvide seg etter formel 8. Siden betong er et konstruksjonsmateriale med lav strekkfasthet, kan slike utvidelser skape riss når utvidelsen i betongen blir større enn strekkfastheten. I et tverrsnitt med tilstrekkelig temperaturgradient vil de kalde yttersidene oppleve strekk, mens den varme kjernen i snittet vil oppleve trykk. Dette skjer siden kjernen hindrer yttersidene å trekke seg sammen. Dermed kan det oppstå riss.



**Figur 4: Opprissing grunnet indre fastholding**

Denne formen for opprissing skjer ofte når forskjellen mellom kjernetemperaturen og overflatetemperaturen overskrider  $20^{\circ}\text{C}$ . Dette skjer ofte i massive konstruksjoner som fundamenter og tykke tunnelvegger. Her kan temperaturgradienten komme opp i over  $40^{\circ}\text{C}$  (1).

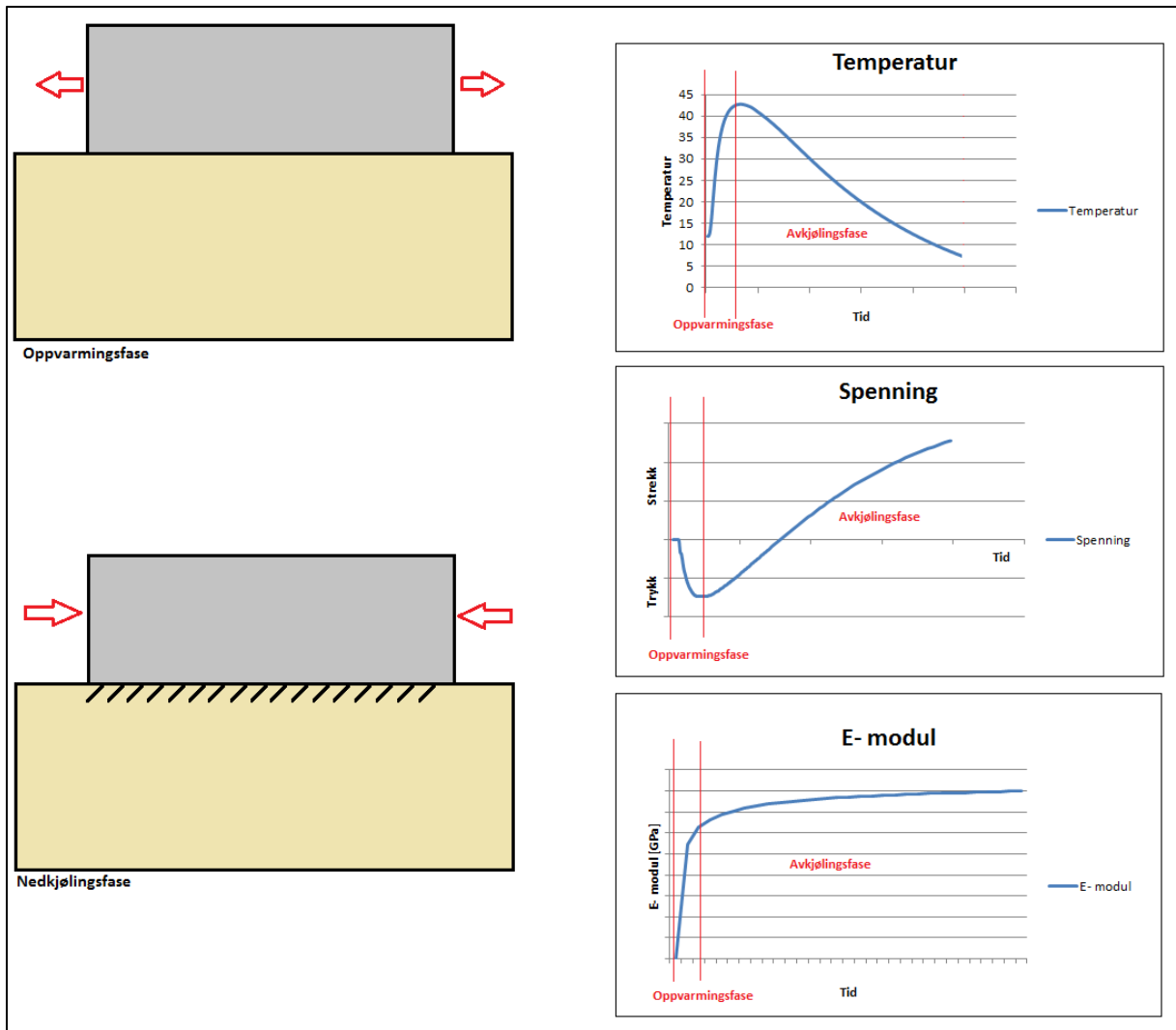
Denne formen for fastholding skaper ofte overflateriss, og de er sjelden veldig dype. Rissene har en tendens til å lukke seg når konstruksjonen avkjøles, og betongen trekker seg sammen.

#### **2.4.2. Ytre fastholding**

Denne formen for fastholding forekommer når det er store temperatur- og stivhetsforskjeller mellom to konstruksjonsdeler. Et typisk eksempel på dette er når det støpes en vegg på et gammelt fundament. Den nye veggen vil utvikle varme under herdeprosessen, mens fundamentet forblir kjølig. Fundamentet er ferdig herdet, og har en større E- modul enn den nye veggen.

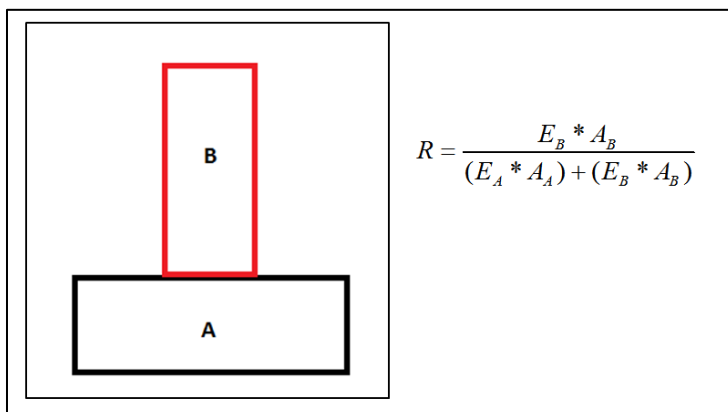
Når den ferske betongen begynner å herde, utvikles varme. Dette gjør at temperauten i veggen stiger samtidig som betongen stivner. Den varme veggen vil utvide seg på grunn av temperaturstigningen. Denne fasen i herdeprosessen kalles oppvarmingsfasen. Når betongen er ferdig herdet, vil konstruksjonen kjøles av omgivelsene. Avkjølingen gjør at konstruksjonen vil trekke seg sammen. Betongen er nå stiv, og har heft i fundamentet. Veggen kan derfor ikke trekke seg sammen uhindret. Dette gjør at vi får strekkspenninger i konstruksjonen i avkjølingsfasen.

Spenningsbildet i betongens oppvarmings- og avkjølingsfase kan sees av figur 5. Her er også E- modul tatt med for å illustrere forløpet.



Figur 5: Betongens faser og ytre fastholding

Graden av fastholding, herdetemperaturen og betongsammensetningen bestemmer hvor store og dype riss som dannes. Uttrykket for fastholdingsgrad er gjengitt i figur 6. Her er stivheten til konstruksjonene og deres areal vesentlig.



Figur 6: Fastholdingsgrad

Opprissing grunnet spenninger i oppvarmings- og avkjølingsfasen i en massiv betongkonstruksjon, skaper ofte gjennomgående riss. Slike riss svekker konstruksjonens integritet, og fører til at betongen blir mer permeabel for aggressive ioner og utvasking. Dype og gjennomgående riss kan gi økt armeringskorrosjon, karbonatisering, og økt inntrengning av vann som igjen kan bidra til alkalireaksjoner og frostsprengning.

Fastholding er én av tre hovedfaktorer som bidrar til opprissing i herdefasen. For å unngå slik opprissing kan man gjøre varmeutviklingen i betongen mindre. Andre tiltak kan være å redusere fastholdingsgraden og konstruksjonens stivhet. Vannmengden i betongen kan reduseres ved for eksempel å bruke mindre bindemiddel eller flyveaske.

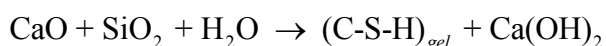
## 2.5. Flyveaske i betong

Flyveaske er et restprodukt etter forbrenning av kull, hovedsakelig fra kullkraftverk. Siden Norge ikke har noen storskala kullkraftverk, importeres flyveaske fra Danmark. Askens egenskaper er sterkt avhengig av kulletts kjemiske sammensetning, og hvordan forbrenningen i ovnen foregår. Det er derfor viktig med en jevn og stabil forbrenning av kullet, samtidig som det bør ha mest mulig konsistent sammensetning. Opp gjennom historien er det funnet mange bruksområder for flyveaske. Blant annet brukes asken til veifyllinger, og for å lage lette betongprodukter (9).

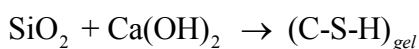
Det er bevist at flyveaske har pozzolane egenskaper (1). Dette gjør materialet godt egnet for bruk i betong. Flyveasken kan enten erstatte eller supplere sementen i betongen. Siden flyveaske er mindre reaktivt enn sement, vil hydratiseringen skje tregere når en del av sementen erstattes med aske. Dette gjør at store massive betongkonstruksjoner utvikler varme saktere. Pozzolanreaksjonen er også mindre eksoterm enn reaksjonen mellom vann og sement. Dermed vil flyveaske bidra til å senke den maksimale kjernetemperaturen i konstruksjonen. Dette kan være med på å motvirke termisk induserte spenninger.

Flyveaske er et pozzolan, og reagerer på en litt annen måte enn sement. Sement trenger vann for å reagere, mens flyveaske bruker kalk. Kalken kommer først og fremst fra den kjemiske reaksjonen mellom vann og sement, der kalk dannes. Det kan også tilsettes kalk i betongen, men dette er som regel ikke nødvendig. Pozzolanreaksjonen mellom flyveaske og kalk er dermed avhengig av reaksjonen mellom sement og vann. Bruk av flyveaske gjør at vi får en tettere og mer bestandig konstruksjon. Flyveaske gir også fersk betong en del gode egenskaper, slik som god støpelighet og kohesivitet (1, 3, 4).

Sementreaksjon (forenklet)



Pozzolanreaksjon, flyveaske (forenklet)



**Formel 19: Sement- og pozzolanreaksjon**

Malingsgraden har mye å si for reaksjonshastigheten til flyveaske. Mer finmalt aske har større overflate, og vil dermed reagere raskere. Det er ofte ønskelig å ha finmalt flyveaske blandet sammen med sement for å kompensere for askens lave reaksjonshastighet. Mange av egenskapene til betong er basert på modenhet. Betong med flyveaske reagerer saktere og utvikler mindre varme. Dermed vil blant annet fasthetsutviklingen gå tregere. Dette er viktig å huske på hvis man ønsker en rask fasthetsutvikling, eller støper i kaldt klima.

## **3. Beregningsprogrammer**

### **3.1. Innledning**

I oppgaven er regneprogrammet CrackTeSt COIN benyttet for å beregne varmeutvikling og rissindeks. Dette kapitlet tar for seg regneprogrammene 4C Temp&Stress, og CrackTeSt COIN som i dag brukes av Skanska. CrackTeSt COIN er pr dags dato i en beta- fase, der en uferdig versjon benyttes. Versjonen er fullt brukbar, men er noe ustabil og ikke klar for salg.

Både 4C Temp&Stress og CrackTeSt COIN er 2- dimensjonale beregningsprogrammer, og beregner temperaturer og spenninger i betong fra fersk fase til ferdig herdet konstruksjon. Beregningene gjøres på bakgrunn av parametere brukeren setter inn. Ved å legge inn data om blant annet sementmengde, aktiveringsenergi, trykk- og strekkfasthet, varmekapasitet og utvikling av E- modul kan programmene finne varmeutviklingen i den aktuelle betongen. Temperaturberegningene brukes som basis for spredningsberegningene i programmene.

Med dette kan vi si at programmene beregner og simulerer herdeforløpet på omtrent samme måte. Programmene er basert på de samme grunnleggende beregningsprinsippene. Hensikten med å sammenlikne de to programmene er å belyse de viktigste forskjellene mellom programmene.

### **3.2. 4C Temp&Stress**

4C Temp&Stress er utviklet av DTI Building Technology i Danmark. Programmet er ganske gammelt, og baserer seg på teknologi fra 1990. Dette gjør at brukergrensesnittet ikke er det mest brukervennlige. I tillegg klarer ikke programmet å gjøre bruk av den datakraften som finnes på markedet i dag. Dette gjør at programmet er noe ineffektivt. Programmets siste oppdatering kom mot slutten av 1998, og det er heller ingen brukerstøtte til programmet. I dag er programmet i bruk blant annet hos Skanska, men skal etter hvert erstattes av CrackTeSt COIN.

4C Temp&Stress er basert på “den endelige elementmetoden” (eng.: “finite element method”, forkortet FEM). Denne metoden er svært vanlig å bruke i regne- og simuleringsprogrammer. Den modellerte konstruksjonen deles opp i et FEM- nett. Dette nettet består av mange små trekkanter. Programmet regner på hver av disse trekantene, og finner svaret for hele konstruksjonen. Med et mer finmasket FEM- nett vil beregningene bli mer presise, men også ta lenger tid da det er flere trekkanter å beregne.

Programmet er basert på danske modeller for herdeteknologi. I Norge benyttes den danske modellen for å beskrive betongens egenskaper over tid. Dette gjør at parameterne som brukes i 4C Temp&Stress ofte er lette å bestemme, eller skaffe fra betongprodusenter i Norge.

### **3.3. CrackTeSt COIN**

CrackTeSt COIN er et regneprogram, som i likhet med 4C Temp&Stress, er basert på FEM. Programmet regner ut temperatur- og fasthetsutviklingen for den aktuelle betongkonstruksjonen. Denne beregningen er gjort på bakgrunn av brukerens input-parametere. Dette er parametere som beskriver blant annet E- modul, fasthet, sementmengde og varmekapasitet.

Programmet er utviklet av Jejems Concrete, i samarbeid med blant andre Universitetet i Luleå, PEAB AB, og Cementa AB. Siden programmet er utviklet i Sverige, er den svenske modellen for betongens herdeforløp over tid lagt til grunn. Denne modellen er beskrevet i kapittel 2.3.6.

### **3.4. Viktige forskjeller**

Selv om 4C Temp&Stress og CrackTeSt COIN er forholdsvis like med tanke på regnemåte og modellering, finnes det noen vesentlige forskjeller. De to mest vesentlige forskjellene er valget av modell for herdeforløpet, og forskjellen i krypmodellene i de to programmene.

#### **3.4.1. Svensk og dansk beregningsmodell**

Den svenske og den danske beregningsmodellen er beskrevet i kapittel 2.3. Som vi ser av formlene, er den svenske modellen vesentlig mer komplisert enn den danske. Den svenske modellen har flere parametere som må bestemmes empirisk, eller gjennom forsøk. Modellen fra Danmark har en mye enklere struktur, og er basert på færre empiriske parametere. Dette er lett å illustrere ved å se på formlene for fasthet i de to modellene.

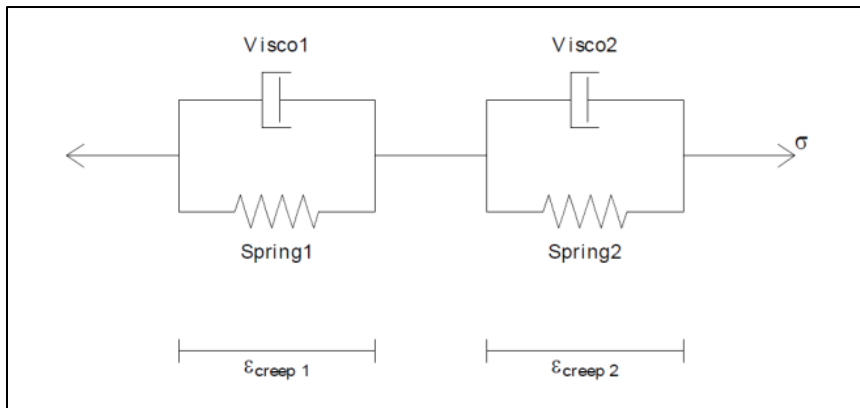
I teorien vil like betonger gi identiske beregningsresultater i de modellene. Problemet er imidlertid at modellene må tilpasses til hverandre. De danske parameterne må “konverteres” til svenske gjennom programmer som for eksempel Microsoft Excel. Dette kan gjøre at presisjonen i resultatene kan minske noe.

#### **3.4.2. Kryp**

Kryp beregnes forskjellig i de to regneprogrammene. Dette er den mest vesentlige forskjellen mellom programmene, da dette gir ganske store forskjeller. Generelt sett gir 4C Temp&Stress et større krypbidrag enn CrackTeSt COIN. Dermed gir 4C Temp&Stress større relaksasjon og mindre stivhet i simuleringen. Dette gjør at rissindeksen over lang tid vil bli mindre i 4C Temp&Stress enn i CrackTeSt COIN.

Krypmodellen i 4C Temp&Stress er en lineær visko- elastisk materialmodell. Denne modellen består av to Kelvin-elementer satt i serie. Dette er vist i figur 7.

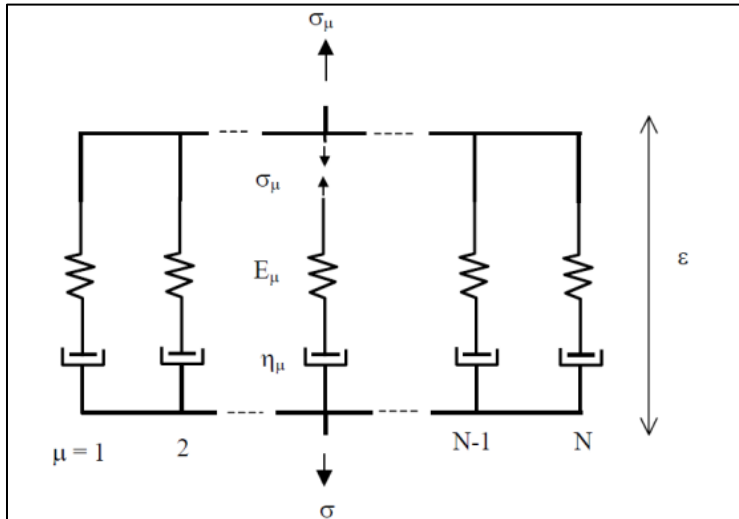




**Figur 7: Krypmodell fra 4C Temp&Stress**

Modellen er ganske enkel, men overvurderer effekten av kryp. Dette betyr at vi i virkeligheten vil få mindre kryp og relaksasjon enn i kryptmodellen brukt i 4C Temp&Stress. Under simuleringer i 4C Temp&Stress legges det kun inn data for én fjær, og to visko- elementer. Ved å legge inn data for den siste fjæren kan modellen gjøres stivere. Dette gir imidlertid kun liten effekt, da den visko- elastiske modellen uansett ikke har ønsket stivhet.

Krypmodellen som brukes i CrackTeSt COIN er stivere, og mer virkelighetsnær. Den benytter seg av en maxwell- kjede med et gitt antall enheter. Antall enheter og relaksasjonstider kan varieres for hver betong.



**Figur 8: Krypmodell fra CrackTeSt COIN**

Dette betyr at resultatene fra beregningene i CrackTeSt COIN vil være mer konservative enn resultatene fra 4C Temp&Stress. Hvis vi sammenlikner modellenes utslag på rissindeksen, vil Maxwellkjede- modellen fra CrackTeSt COIN generelt sett gi et høyere resultat enn den visko- elastiske modellen fra 4C Temp&Stress.

### 3.5. Resultatsammenlikning

Denne delen av oppgaven tar utgangspunkt i den nybygde betongdammen på Krokan ved Rjukan i Tinn kommune i Telemark. Her simuleres en støpeseksjon av dammen i de to aktuelle regneprogrammene. Seksjonen kan sees i figur 9. Simuleringen gjøres for å belyse forskjellen mellom programmene, spesielt med tanke på krypbidraget.



Figur 9: Simulert støpeseksjon

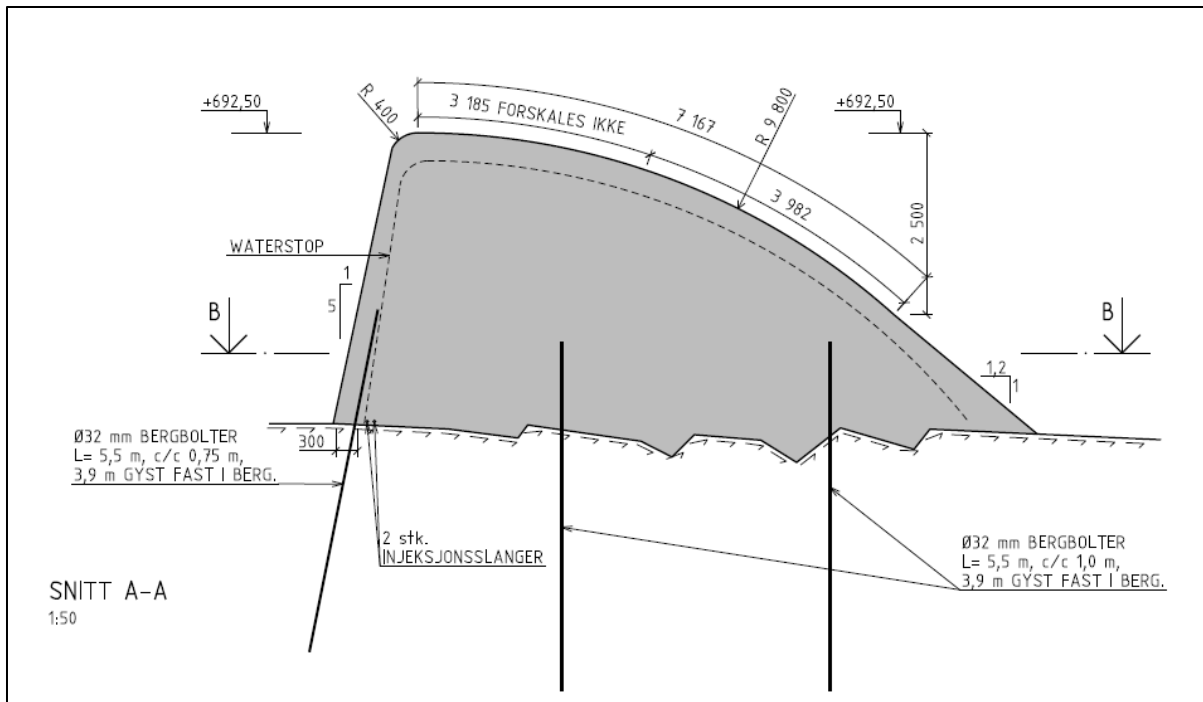
Modellene i 4C Temp&Stress og CrackTeSt COIN er tilnærmet identiske. Det er imidlertid vanskelig å lage modellene 100 % like. Grunnen til dette er at regneprogrammene har litt forskjellige måter å modellere og sette inn parametere på. Mens man kan legge inn diskrete verdier i 4C Temp&Stress, må enkelte verdier i CrackTeSt COIN legges inn fra eksisterende verdier fra andre materialer eller materialvarianter. Under følger en tabell som oppsummerer forskjellene i de to modellene.

Parameter	4C Temp&Stress	CrackTeSt COIN
Lufttemperatur	Sin(max=-10°C, min=-15°C)	-12,5 °C
Konveksjonstall, forskaling	16 [kJ/(m <sup>2</sup> *h*K)]	4,44 [W/K*m <sup>2</sup> ]
Konveksjonstall, friluft	40 [kJ/(m <sup>2</sup> *h*K)]	11,2 [W/K*m <sup>2</sup> ]
Konveksjonstall, grunn	200 [kJ/(m <sup>2</sup> *h*K)]	55,55 [W/K*m <sup>2</sup> ]

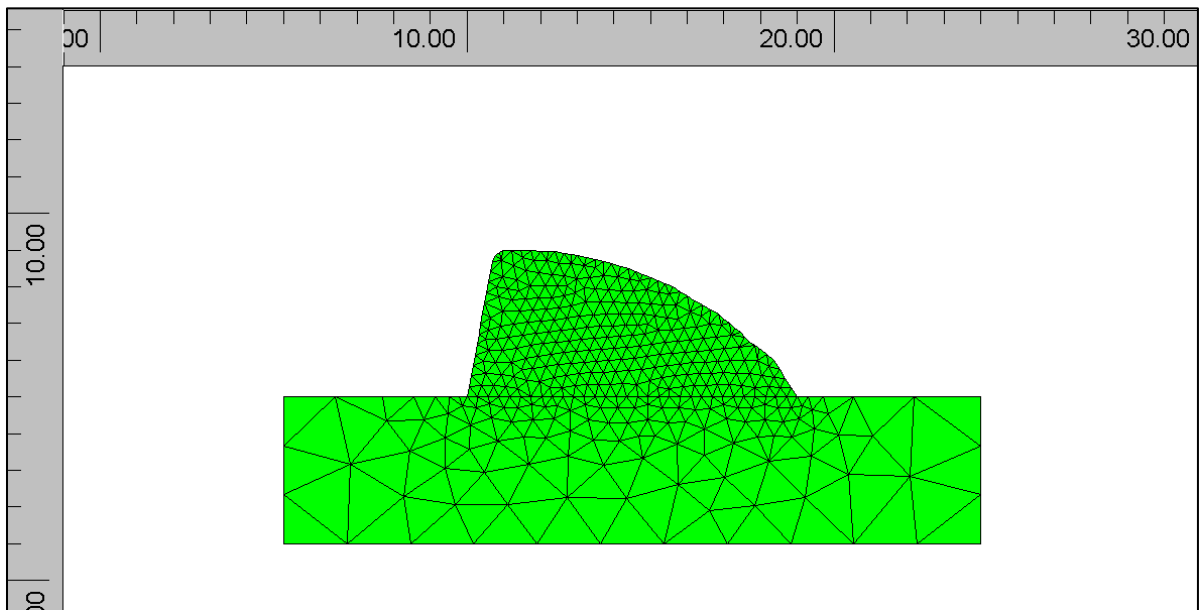
Tabell 1: Forskjeller mellom modellene

Når det gjelder betongene som er brukt i de to simuleringmodellene, er de danske parameterne direkte konvertert til svenske. Dette er gjort ved å bruke et regneark, der de danske parameterne settes inn. Ved å bruke prinsippet om minste kvadratsumsavvik finner regnearket de svenske ekvivalente parameterne.

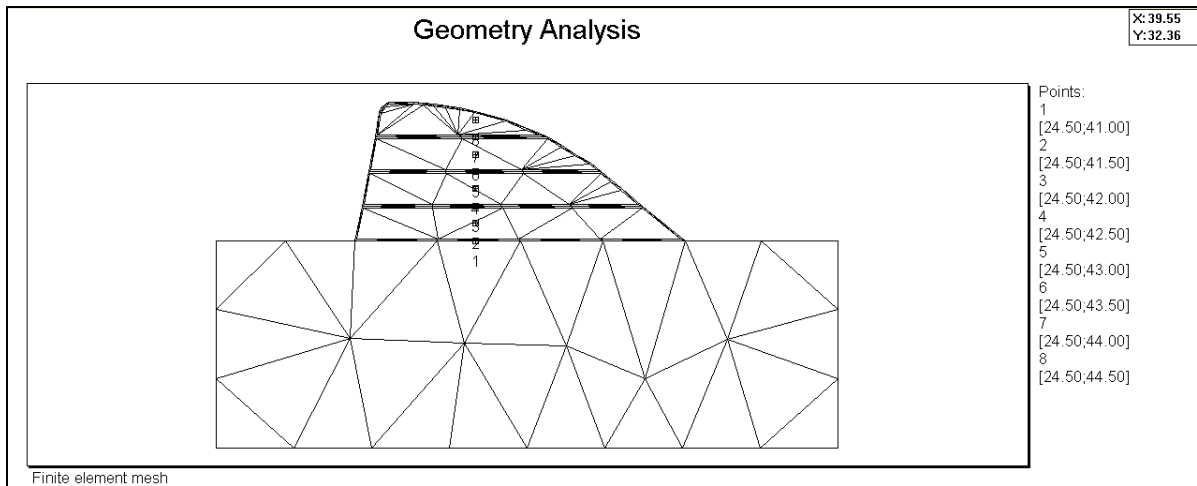
Modellens FEM- nett og geometri, samt vertikalsnitt fra tegningsgrunnlaget kan sees av figurene på neste side. Ytterligere tegningsgrunnlag fra betongdammen på Krokan finnes i vedlegg B.



Figur 10: Snitt, Krokandammen



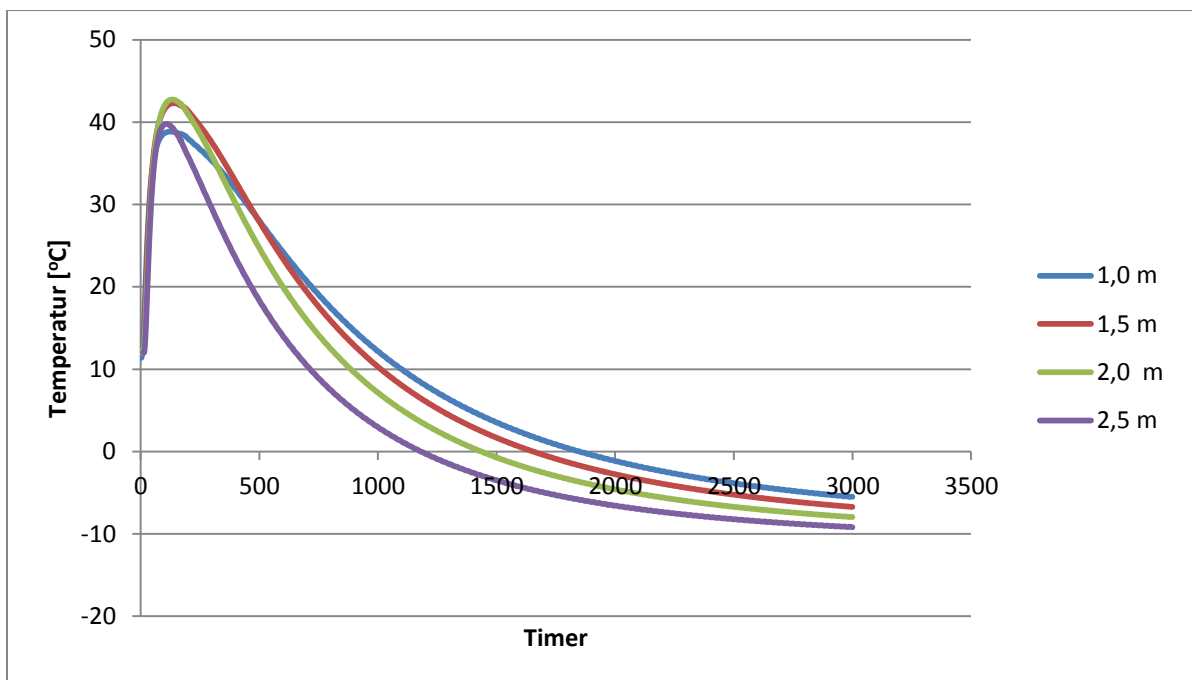
Figur 11: Geometri og FEM- nett fra CrackTeSt COIN



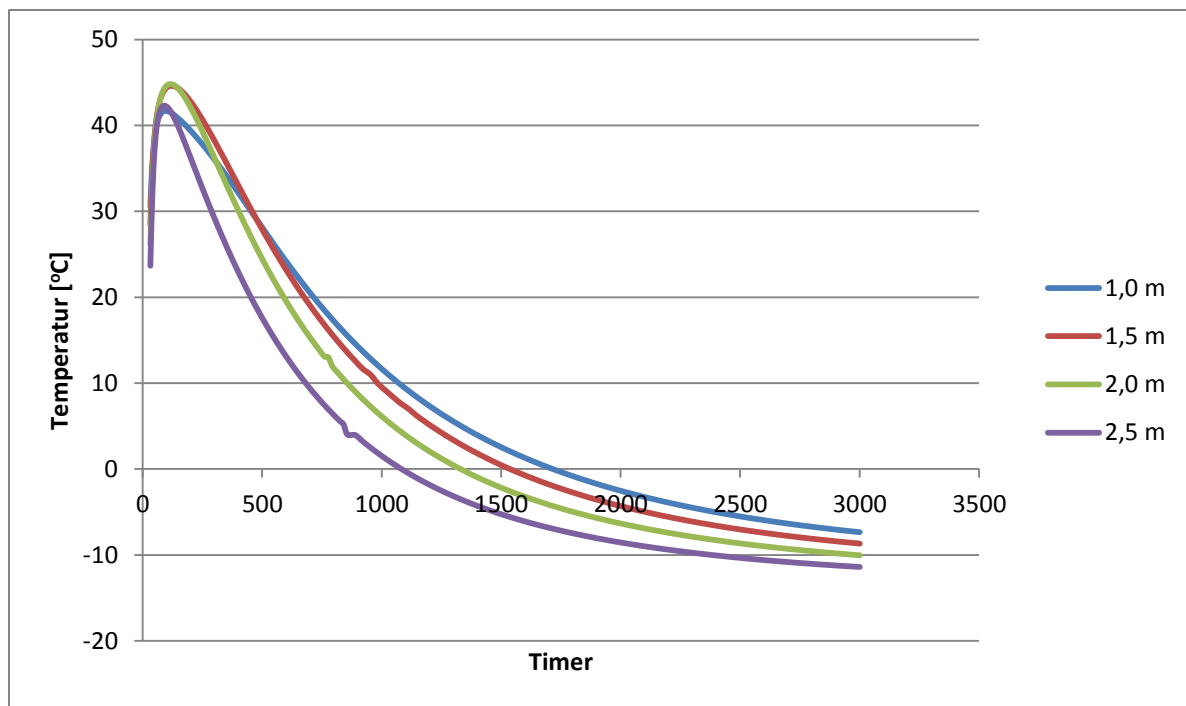
**Figur 12: Geometri og FEM- nett fra 4C Temp&Stress**

### 3.5.1. Resultater fra simuleringene

Under følger resultatene for simulering av temperatur for 4C Temp&Stress og CrackTeSt COIN.



**Figur 13: Temperaturforløp, 4C Temp&Stress**



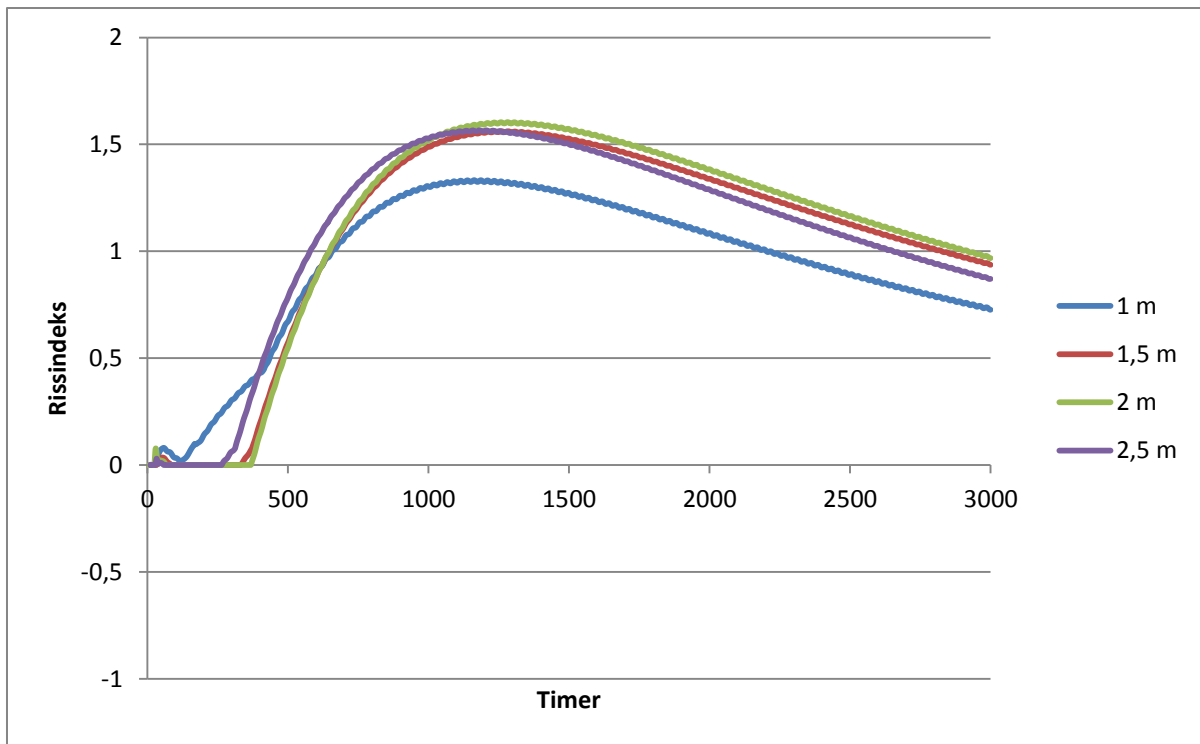
**Figur 14: Temperaturforløp, CrackTeSt COIN**

Som vi ser av figur 13 og 14, er det noe forskjell i temperaturforløpet mellom de to programmene. Grunnen til dette kan være at varmeutviklingen i betongen ikke er 100 % lik i begge modellene. Parameterne for varmeutviklingen i 4C Temp&Stress tar utgangspunkt i en lavvarmebetong med 40 % flyveaske. Resepten finnes i vedlegg G. For å finne tilsvarende parametere for CrackTeSt COIN, må de danske parameterne konverteres. Denne prosessen er ikke helt uten avvik.

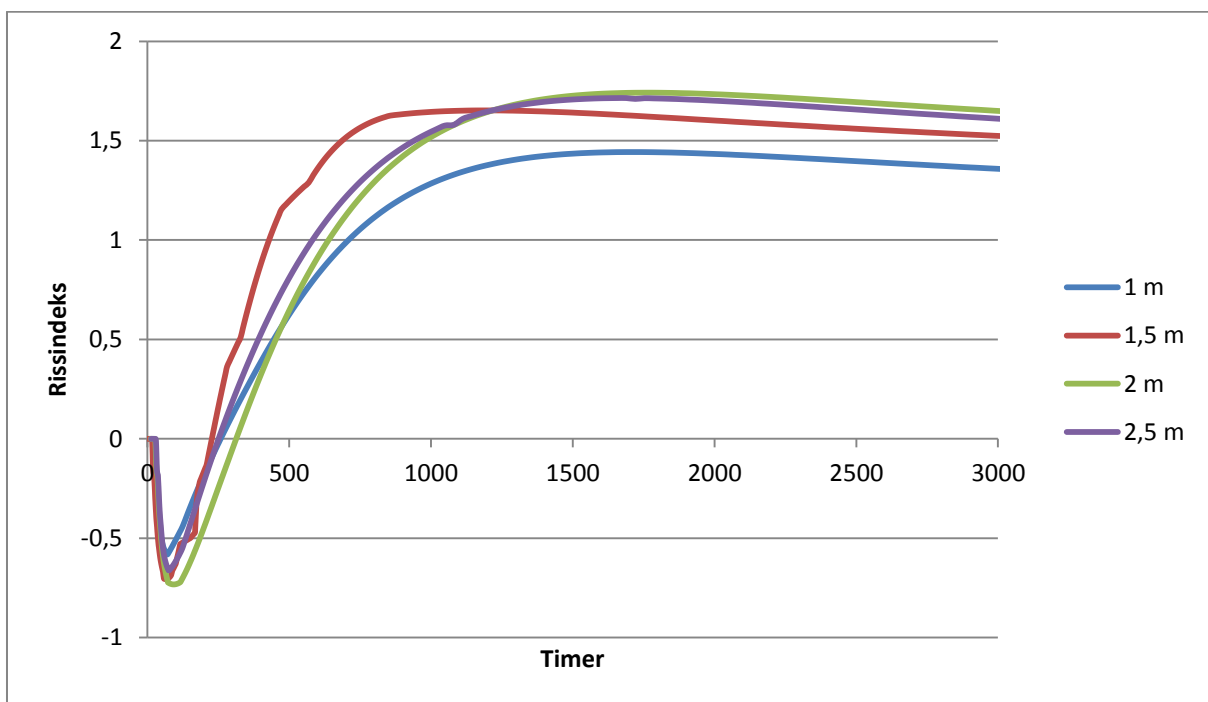
En annen grunn kan være at det har vært vanskelig å få nøyaktig de samme verdiene for de termiske konveksjonstallene for henholdsvis forskaling, fjell og frie flater. I CrackTeSt COIN må disse tallene bestemmes ved å velge materialer fra en database. Vindhastigheten er regulert slik at verdiene er likest mulig. Vindhastigheten i CrackTeSt COIN er derfor satt til 1,45 m/s.

I teorien, og under helt ideelle forhold, skal 4C Temp&Stress og CrackTeSt COIN gi like resultater med tanke på temperaturforløpet.

Når vi ser på beregningene av rissindeksen, ser vi at resultatene er ganske forskjellige. Grunnen til dette er at programmene bruker to forskjellige modeller for å beskrive krypbidraget fra betongen. Dette gir stort utslag på langtidsvirkningen av rissindeksen. Av figur 15 og 16 ser vi tydelig at en stivere kryptmodell gir større rissindeks, spesielt etter lang tid (3000 timer).

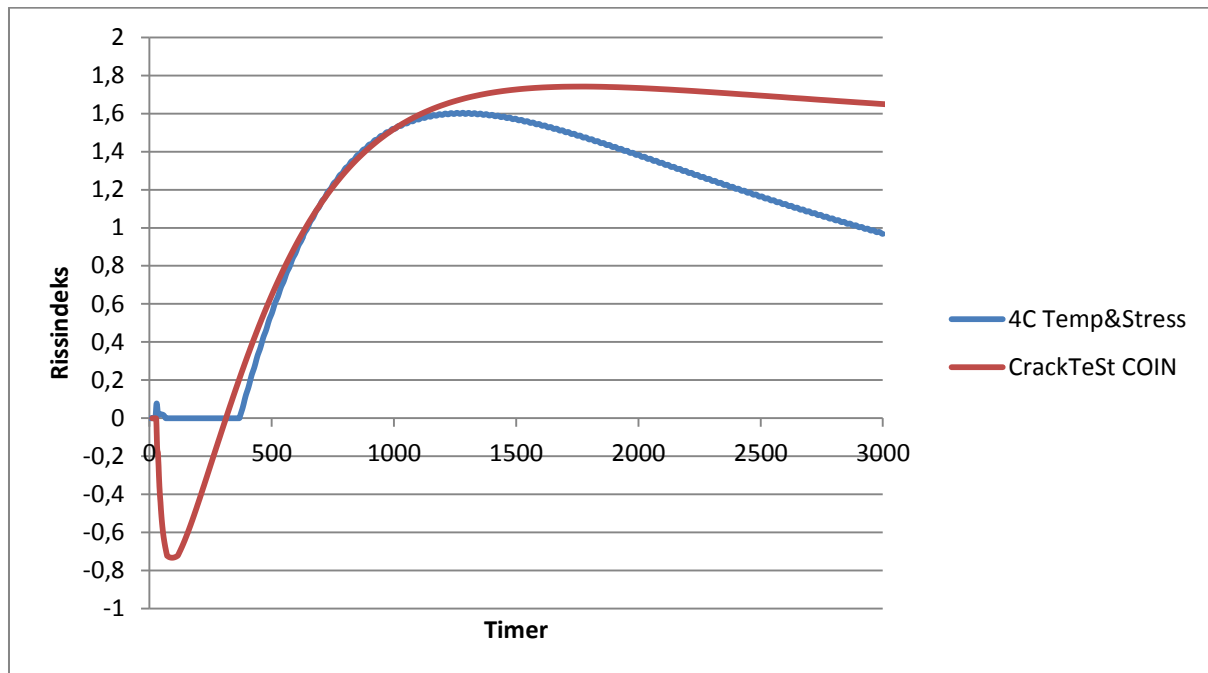


Figur 15: Rissindeks, 4C Temp&Stress



Figur 16: Rissindeks, CrackTeSt COIN

Ved å se på rissindeksen i et gitt punkt, ser man dette enda tydeligere.



Figur 17: Sammenlikning av rissindeks i begge programmene i samme punkt

I tabellen under er resultatene oppsummert. Her ser vi at temperaturene i 4C Temp&Stress er noe lavere enn i CrackTeSt COIN. Grunnen til dette kan være at konverteringen av parameterne for betongen fra den danske til den svenske modellen ikke er 100 % god. En annen grunn kan være at modellene ikke kan lages 100 % like i de forskjellige simuleringprogrammene. Forskjellen i rissindeks kan forklares ved at CrackTeSt COIN har en stivere krypmodell.

	Temperatur		Rissindeks	
	Maksimum	Differanse	Maksimum	Ved 3000 timer
<b>4C Temp&amp;Stress</b>	43°C	51°C	1,6	0,97
<b>CrackTeSt COIN</b>	44°C	53°C	1,75	1,65

Tabell 2: Oppsummering





## 4. Massiv betongdam på Skardfoss

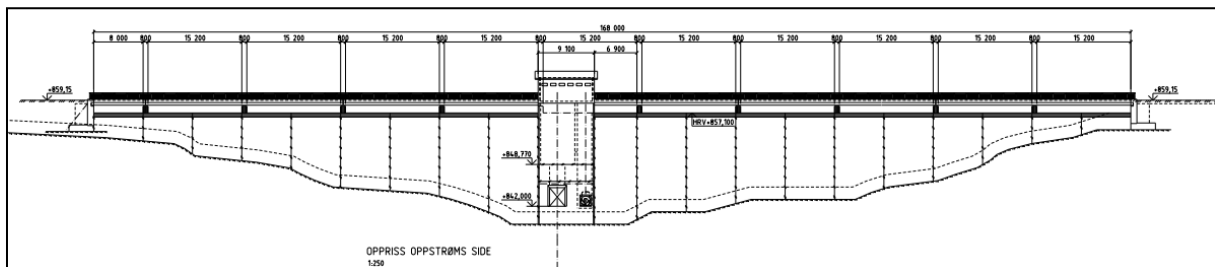
### 4.1. Innledning

Skanska skal bygge en ny massivdam i betong på Skardfoss ved Rjukan i Tinn kommune i Telemark. Den nye dammen skal bygges nedstrøms for den gamle, som er i ganske dårlig forfatning. Den gamle dammen er utsatt for alkalie- og frostskafer over lang tid.

Betongdammen som skal bygges, er en del av Norsk Hydros oppgradering av Rjukanstrengen. Denne “strengen” er et sammenhengende system, som består av fem vannkraftanlegg. Kraftverkene er Frøystul, Vemork, Såheim, Moflåt og Mæl. Dette er kraftverk av varierende størrelse og produksjonskapasitet. Alle kraftverkene har Møsvatn som magasin.

Dammen på Skardfoss skal bygges som en gravitasjonsdam i betong. Dimensjonene til denne konstruksjonen er forholdsvis store. På det største er dammen omtrent 17 meter høy, og 17,5 meter i bunnen ned mot fjellet. Dammen spenner over 168 meter.

Det skal også bygges en veibane på toppen av dammen, slik at trafikk kan krysse dammen. Veibanen er hevet over toppen på selve dammen. Dette gjør at vannstanden kan stige til over toppen av dammen uten å skade veibanen. Midt på dammen skal det bygges et lukehus med tappeluker. Disse lukene skal brukes til å tappe dammen for vann hvis dette blir nødvendig. Ytterligere tegningsgrunnlag for Skardfossdammen finnes i vedlegg C.



Figur 18: Plantegning Skardfoss



**Figur 19: Plassering av Skardfossdammen**

#### **4.2. Betong og logistikk**

Hvordan produksjonen av dammen skal gjennomføres er i skrivende stund ikke helt fastslått. Spesifikk betongresept og utleggingsteknikk er ikke bestemt. Siden dammen er en massiv gravitasjonsdam i betong, vil betong være hovedkomponenten i konstruksjonen. Dammen består av et stort betongvolum. Derfor er det viktig å legge til rette for en god og smidig levering og utlegging av betongen. Unicon er bestemt som leverandør av betong for konstruksjonen. I samråd med Unicon har Skanska planlagt produksjonen med et mobilt blandeverk med effektiv minimumskapasitet på 30 m<sup>3</sup> pr time, i tillegg til det eksisterende blandeverket utenfor Rjukan. Det eksisterende verket har en effektiv kapasitet på omtrent 20 m<sup>3</sup>. Til sammen vil Unicon kunne levere omtrent 50 m<sup>3</sup> betong i timen.

Støpetappene som utgjør selve dammen blir forholdsvis store. Det er med andre ord snakk om store betongvolum. Foreløpig er det beregnet at det skal være dilatasjonsfuger for hver 8. meter. Dette kan sees ut ifra plantegningene i vedlegg C. Det betyr at en eventuell støpetappe kan bli på hele 1156 m<sup>3</sup>, grovt regnet. Hvis støpen går kontinuerlig, og man kan motta 50 m<sup>3</sup> betong i timen på anleggsplassen, vil støpen ta i overkant av 23 timer.

Hele konstruksjonen vil i følge Skanska inneholde omtrent 25 000 m<sup>3</sup> betong. Det tilsvarer omtrent 3125 lass med betong, hvis vi regner med at én betongbil kan levere 8 m<sup>3</sup>. Hvis blandeverkene kan levere 50 m<sup>3</sup> pr time, tilsvarer dette en betongleveranse på 7 biler i timen. Stor trafikk av biler krever god logistikk og kontroll. Det er viktig å unngå at biler hopper seg opp. Hvis ikke veinettet, utleggingsplassen eller utleggingsutstyret tåler et så stort antall betongbiler, bør andre alternativer vurderes.

Det mobile blandeverket kan plasseres på anleggsplassen på Skardfoss. Da kan betongen pumpes direkte fra blanderen og rett inn i konstruksjonen. Da vil kun betongen fra det stasjonære blandeverket leveres med betongbiler. Det faste blandeverket produserer som beskrevet omtrent 20 m<sup>3</sup> pr time. Hvis hver bil frakter 8 m<sup>3</sup>, vil antall biler pr time bli 3 hele biler.

Det mobile blandeverket er avhengig av inntransport av tilslag og andre råmaterialer som er nødvendig for å produsere betongen. Det brukes omtrent 1715 kg tilslag pr m<sup>3</sup> betong som produseres, eller omtrent 0,9 m<sup>3</sup> (løst lagret). Hvis det mobile blandeverket skal produsere 30 m<sup>3</sup> pr time, vil dette tilsvare 51 450 kg, eller 27 m<sup>3</sup> tilslag hver time. Om en lastebil kan frakte 10 m<sup>3</sup> tilslag, vil dette gi at vi trenger 2,7 lastebiler i timen, kun for inntransport av tilslaget. Dette er store volum, og krever stor lagerplass.

Scenario	Transportert betong		Antall biler à 6m <sup>3</sup> /time	Behov for tilrettelegging
	Mobilt	Eksisterende		
Mobilt blandeverk på Skardfoss.	-	20 m <sup>3</sup>	2,5 = 3 hele biler	Lavt
Inntransport av tilslag på Skardfoss.	30 m <sup>3</sup>	-	2,7 = 3 hele biler	Lavt
Blandeverk på Skardfoss og inntransport av tilslag.	-	20 m <sup>3</sup>	6 hele biler	Stort
Mobilt- og fast blandeverk på Rjukan	30 m <sup>3</sup>	20 m <sup>3</sup>	6,25 = 7 hele biler	Stort

**Tabell 3: Behov for tilrettelegging**

Av tabellen ser vi at å ha det mobile blandeverket inne på anleggsplassen vil gi én bil mindre på anleggsområdet pr time. Dette er ikke store forskjellen pr time, men tilsvarer 8 biler mindre hver arbeidsdag. Dermed ser vi at kun én bil mindre vil gi vesentlig mindre anleggstrafikk.

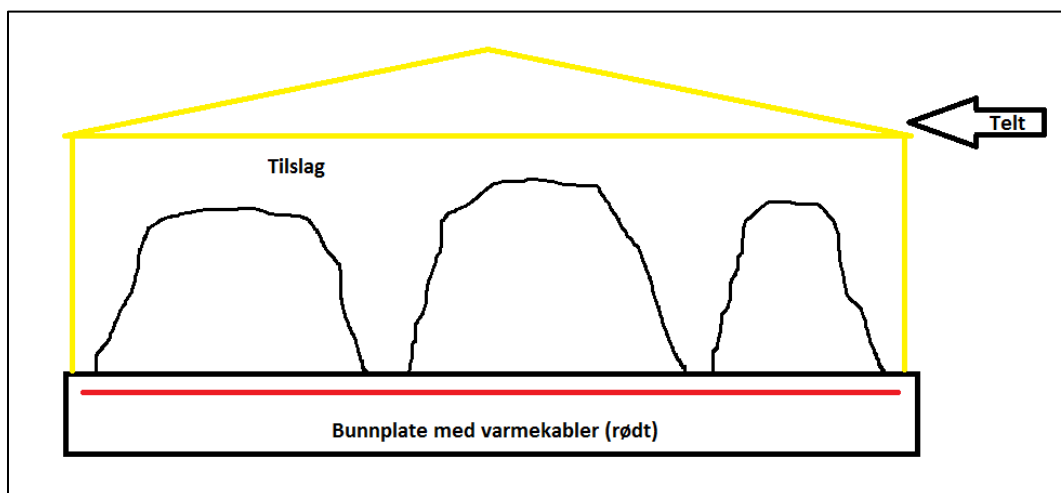
Det mobile blandeverket trenger store arealer til lagring av råmaterialer. Som vi ser av utregningene, vil det gå med 27 m<sup>3</sup> løst lagret tilslag i timen. Hvis vi tenker oss at tilslaget kan lagres i 2 meter høye binger, vil betongproduksjonen forbruke et lagerareal tilsvarende 13,5 m<sup>3</sup> meter/ time.

For å ha litt slakk i produksjonen, må det kunne lagres tilslag på plassen. Dette gjør at produksjonen av betong ikke stopper opp selv om en leveranse av tilslag uteblir. Hvis man regner med å kjøre inn tilslag kun én gang i uken, trenger man et lagringsareal på minimum 540 m<sup>2</sup>. Dette kommer frem av tabell 4. Antall arbeidstimer pr dag, og lagringshøyde for tilslag på 2 meter, er antatt.

Antall dager uten leveranse	Antall m <sup>3</sup> tilslag til produksjon	Lagringsplass (2m* X m <sup>2</sup> )
1 dag = 8 arbeidstimer	27 m <sup>3</sup> /time * 8 timer = 240 m <sup>3</sup>	108 m <sup>2</sup>
5 dager = 40 arbeidstimer	27 m <sup>3</sup> /time * 40 timer = 1320 m <sup>3</sup>	540 m <sup>2</sup>
7 dager = 56 arbeidstimer	27 m <sup>3</sup> /time * 56 timer = 1680 m <sup>3</sup>	756 m <sup>2</sup>

Tabell 4: Lagerareal for tilslag

For å oppnå best mulig betongkvalitet og lavest temperatur i den ferske betongen, bør tilslaget beskyttes mot frost og fuktighet. Ved å støpe en bunnplate med varmekabler og plassere et telt over, kan dette enkelt oppnås. Varmekablene sørger for at temperaturen i teltet er over frysepunktet, og teltet sørger for et lukket miljø. At tilslaget ikke fryser, gjør at man ikke trenger å tine det. Tining av tilslag gjøres ved at man varmer opp tilslaget, og en lav fersk betongtemperatur blir vanskelig å oppnå da tilslaget blir forholdsvis varmt. Ved å kunne holde tilslagets fuktinnhold konstant, blir det lett å bestemme mengden vann som er nødvendig for å oppnå ønsket v/c- tall. Av tabell 4 ser vi at det er store arealer som må brukes til lagring av tilslag. Dette gjør at tilrettelegging, leie og bruk av telt og varmekabler kan bli dyrt. Figur 20 viser konseptet.



Figur 20: God lagring av tilslag på anleggsplass

Å plassere det mobile blandeverket på anleggsplassen, gjør at trafikken inn og ut av området blir mindre. Dette fordrer i midlertid tilstrekkelig lagringsplass og kapasitet til å losse råmaterialene som skal brukes av det mobile blandeverket. Dermed blir plasseringen av det mobile blandeverket en avveining mellom bruk av lagringsareal for tilslag, og kapasitet for mottak av betong.

### 4.3. Simulering av rissindeks og temperatur

Grove og massive betongkonstruksjoner vil ofte ha store problemer knyttet til termisk induserte spenninger. Dette er spenninger som utvikles på grunn av varmeutviklingen i betongen. I store betongkonstruksjoner med stort volum, vil arealet av de avkjølte flatende være forsvinnende liten i forhold til det varme volumet. Dette fører til at varmen som utvikles forblir i konstruksjonen, og kjernetemperaturen stiger.

Ytre- og indre fastholding spiller en stor rolle ved opprissing av grove damkonstruksjoner. Indre fastholding styres av temperaturgradienter mellom konstruksjonens kjerne og overflatene. Ytre fastholding vil i dette tilfellet induseres av termisk utvidelse i herdefasen, og sammentrekning i avkjølingsfasen. Fenomenene vil bidra til opprissing, men ytre fastholding er mest kritisk.

#### 4.3.1. Simuleringsmodell og parametere

Denne delen av oppgaven tar for seg en simulering av betongdammen på Skardfoss, utført i simuleringsprogrammet CrackTeSt COIN. For simuleringen er det kun brukt ett snitt. Tverrsnittet som er utgangspunktet for modellene er vist i figur 23, og vedlegg C. Simuleringsmodellene er vist i figur 21 og figur 22. Simuleringen er gjort med en lavvarmebetong, som inneholder 40 % flyveaske. Betongresepten er vedlagt i vedlegg G, og et kort sammendrag av betongens sammensetning er gitt i tabell 5.

Materiale	Mengde
Sement	201 kg/m <sup>3</sup>
Flyveaske	131 kg/m <sup>3</sup>
Silika	16 kg/m <sup>3</sup>
Tilsatt fritt vann	150 kg/m <sup>3</sup>
Effektivt v/c- tall ( $v/(c+\sum p_i \cdot k_i)$ )	0,44
Andel flyveaske	≈ 40 %

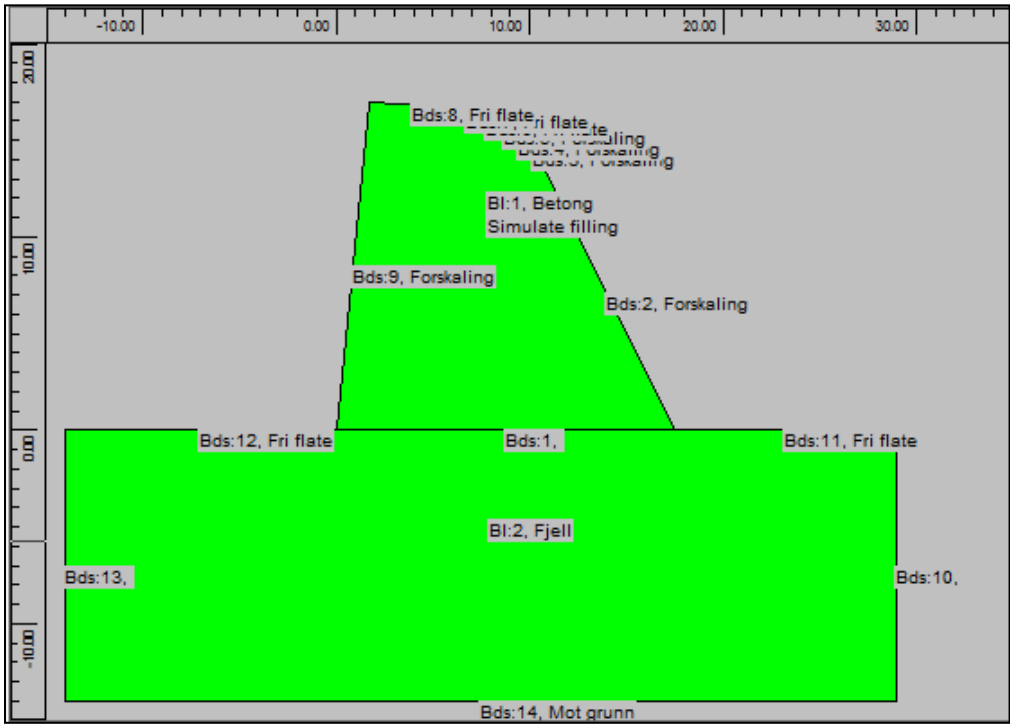
Tabell 5: Betongdata

I simuleringen er det antatt at man klarer å tilføre 20 m<sup>3</sup> betong i timen. Dette gjør at vi får en stighøyde på 2,267 meter i timen. Hvis vi regner med at tverrsnittet utgjør ca. 150 m<sup>3</sup> betong, tar støpen 7,5 timer. I virkeligheten vil man kunne ta imot mer en 20 m<sup>3</sup> betong i timen ved Skardfosdammen.

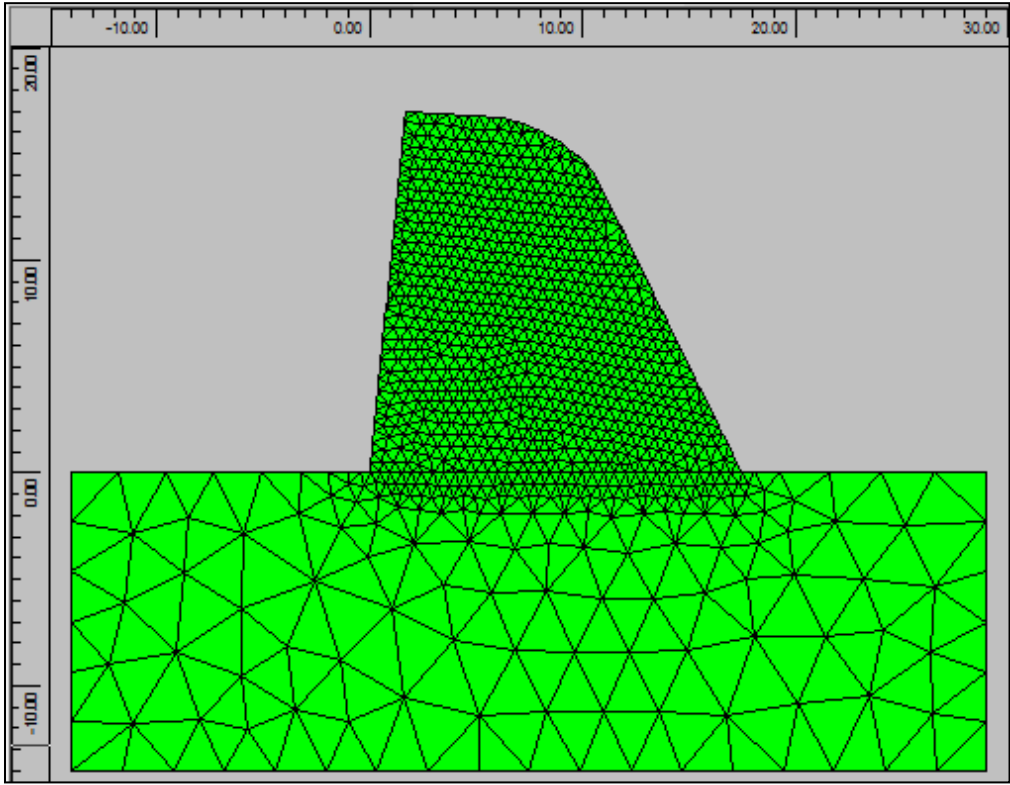
Parameter	Verdi
Lufttemperatur	5°C
Fersk betongtemperatur	15°C
Fjelltemperatur	0°C
Konveksjonstall, forskaling	4,14205 [W/(K*m <sup>2</sup> )]
Konveksjonstall, friluft	9,45966 [W/(K*m <sup>2</sup> )]
Konveksjonstall, grunn	200 [W/(K*m <sup>2</sup> )]
Forskalingstid	144 timer

Tabell 6: Modellparametere

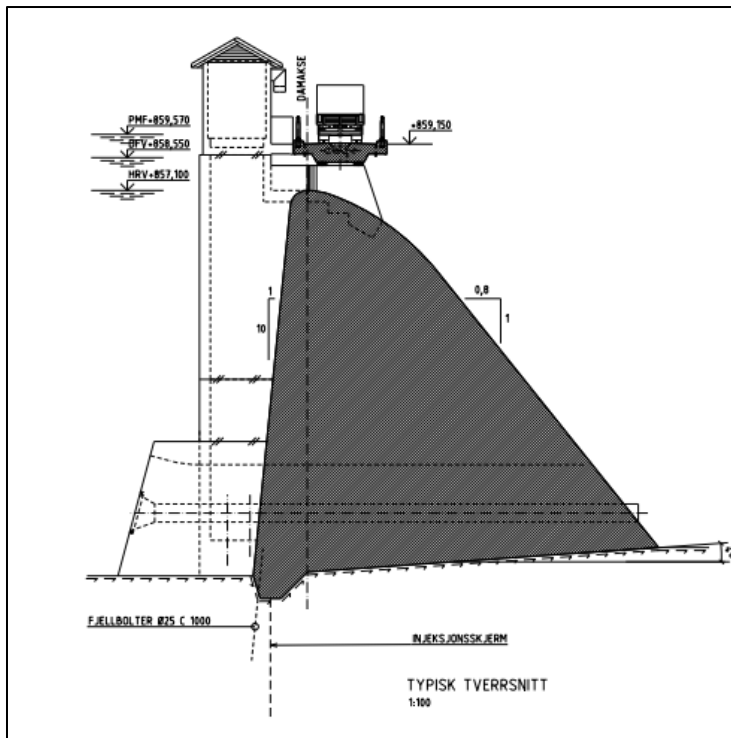
Modellen som er simulert, er et tenkt vertikalsnitt gjennom konstruksjonen, basert på plantegningene for dammen. I figur 21 og figur 22 er simuleringsmodellen vist, både med og uten FEM- nett.



Figur 21: Geometri og flater



Figur 22: FEM- nett

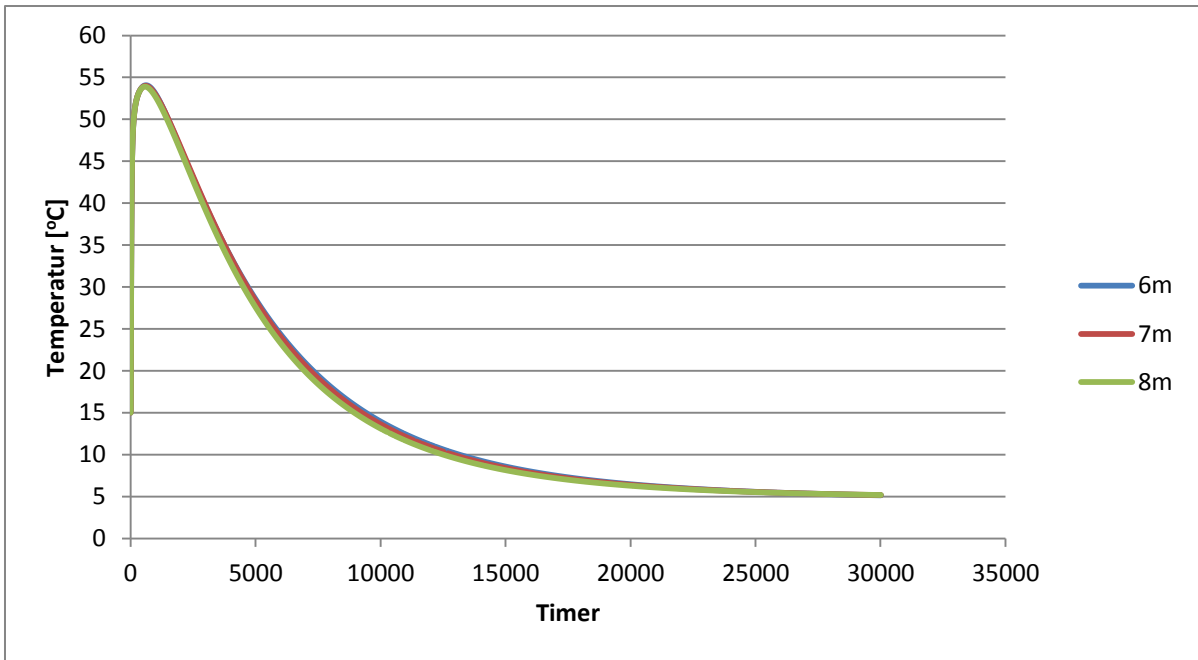


Figur 23: Plantegning av simulert snitt

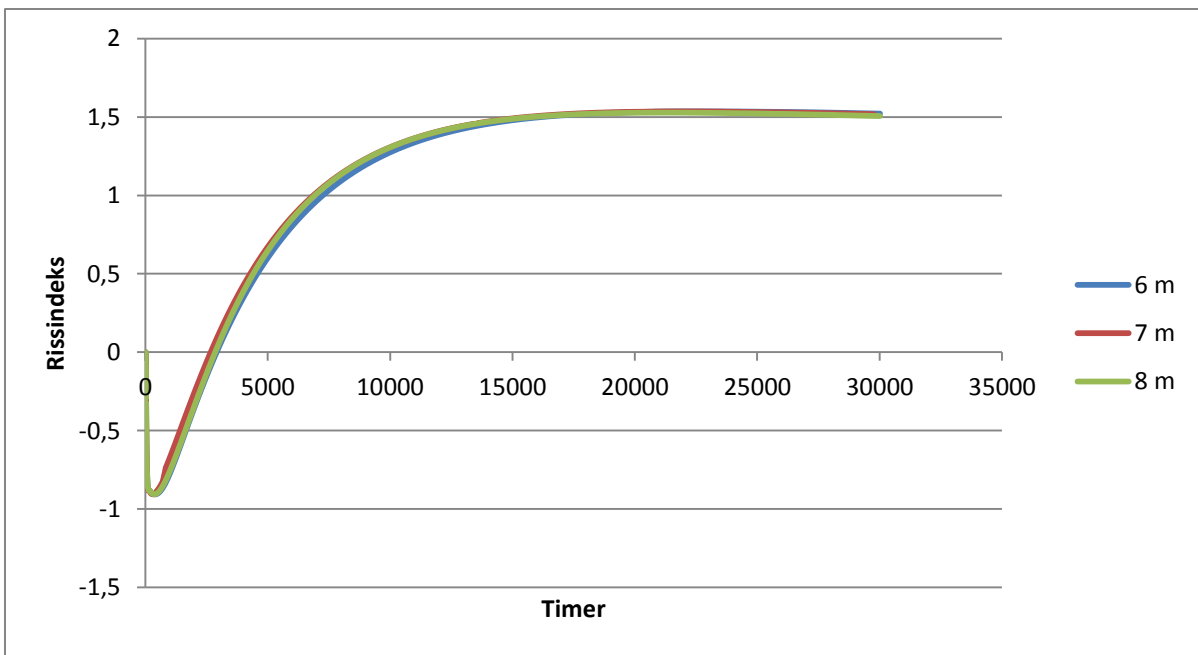
#### 4.3.2. Resultater

Simuleringen i CrackTeSt COIN gir resultater med tanke på temperatur og rissindeks. Resultatene viser temperatur og rissindeks for punkter midt i konstruksjonen.

Som vi ser av figur 24, blir maksimaltemperaturen i konstruksjonen omtrent  $54^{\circ}\text{C}$ . Dette er en temperaturøkning på  $39^{\circ}\text{C}$ , fra betongens utgangstemperatur. Den totale temperaturdifferansen mellom topp- og bunnpunkt er  $49^{\circ}\text{C}$ . Siden konstruksjonen er så massiv, vil ikke total temperaturlikevekt med omgivelsene skje før etter omtrent 30 000 timer. Dette tilsvarer omtrent 3,4 år.



Figur 24: Temperatur



Figur 25: Rissindeks



Når det gjelder rissindeksen, ser vi at den er omtrent 1,5. Dette betyr at strekkspenningene i konstruksjonen overskrider betongens strekkfasthet med 50 %. Dette vil føre til opprissing. Høy rissindeks gir flere og beredere riss en lavere rissindeks. I dette tilfellet vil vi få en betydelig opprissing, som kan gjøre konstruksjonen mindre tett.

Riss gjør at vann og aggressive ioner lettere trenger inn i konstruksjonen. Dette kan føre til store skader. Inntrenging av vann kan forårsake skader grunnet frostspreng og utvasking. Frostspreng skjer når fritt vann inne i sprekker og riss fryser. Vann utvider seg omtrent 8 % når det fryser (1). Dette gjør at isen kan påføre konstruksjonen store påkjenninger. Gjentatte tine- og frysesykluser i betong gir store skader over tid. Inntrenging av aggressive ioner som klor, kan føre til økt armeringskorrosjon.



## 5. Tiltak for å begrense opprissing

Som vi ser fra forrige kapittel, vil Skardfossdammen risse opp. Ved å ta i bruk enkelte tiltak kan rissindeksen senkes. En del av løsningen kan være å begrense temperaturen i den herdende konstruksjonen. Høye herdetemperaturer gjør at den ferdig herdete konstruksjonen får en lavere fasthet. I tillegg gjør høye herdetemperaturer at indre fastholding kan bli et problem. Temperaturforskjellen mellom den herdende konstruksjonen og tilstøtende flater bidrar også til opprissing (1).

Ytre fastholding er ofte en stor bidragsyter til opprissing. Fastholdingen er hovedsakelig induert av betongens termiske ekspansjon i herdefasen, og sammentrekning i avkjølingsfasen. Hvis man kan motvirke utvidelse under herding og sammentrekning under avkjøling, vil effekten av denne typen problemer reduseres vesentlig. Stivheten og heften mot tilstøtende materialer har også en innvirkning på opprissingen.

En kombinasjon av å minimere temperaturen i den herdende konstruksjonen, og redusere stivhetsforskjellene mot tilstøtende materialer kan være svært effektivt. Kanskje må det brukes en kombinasjon av flere forskjellige tiltak for å redusere rissindeksen i Skardfossdammen til et akseptabelt nivå.

I denne oppgaven skal vi se på følgende tiltak for å begrense opprissing i konstruksjonens herdefase:

1. Bruk av betong med flyveaske. Ved bruk av flyveaske som erstatning for sement, er det bevist at betongens herdetemperatur synker. Bruk av større mengder flyveaske i betongen vil kanskje redusere temperaturen tilstrekkelig. Ved bruk av større mengder flyveaske i betongen er det imidlertid viktig å huske på at dette endrer en del av betongens egenskaper. Spesielt med tanke på betongens fasthetsutvikling (5).
2. Ved å bruke mange fraksjoner i tilslaget i betongen vil siktekurven bli lang. Lange siktekurver gir mindre hulrom i tilslaget (1). Siden matriksen i betongen (sement + finstoff + vann) skal fylle dette hulrommet, vil det bli behov for mindre matriks. Når vi trenger mindre matriks, kan sementinnholdet i betongen reduseres. Dette vil igjen bidra til å senke herdetemperaturen i konstruksjonen.
3. Ved å erstatte noe av det tilsatte vannet i betongen med knust is, kan den ferske betongtemperaturen senkes betraktelig. Lav fersk betongtemperatur vil gi en lav maksimal herdetemperatur (11). Det er i midler tid viktig å tenke på at betongen ikke må være så kald at hydratiseringsprosessen ikke starter. Betongen må ha en trykkfasthet på minst 5 MPa før betongtemperaturen når 0°C for unngå skader i betongen (10).

4. For å unngå fastholding kan man legge inn et sjiktmateriale med lav E- modul og høy elastisitet mellom fjellet og betongen. Dette fører til at fjellet og betongen ikke får direkte kontakt, og fastholdingsgraden reduseres. Sjiktet må kunne ta opp en del av den termiske volumutvidelsen i den herdende konstruksjonen, uten å overføre dette ned til fjellet.

Det er imidlertid viktig å tenke på at tiltaket ikke må svekke konstruksjonssikkerheten. Bruk av et slikt sjikt vil kanskje minske konstruksjonens integritet, og påvirke dimensjonerende faktorer. Selv om dette tiltaket kan redusere rissindeksen, må det også oppfylle de krav som stilles til dimensjonering og sikkerhet. Dette kan gjøre at tiltaket kanskje ikke er aktuelt å gjennomføre.

Det finnes også andre metoder man kan bruke for å motvirke riss i en konstruksjon. Disse metodene nevnes her, men utdypes ikke videre i oppgaven. Dette er metoder som er i bruk i dag. Metodene er velprøvd, og gir resultater (2).

5. For å redusere herdetemperaturen kan man støpe inn kjølerør i konstruksjonen. Dette er oftest stålrør med en diameter på 30 millimeter. Gjennom disse rørene sirkulerer det kaldt vann eller kjølevæske. På den måten kan man kjøle ned konstruksjonen på en god måte, ved at varmen transporteres ut med kjølevannet. For å optimere effekten av denne typen kjøling, kan ikke sløyfen være for lang. Kjøleanlegget må dimensjoneres slik at maksimaltemperaturen i den herdende konstruksjonen reduseres tilstrekkelig. I dette tilfellet er det realistisk å senke maksimaltemperaturen med 7- 10°C. Etter at kjølingen er ferdig, injiseres rørene med sementslurry (2, 6, 11).

En slik måte å kjøle den aktuelle konstruksjonen på vil være noe effektiv, men komplisert. I en stor konstruksjon må rørene settes rimelig tett (omtrent 50 cm). Montasjen og oppriggingen er en stor og komplisert jobb, som tar mye tid sett i forhold til hvor stor effekt tiltaket gir. Kostnaden for dette tiltaket er moderat. Tiltaket kan estimeres til 200- 300 kr/m<sup>3</sup>, og en temperaturreduksjon på 7- 10°C (6, 11). Hvis vi regner med at det simulerte tverrsnittet for Skardfossdammen rommer 150 m<sup>3</sup>, vil kjølekostnaden bli 30 000- 45 000 kr. Dette tilsvarer omtrent 5 000 000- 7 500 000 kr for hele konstruksjonen.

6. Et annet tiltak som kan brukes er å varme opp fjellet der konstruksjonen skal bygges. Dette gjør at temperaturforskjellen mellom betongen og fjellet synker, som gir mindre risiko for opprissing. For å varme opp fjellet kan man bore varmebrønner eller bruke varmekabler og gassovner. Effekten av et slikt tiltak er imidlertid noe usikker, da fjellet kan "ta unna" svært store mengder varme. Dette gjør at fjellet må tilføres veldig store mengder varme for å endre temperaturen vesentlig. Kostnadene ved et slikt tiltak er usikre. Noe som er sikkert, er at det vil bli dyrt i forhold til hvor liten effekt tiltaket vil gi.

7. For å senke den ferske betongtemperaturen kan man kjøle ned betongen med flytende nitrogen. Flytende nitrogen holder mellom  $-195,8^{\circ}\text{C}$  og  $-210,0^{\circ}\text{C}$ . Dette er en effektiv måte å få ned den ferske temperaturen på. Metoden er lite brukt i Norge i dag og er effektiv, men kostbar (2).

Nitrogen koster mye penger, og riggekostnadene er også høye. Prisen ligger på omtrent  $2,80 \text{ kr/kg} + \text{riggekostnader}$  og leie av tanker. Forbruket av nitrogen kan estimeres til ca.  $10 \text{ kg}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^3)$ . Dette gir en kjølekostnad på opp mot  $30 \text{ kr}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^3)$ . Med utgangspunkt i dette, vil kjølekostnaden for det simulerte tverrsnittet bli  $4500 \text{ kr}/^{\circ}\text{C}$ . For hele konstruksjonen blir dette  $750\,000 \text{ kr}/^{\circ}\text{C}$ . Dette vil i de fleste sammenhenger være en uakseptabelt høy kostnad (2).

I denne oppgaven skal vi se nærmere på de tiltakene som er spesielt interessante for dammen på Skardfoss. Dette er tiltak 1- 4.

### 5.1. Tiltak 1: Flyveaske i betong

Mengden flyveaske i betongen som produseres kan ha stor innvirkning på den isoterme varmeutviklingen. Det er bevist at bruk av flyveaske i betong, reduserer betongens varmeutvikling. I dette kapitlet skal vi se hvordan rissindeksen vil utvikle seg når økende andel av sementen i betongen byttes ut med flyveaske.

Når mengden flyveaske i betongen øker, vil dette påvirke betongens egenskaper. Egenskaper som påvirkes er blant annet fasthetsutvikling, trykkfasthet, varmeutvikling, aktiveringsenergi og E- modulutvikling (3, 4, 5).

#### 5.1.1. Endring av betongparametere og andel flyveaske

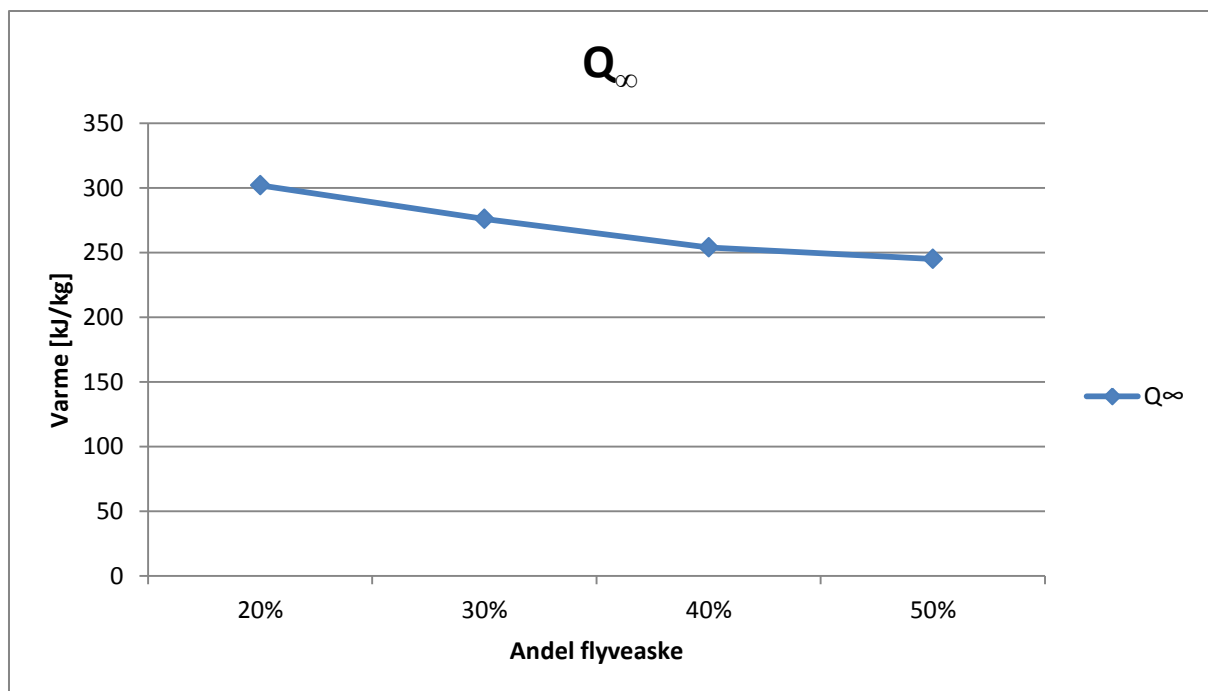
I tabellen under, er de aktuelle parameterne som er brukt i simuleringen gjengitt. Som vi ser av tabellen, endrer parameterne seg med økende andel flyveaske i betongen. Det er verdt å merke seg at varmeutviklingen i betongen synker, mens fastheten og E- modulen reduseres. Parameterne i tabellen under har utgangspunkt i den danske modellen omtalt i kapittel 2. Parameterne er funnet fra forsøksrapporter fra Sintef COIN og NCC. Disse rapportene finnes i vedlegg F.

Parameter	20 % FA	30 % FA	40 % FA	50 % FA	
$Q_{\infty}$ [kJ/kg]	302	276	254	240	
E- modul (28 dager) [GPa]	28,5	28,2	27,9	27,6	
$f_c$ (28 dager) [MPa]	53	51,9	50	36	
$f_t$ (28 dager) [MPa]	4,4	4,3	4	2,7	
Aktiveringsenergi	A [J/mol]	32000	35000	37186	40000
	B [J/(mol $\cdot^{\circ}\text{C}$ )]	500	500	501	500

Tabell 7: Endring av betongparametere med økende andel flyveaske

Betongens totale varmeutvikling betegnes  $Q_{\infty}$ . Som tabell 7 og figur 26 viser, synker denne med økende andel flyveaske. Dette kan forklares med at når en større del av sementen erstattes med aske, vil hydrasjonsprosessen gå saktere. Grunnen til dette er at flyveaske er mindre reaktiv enn sement. Dermed får vi en tregere varmeutvikling i betongens herdefase, og maksimaltemperaturen reduseres. I tillegg vil den totale adiabatisk varme som betongen produserer synke. Dette skjer siden vi bytter ut reaktiv sement med et mindre reaktivt pozzolan.

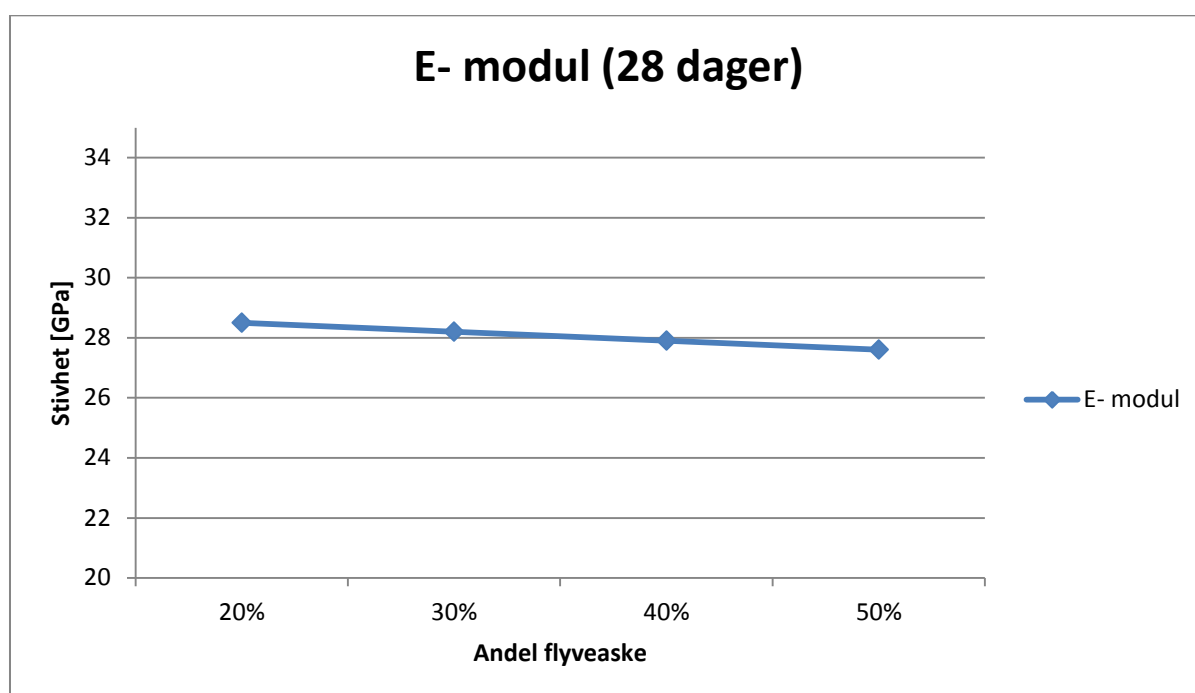
Verdiene for  $Q_{\infty}$  er hentet fra forsøksdata fra Sintef COIN. Verdien for 50 % flyveaske er stipulert ut ifra disse forsøksdataene, og en beregnet reduksjonsfaktor. Reduksjonsfaktoren er beregnet ved å se på endringen i  $Q_{\infty}$  i forhold til andel flyveaske.



Figur 26: Total varme

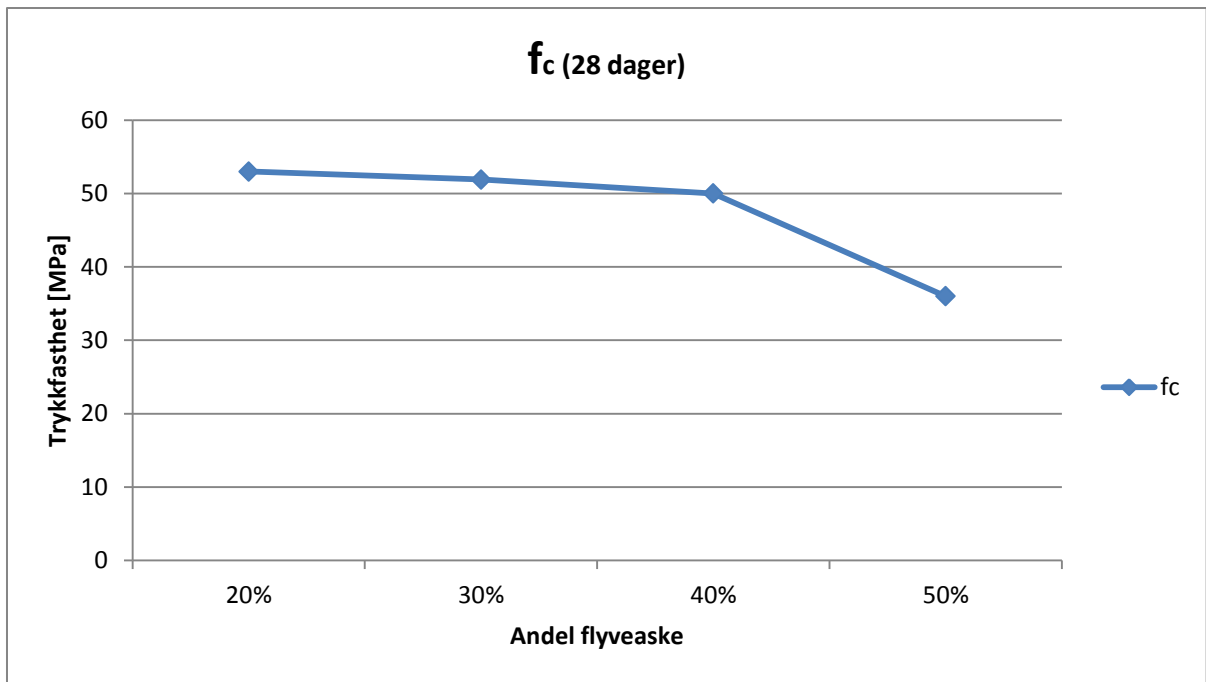
Verdiene for betongens E- modul i tabell 7 er funnet fra betongdata gitt av NCC for 50 % og 30 % innblanding av flyveaske. Endringen i E- modul er i denne oppgaven antatt å være lineær. Verdiene for 20 % og 40 % aske er funnet ved hjelp lineær stipulasjon.

Størrelsen på E- modulene er ganske forskjellige fra den som er brukt tidligere i oppgaven. I kapittel 4 er det brukt en 28 dagers E- modul på 39,84 GPa, noe som gir en vesentlig stivere betong. Ved å bruke en lavere E- modul, vil den simulerte rissindeksen synke. Dette skjer siden stivheten til betongen er lavere, og effekten av ytre fastholding vil bli mindre. Dette gjør at resultatene vi finner for rissindeks i dette delkapittelet ikke kan sammenliknes direkte med resultatene fra andre kapitler. Resultatene fra dette kapittelet sier imidlertid noe om forholdet mellom de forskjellige betongene som er simulert. Dette forholdet er direkte anvendbart, da rissindeks skalerer med E- modul.

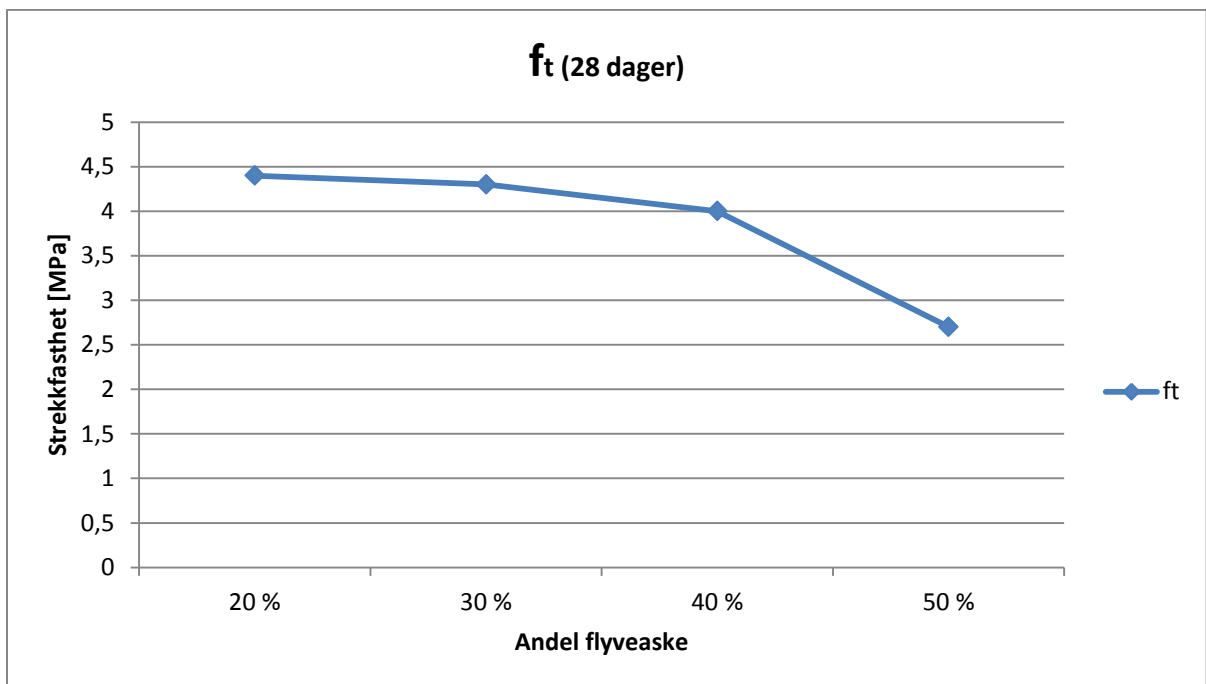


Figur 27: E- modul

Strekk- og trykkfasthet er også påvirket av andelen flyveaske i betongen. Med høyere andel innblandet flyveaske, vil 28- dagers fasthet synke. Grunnen til dette er at mindre sement og større andel flyveaske resulterer i en tregere kjemisk reaksjon. Dette gjør at betongens egenskaper utvikler seg saktere. Dermed vil 28 dagers trykk- og strekkfasthet ikke kunne utvikles like raskt i en betong med 50 % flyveaske som i en normal portlandsement. Det er derfor viktig å finne et balansepunkt mellom ønsket varmeutvikling og ønsket fasthet i ung betong. Over lang tid vil imidlertid betonger med flyveaske utvikle en høyere trykkfasthet enn betonger uten flyveaske (1). Verdiene er funnet fra forsøksdata fra Sintef COIN og NCC.



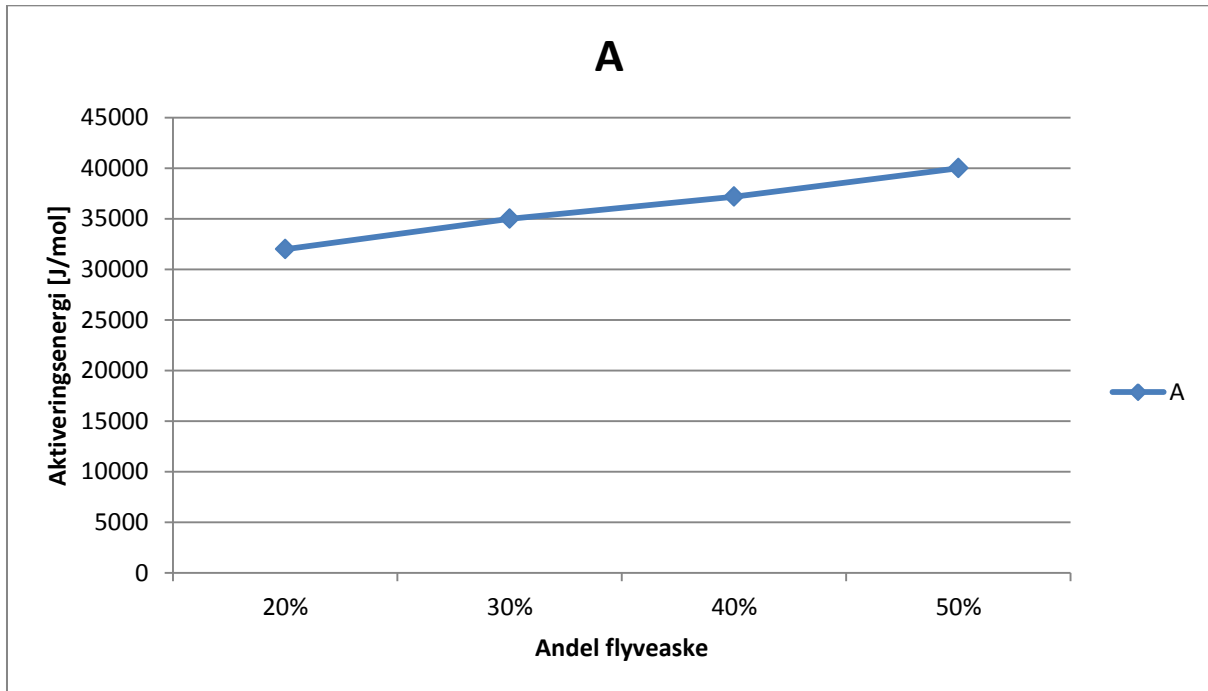
Figur 28: Trykkfasthet



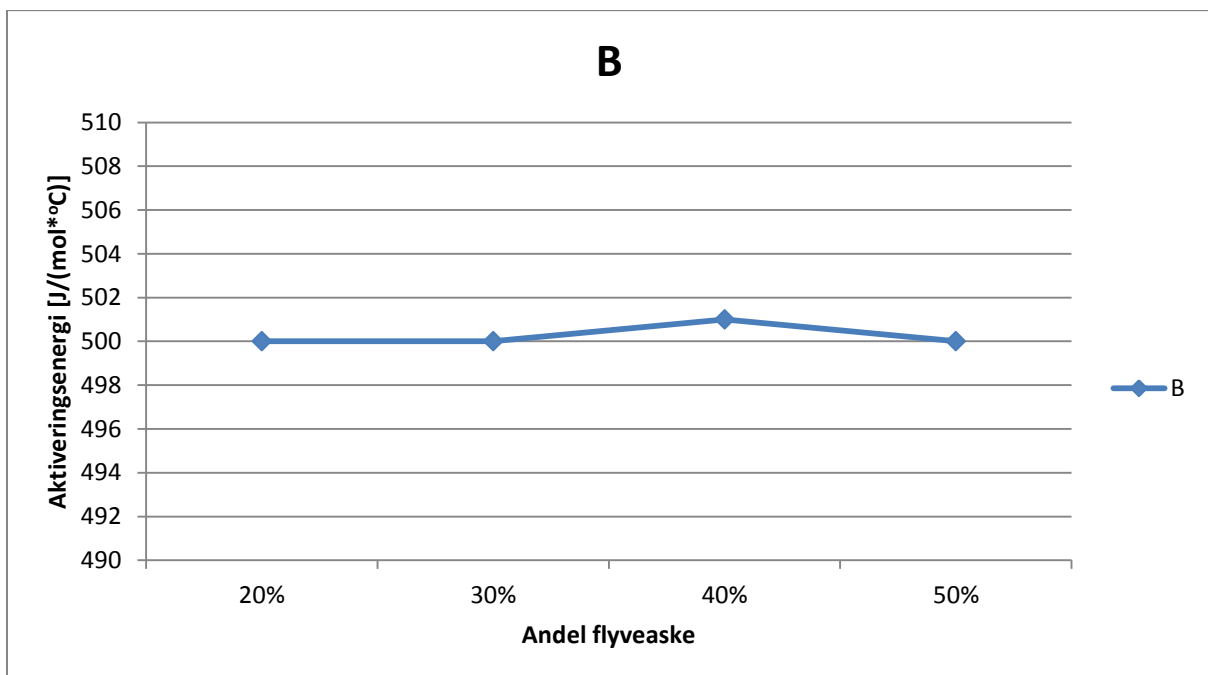
Figur 29: Strekkfasthet



Verdiene for aktiveringsenergi er funnet fra forsøksdataene gitt av Sintef COIN og NCC. Aktiveringsenergien for 50 % flyveaske er stipulert med utgangspunkt i data fra de andre betongene. Av verdiene, ser vi at A øker, mens B er forholdsvis konstant. Ut i fra dette kan vi si at aktiveringsenergien øker for betonger med økende mengde flyveaske. Det vil si at vi trenger mer energi for å starte den kjemiske reaksjonen i betongen når mengden flyveaske er stor.



Figur 30: Aktiveringsenergi, parameter A

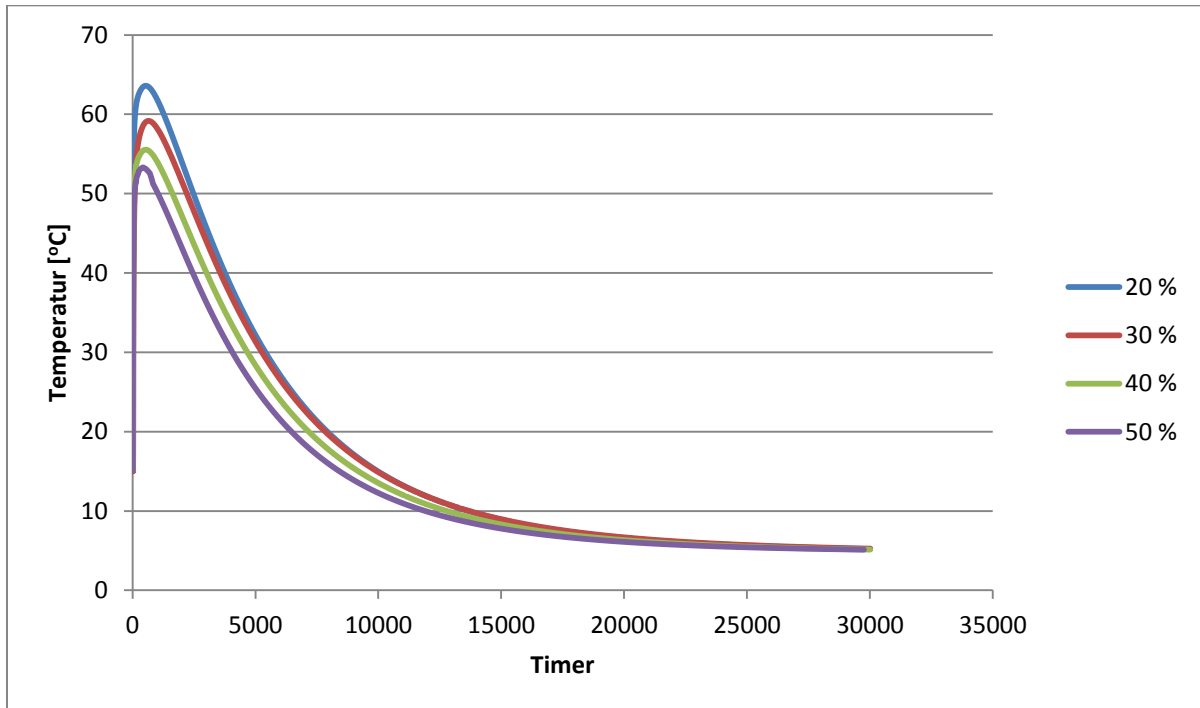


Figur 31: Aktiveringsenergi, parameter B

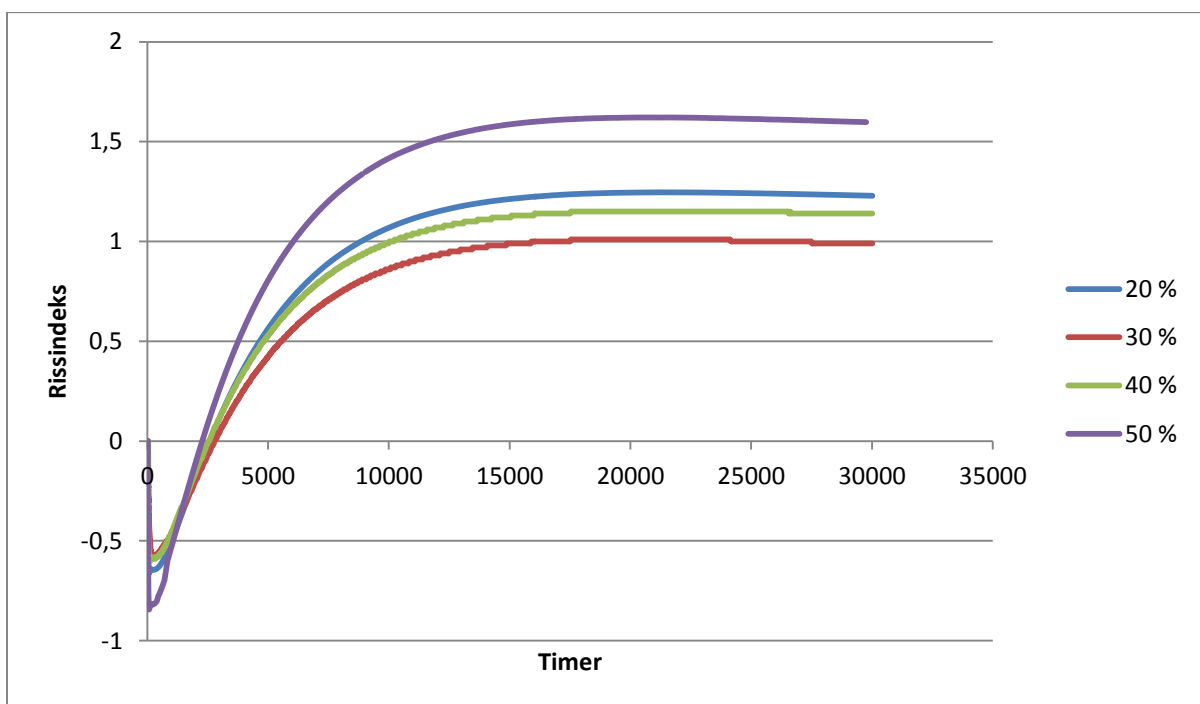
### 5.1.2. Simulering av rissindeks og temperatur

Modellen og parameterne som brukes i simuleringen, er de samme som er brukt i kapittel 4. Betongparameterne i tabell 7 er oppgitt etter den danske modellen. For å bruke disse i simuleringprogrammet CrackTeSt COIN, er de konvertert og tilpasset den svenske modellen.

Resultatene fra simuleringen vises i figur 32 og figur 33.



Figur 32: Temperatur



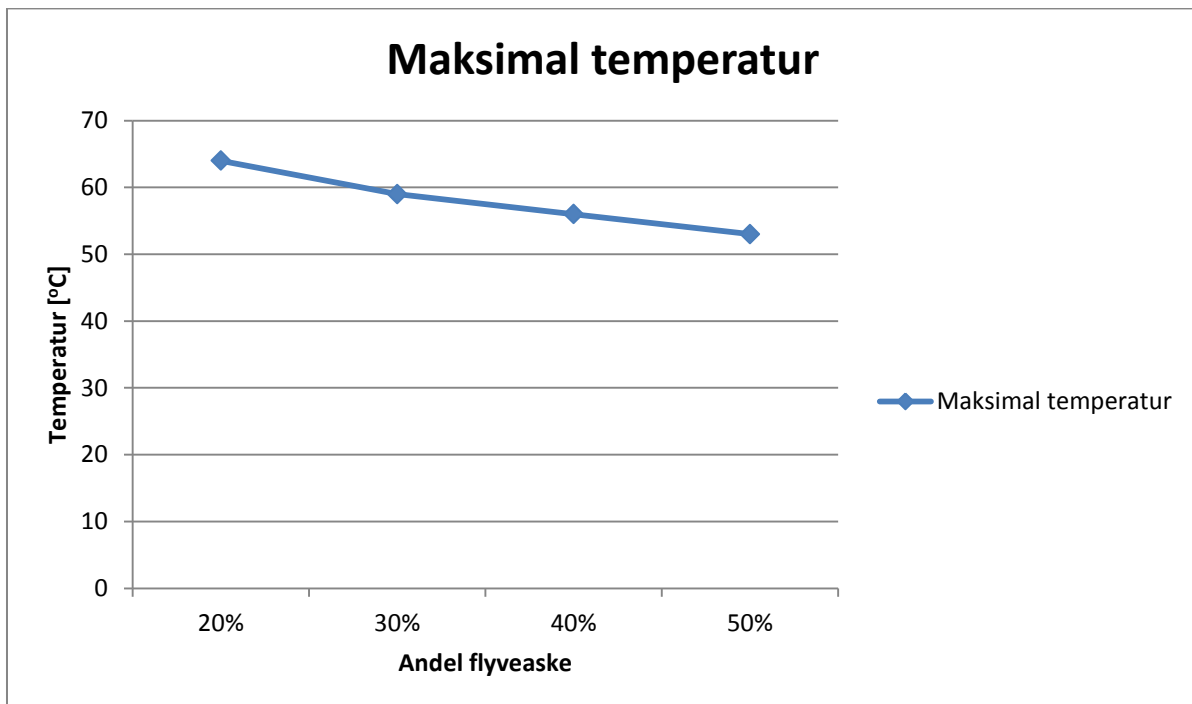
Figur 33: Rissindeks

I tabellen under, er resultatene oppsummert:

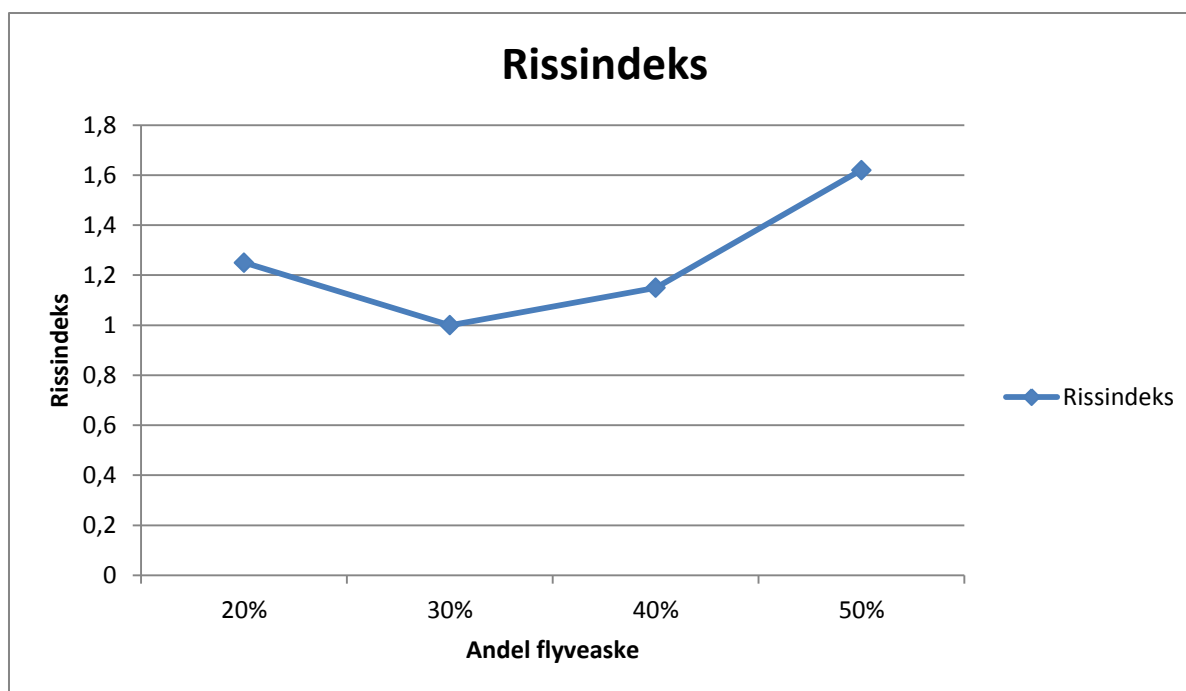
Andel flyveaske	Maksimal temperatur	Rissindeks
20 %	64 °C	1,25
30 %	59 °C	1,0
40 %	56 °C	1,15
50 %	53 °C	1,62

Tabell 8: Oppsummering av resultater

Figur 34 og figur 35 viser en grafisk fremstilling av temperatur og rissindeks mot innhold av flyveaske i betongen.



Figur 34: Temperatur og innhold av flyveaske



**Figur 35: Rissindeks og innhold av flyveaske**

Figur 34 viser at maksimaltemperaturen i konstruksjonen avtar med stigende mengde flyveaske. Dette er som forventet. Figur 35 viser at rissindeksen ikke er samsvarende med varmeutviklingen. Grunnen til dette er at økende mengde flyveaske påvirker betongens 28 dagers fasthet. Dette gjør at vi får en lavere fasthet i forhold til temperatur for betonger med økende andel flyveaske. Ut i fra dette kan vi konkludere med at høyt innhold av flyveaske ikke automatisk gir en lavere rissindeks. Dette gjelder spesielt for betong med innhold av flyveaske over 30 %.

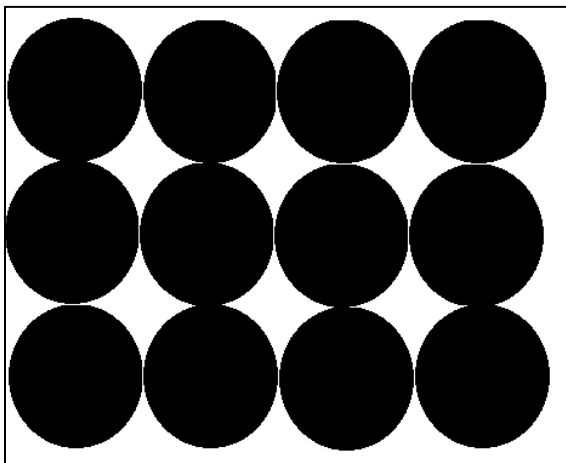
Kostanden av dette tiltaket er noe vrient å fastslå. Grunnen til dette er at betongpriser ofte er prosjektspesifikke. Det vil si at prisen på betong med flyveaske varierer fra prosjekt til prosjekt. Faktorer som er med på å bestemme prisen kan være betongvolum, resept og andel flyveaske. Prisen kan også variere ut i fra rammeavtaler enkelte firma har med betongleverandøren.

Ved å gjøre enkelte antakelser og forenklinger kan vi prøve å si noe om prisen for betong med flyveaske. Virkningsfaktoren til flyveaske er ofte satt til 0,7 i forhold til sement. Her forutsetter vi at prisen for sement er den samme som prisen for flyveaske. Dette er ikke så langt fra virkeligheten i Norge i skrivende stund. Hvis vi nå antar at virkningsfaktoren for sement og flyveaske begge er lik 1, vil prisen være lik for betong med og uten flyveaske. Ut i fra dette kan vi si at det ikke er noen prisforskjell mellom betong med flyveaske og konvensjonell betong uten aske.

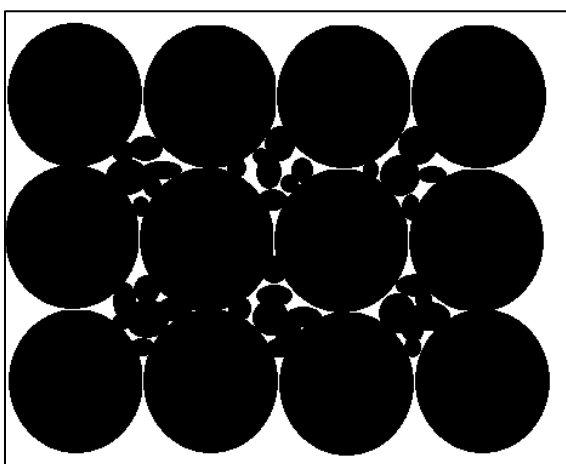
## 5.2. Tiltak 2: Hulrom i tilslag og sementinnhold i betong

I dette kapitlet skal vi se på en metode for å redusere sementinnholdet i betongen. Ved å redusere mengden sement, vil betongens herdetemperatur synke. Grunnen til dette er at vi får mindre andel substrater som kan reagere med vann.

Sementmengden i betong kan endres ved å bruke tilslag med lange siktekurver og store steinstørrelser. Siktekurvene og fraksjonene i tilslaget påvirker hulrommet i den sammensatte steinandelen som brukes i betongen. Dette er forsøkt illustrert i figur 36 og figur 37. Med økende andel hulrom i tilslaget, må det benyttes større mengde matriks. Matriks brukes her som en samlebetegnelse på vann, bindemiddel og andre partikler mindre enn 0,125 millimeter. Matriksen skal fylle alle hulrom i tilslaget. Synkende andel hulrom gir synknede mengde matriks. For å beholde det ønskede v/c-tallet, må dermed sementmengden reduseres. Selve forholdet mellom vann og sement i matriksen holdes konstant.



Figur 36: Hulrom med én gradering



Figur 37: Hulrom med to graderinger

### 5.2.1. Tilslagsstørrelser i andre massive betongdammer

Tilslag med lange siktekurver og store steinstørrelser har vært brukt i betong i andre damkonstruksjoner i Norge. To slike konstruksjoner er Altadammen i Sautso i Finnmark, og Førrevassdammen i Suldal i Hordaland. Førrevassdammen ble bygget fra 1982- 1986, og er en dobbelkurvet hvelvdam. Dammen er 15 meter tykk, og har gravitasjonsdammer på hver side. Selve hvelvdammen er 96 meter høy, og hele dammen er 1,3 kilometer lang. Dammen består av omtrent 255 000 m<sup>3</sup> betong. Betongen har v/c- tall på 0,57, og er tilsatt silika og 30 % flyveaske. Tilslaget som er brukt i betongen har en maksimal diameter på 120 millimeter. Stor diameter på tilslaget gjør at vi får svært lange og graderte siktekurver med lite hulrom. Dammen består hovedsakelig av denne betongtypen. For å gjøre dammen frostsikker og bestandig, er det benyttet en annen betongtype ut mot overflaten. Denne betongen ligger som en 1,5 meter tykk kappe over konstruksjonen. Betongen som er benyttet til dette formålet er en frostsikker betong med maksimal tilslagsdiameter på 64 millimeter. Store steinstørrelser og flyveaske er benyttet for å minimere varmeutviklingen i dammen (12, 13, 14).



**Figur 38: Førrevassdammen**

Altadammen ble bygget fra 1982- 1987 i Alta i Finnmark. Dammen er Norges høyeste hvelvdam, og er 110 meter høy. Her er det benyttet en betong med tilslagsdiameter på opptil 120 millimeter. Betongen er tilsatt 30 % slagg (blast- furnace slag) for å senke herdetemperaturen (13, 15).

Begge dammene ble støpt i seksjoner på 15 meter \* 15 meter med en høyde på 3 meter. Denne produksjonsmetoden brukes for å redusere den maksimale herdetemperaturen, og minimere problemer knyttet til herdefronter i konstruksjonen (1).

Bruken av store steinstørrelser senker det nødvendige matriksvolumet, og dermed også sementmengden. Betong med tilslagsstørrelser opp til 150 millimeter kontra betong med maksimal tilslagsstørrelse på 32 millimeter kan gi en reduksjon i sementmengde på omtrent 70 kg/ m<sup>3</sup> (1).

### 5.2.2. Beregning av hulrom og sementreduksjon

Data for hulrom i tilslag med forskjellige graderinger er funnet fra betonglaboratoriet ved NTNU. Ved å veie 10 liter tilslag og dividere på massetettheten, kan hulrommet for 1 m<sup>3</sup> tilslag bestemmes. Dette er gjort for én fraksjon med kornstørrelse på 0- 8 millimeter, og én med 8- 16 millimeter. Fraksjonenes densitet er antatt. Siktekurven for tilslaget er funnet fra betongen med 40 % flyveaske i vedlegg G. Dataene er satt inn i tabellen under.

Tilslagsstørrelse	Vekt	Densitet	Pakning	Hulrom	
0- 8 mm	1572 kg/m <sup>3</sup>	2660 kg/m <sup>3</sup>	0,59	0,41	41 %
8- 16 mm	1562 kg/m <sup>3</sup>	2700 kg/m <sup>3</sup>	0,58	0,42	42 %

Tabell 9: Tetthet og hulrom for tilslagsfraksjoner

Disse dataene ble så satt inn i dataprogrammet 4C Packing. Programmet er laget for å finne pakningsgrad i sammensatte tilslag. Brukeren setter inn parametere som siktekurve, tetthet og pakning for fraksjonene.

Tilslagsfraksjonene 16- 32 millimeter og 32- 64 millimeter antas å ha samme andel hulrom som fraksjonen med kornstørrelse 8- 16 millimeter. Antar vi at kornformen til fraksjonene er perfekt sfæroidal, vil dette være en god antakelse. Dataprogrammet 4C Packing gir en god visualisering av det sammensatte hulrommet når tre fraksjoner av tilslag brukes. Pakningen til fraksjonen 16- 64 mm er funnet ved å kombinere 16- 32 mm fraksjonen og 32- 64 mm fraksjonen. Ved å bruke 4C Packing, med 50 % 16- 32 mm og 50 % 32- 64 mm, finner vi at hulrom for 16- 64 mm fraksjonen er 0,612. Vi har dermed fire fraksjoner, som er funnet fra tre.

Tilslagsstørrelse	Antatt densitet	Pakning	Hulrom (1-pakning)	
0- 8 mm	2660 kg/m <sup>3</sup>	0,59	0,41	41 %
8- 16 mm	2700 kg/m <sup>3</sup>	0,58	0,42	42 %
16- 32 mm	2700 kg/m <sup>3</sup>	0,58	0,42	42 %
32- 64 mm	2700 kg/m <sup>3</sup>	0,58	0,42	42 %
16- 64 mm	2700 kg/m <sup>3</sup>	0,612	0,388	38,8 %

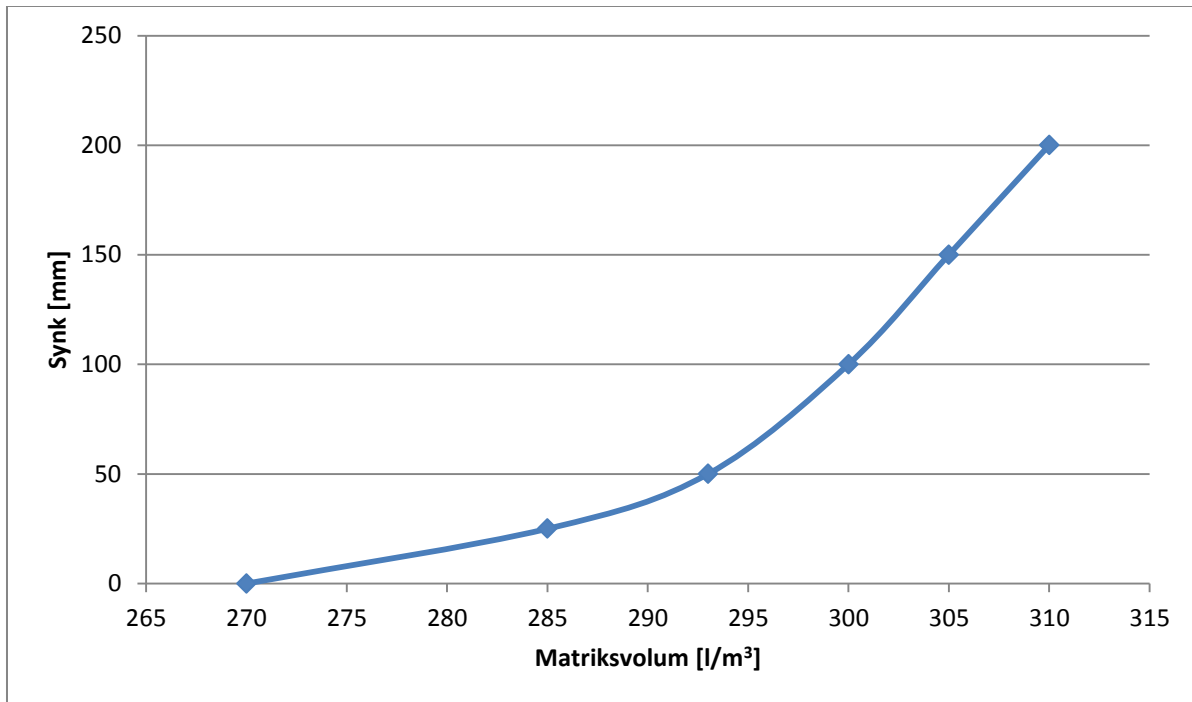
Tabell 10: Beregnet hulrom i sammensatt tilslag

Slik det allerede er beskrevet, vil økt lengde på siktekurven redusere hulrommet. Skjermbilder fra resultatene som ble gitt av programmet 4C Packing finnes i vedlegg D. Resultatene er oppsummert i tabellen under.

Tilslagsstørrelse	Endring i hulrom
0- 16 mm	0 %
0- 32 mm	- 3,5 %
0- 64 mm	- 5,2 %

Tabell 11: Endring i hulrom for sammensatt tilslag

Når hulrommet i tilslaget minker, trenger vi mindre matriks. Dette gjør at vi kan redusere sementmengden i betongen. Det er i midlertid viktig å ha et matriksoverskudd i betongen. Det er matriksoverskuddet som gjør betongen bearbeidelig. Ved lite eller fraværende overskudd av matriks vil betongen bli “jordfast”, og ikke flyte utover ved vibrering. Synk i fersk betong kan direkte relateres til matriksoverskudd.



**Figur 39: Synk og matriksvolum (1)**

Vi tar utgangspunkt i at det er behov for 270 liter matriks i betongen for å fylle alle hulrom i tilslaget. For at betongen skal være lett å bearbeide, ønsker vi en synk på 150 millimeter. Av figuren finner vi at hvis 150 millimeter synk skal oppnås, må vi ha 305 liter matriks pr m<sup>3</sup>. Hvis hulrommet i tilslaget reduseres med 5,2 %, vil dette si at vi trenger 290,96 liter matriks i stedet for 305 liter. Formelen for denne enkle beregningen er forklart under.

$$M_{red} = M_{synk=0} * P_{red} + M_{synk=150}$$

Der:

$M_{red}$  = redusert mengde matriks grunnet reduksjon i tilslagets hulrom

$M_{synk=0}$  = nødvendig mengde matriks for å fylle hulrom

$P_{red}$  = reduksjon i hulrom

$M_{synk=150}$  = matriksoverskudd for å oppnå ønsket synk (her: 35 liter)

**Formel 20: Redusert matriksmengde**



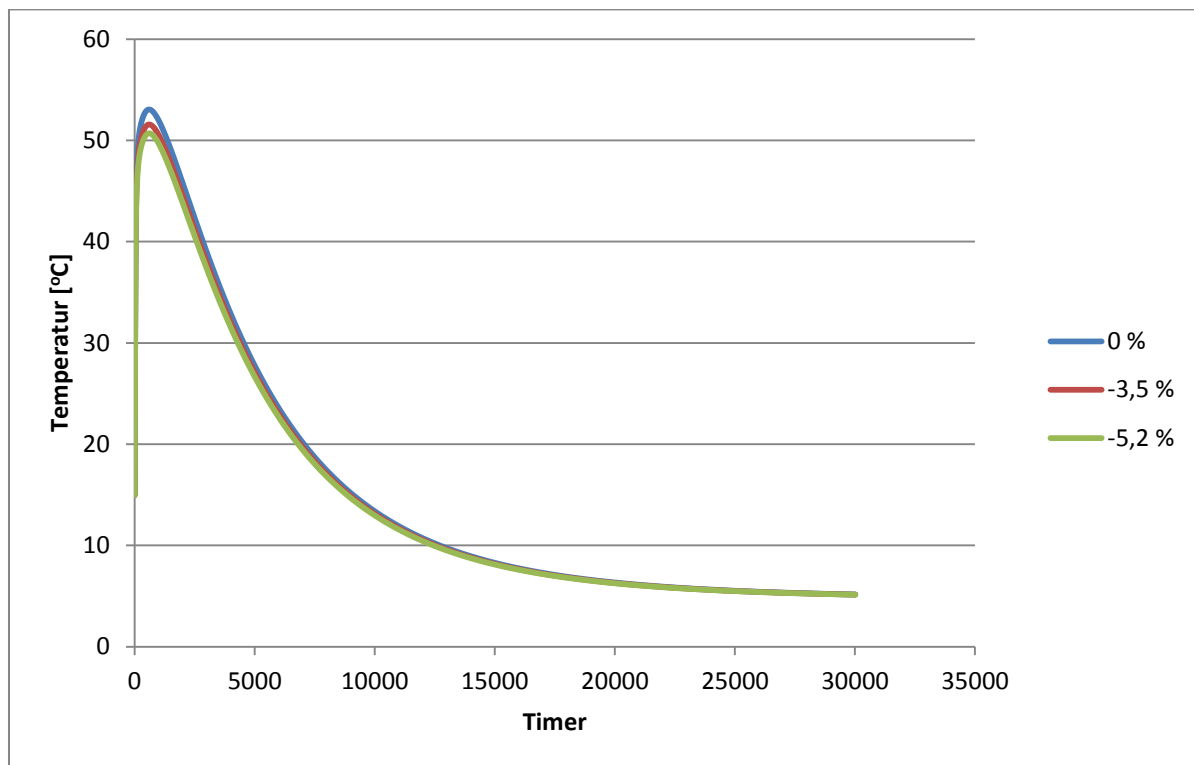
Mengden sement ved redusert andel hulrom er funnet ved å endre det ønskede matriksinnholdet i regnearket proporsjonering.xls. Regnearket finner den riktige sementmengden ut ifra den innlagte resepten. De aktuelle regnearkene er vedlagt i vedlegg E.

Fraksjon	$M_{synk=0}$	$P_{red}$	$M_{synk=150}$	$M_{red}$	Sementinnhold	
					kg/m <sup>3</sup>	%
0- 16 mm	270 liter/m <sup>3</sup>	-	35 liter/ m <sup>3</sup>	305 liter/ m <sup>3</sup>	339,3	-
0- 32 mm	270 liter/ m <sup>3</sup>	- 3,5 %	35 liter/ m <sup>3</sup>	295,55 liter/ m <sup>3</sup>	326,9	-3,6
0- 64 mm	270 liter/ m <sup>3</sup>	- 5,2 %	35 liter/ m <sup>3</sup>	290,96 liter/ m <sup>3</sup>	319,6	-5,8

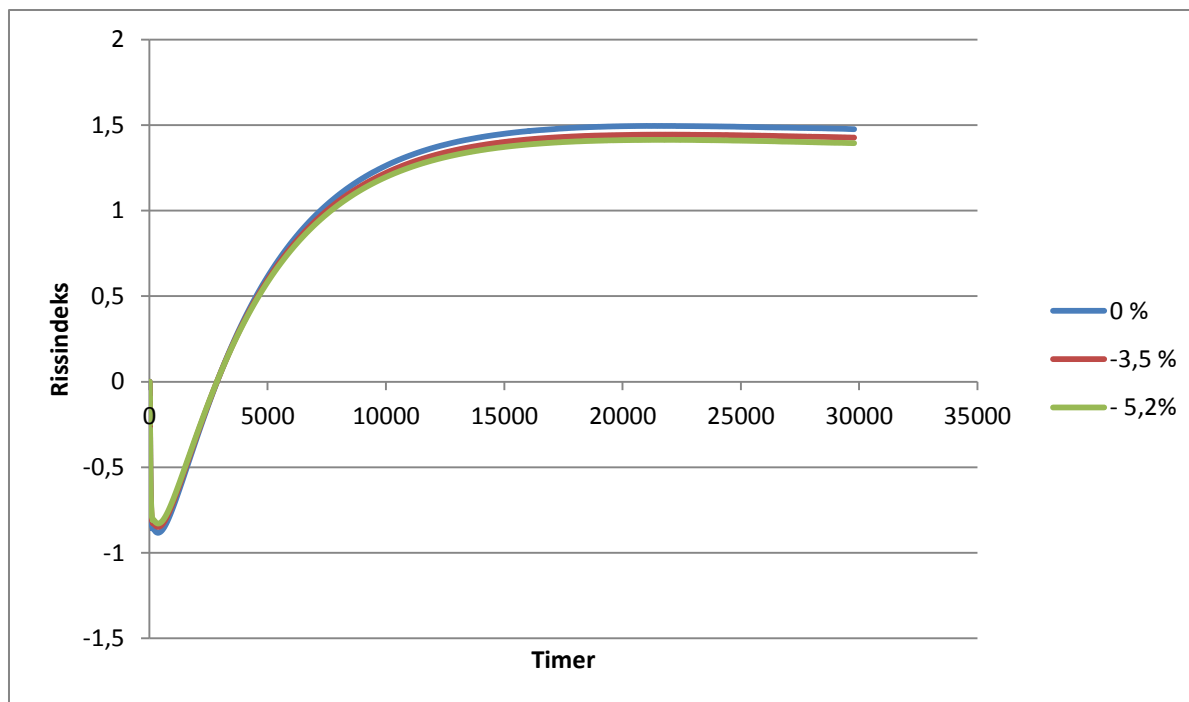
Tabell 12: Beregnet sementinnhold

### 5.2.3. Simulering av rissindeks og temperatur

Dataene i forrige delkapittel brukes for å bestemme hvor mye herdetemperatur og rissindeks kan reduseres. Simuleringsmodellen og ytre parametere som brukes er de samme som er brukt i kapittel 4. Resultatet av simuleringen kan sees under.



Figur 40: Temperatur



Figur 41: Rissindeks

Resultatene er sammenfattet i tabellen under.

Sementmengde/ tilslagsgradering	Maksimal temperatur	Maksimal rissindeks
0 % (0- 16 millimeter)	53°C	1,5
- 3,5 % (0- 32 millimeter)	51°C	1,45
- 5,2 % (0- 64 millimeter)	50,5°C	1,4

Tabell 13: Oppsummering av resultater

Som vi ser av tabell 13, vil temperaturen og rissindeksen synke med synkende sementinnhold. Ved å benytte tilslag med lang siktekurve (0- 64 millimeter), kan rissindeksen reduseres fra 1,5 til 1,4. Temperaturen endres fra 53°C til 50,5°C. Ut i fra dette kan vi konkludere med at vi kan redusere temperaturen og rissindeksen minimalt i den herdende konstruksjonen med dette tiltaket. Reduksjonen i både temperatur og rissindeks vil kanskje være høyere i betonger med større mengder sement.

Prisen på dette tiltaket vil variere med typen tilslag som tas i bruk. Forskjellige typer tilslag har ulike priser. I betong er det som regel sementen som er den største kostnaden. Dette tiltaket vil redusere sementmengden. Dette gjør at betongen kan bli billigere når vi bruker tilslag med store steinstørrelser og lang siktekurve.

Det er også viktig å se på andre aspekter enn kun betongkostnaden. Kostnadene for utlegging av betong med stor og tung stein vil ofte være høyere enn ved utlegging av “standard” betong. Grunnen til dette er at utleggingsteknikker for betong med steinstørresler opp til 32 millimeter kanskje ikke egner seg for betonger med opp til 64 millimeter stein. Dermed kan utleggingskostnadene ved bruk av slik betong være høye.

Når man velger å bruke store steinstørresler i tilslaget, kan dette få konsekvenser for utleggingsarbeidet. Det er spesielt viktig å tenke på HMS/ SHA. Når steindimensjonen er stor, blir arbeidet med betongen tungt. Utstyr til komprimering og utlegging som brukes må være grovere og større enn ved bruk av “vanlig betong”. Grovere utstyr med større dimensjoner, er ofte tyngre. Tyngre utstyr sliter mer på arbeiderne, og faren for alvorlige skader og ulykker kan øke. Det er også viktig å merke seg at tyngre og mer komplisert utstyr kan koste mer enn utstyr som er beregnet for “standard betong”.

### **5.3. Tiltak 3: Knust is i betongen ved blanding**

Høy temperatur og temperaturdifferanser skaper spenninger i betongkonstruksjoner. Senker vi utgangstemperaturen til den ferske betongen, vil betongens maksimaltemperatur bli lavere. Lavere temperaturer i betongen gir mindre termisk dilatasjon. Dette kan gjøre at rissindeksen kanskje vil synke i takt med betongens maksimaltemperatur.

Ved å erstatte noe av det frie vannet som blandes i betongen med knust is, kan den ferske betongtemperaturen reduseres. Blandetemperaturen er for det meste avhengig av temperaturen til vannet og tilslaget som blir brukt. Ved å holde tilslagstemperaturen lav, kan blandetemperaturen bli betydelig redusert. Hvis man i tillegg bruker kaldt vann og erstatter noe av vannet i blandingen med knust is, vil betongtemperaturen reduseres ytterligere.

Prosessen for å senke temperaturen i betong med is er enkel. Den knuste isen tilsettes under blandingen av betongen. Det er viktig at den samlede vannmengden i betongen (is og vann) forblir konstant, slik at v/c- tallet ikke endres. Her forutsettes det at all isen smelter under blandeprosessen, da det ikke er ønskelig med iskrystaller i den ferske betongen. Fryser den ferske betongen før trykkfastheten er 5 MPa, kan dette skade konstruksjonen (10).

#### **5.3.1. Enkel beregning av nødvendig mengde is**

Ved å beregne den ferske betongtemperaturen for økende mengder knust is, kan vi finne ut hvor mye is som må brukes for å senke rissindeksen til et akseptabelt nivå. For å beregne en fersk betongtemperatur med iblandet knust is, trenger vi en del parametere. Starttemperaturen og den spesifikke varmekapasiteten til de faste stoffene i betongen er antatt. Formelen som brukes for å beregne den ferske betongtemperaturen med iblandet is er gjengitt under.

$$Q_{avgitt} = T_{fus} * m_{is} + m_{is} * C_{p_{is}} * (T_{o_{is}} - T_f)$$

$$Q_{mottatt} = m_{vann} * C_{p_{vann}} * (T_{o_{vann}} - T_f) + m_{aggr} * C_{p_{aggr}} * (T_{o_{aggr}} - T_f)$$

Dette gir:

$$T_f = \frac{T_{fus} * m_{is} - m_{vann} * C_{p_{vann}} * T_{o_{vann}} - m_{aggr} * C_{p_{aggr}} * T_{o_{aggr}}}{-m_{vann} * C_{p_{vann}} - m_{is} * C_{p_{is}} - m_{aggr} * C_{p_{aggr}}}$$

Der:

$T_{fus}$  = smeltevarme for is

$C_p$  = spesifik varmekapasitet

$T_f$  = temperatur, slutt

$T_o$  = temperatur, start

$m_{vann}$  = masse, vann

#### Formel 21: Fersk betongtemperatur

Antakelsene som er gjort, og data for beregningene, er gjengitt i tabellen under. Beregningene inneholder 3 komponenter. Disse er vann, is og fast stoff. Fast stoff inneholder alle de faste materialene som finnes i betong. Dette er hovedsakelig tilslag, men omfatter også sement, filler, og andre faste stoffer som betongen måtte inneholde. Resepten for betongen finnes i vedlegg G.

Parameter	Verdi	Benevning
$C_p$ vann	4,18	kJ/kg
$C_p$ aggr	0,8	kJ/kg
Spesifikk smeltevarme, vann	6,01	kJ/mol
Vekt, vann (mol)	18	g/mol
$T_{fus}$	333,3	kJ/kg
$T_{0\text{ vann}}$	10	°C
$T_{0\text{ vann}}$	20	°C
$T_{0\text{ is}}$	0	°C
Andel vann i betongen	150	kg/m <sup>3</sup>
Andel fast stoff i betongen (sement, flyveaske, silika, tilslag)	2240	kg/m <sup>3</sup>

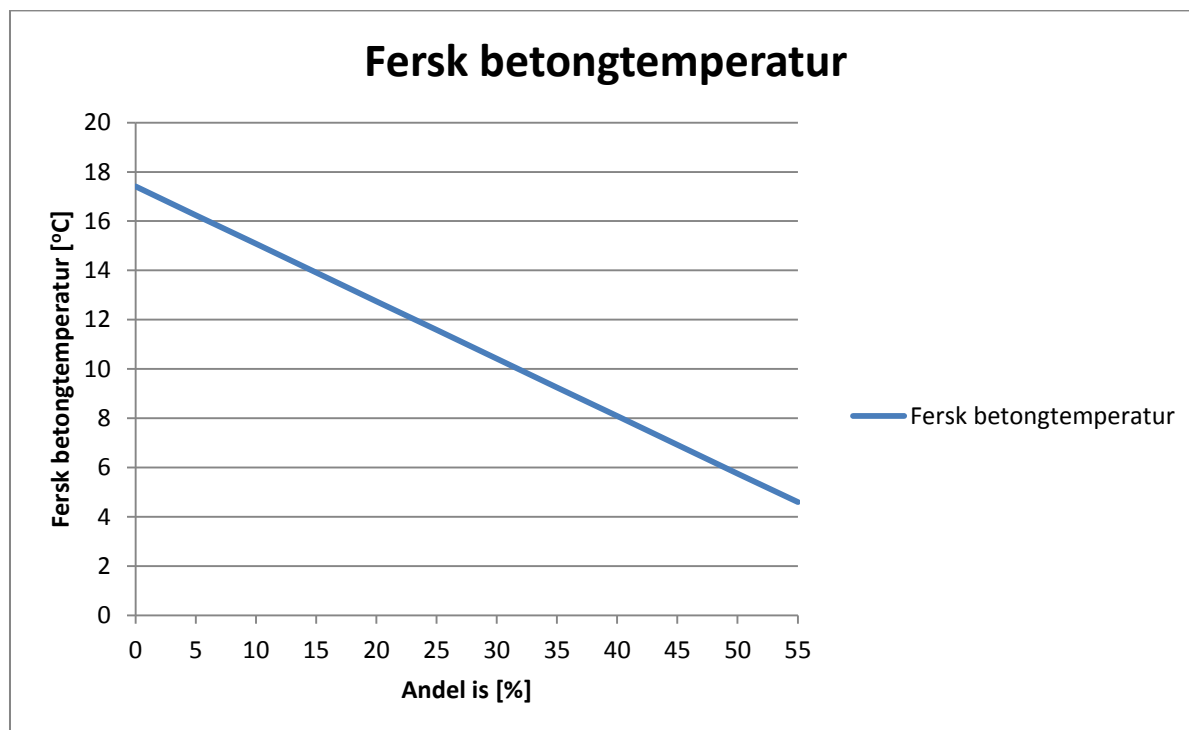
Tabell 14: Parametere for beregning av fersk betongtemperatur

Selve beregningen er gjort med formel 21. Et sammendrag av beregningen er satt inn i tabellen under.

Is	Is [kg/m <sup>3</sup> ]	Vann [kg/m <sup>3</sup> ]	Fersk betongtemperatur [°C]
0 %	0	150	17,40
5 %	7,5	142,5	16,24
10 %	15	135	15,07
15 %	22,5	127,5	13,91
20 %	30	120	12,74
25 %	37,5	112,5	11,58
30 %	45	105	10,41
35 %	52,5	97,5	9,25
40 %	60	90	8,08
45 %	67,5	82,5	6,92
50 %	75	75	5,75
55 %	82,5	67,5	4,59

**Tabell 15:** Fersk betongtemperatur med økende mengde is

Den ferske betongtemperaturen fra tabell 15 er lagt inn i figur 42 for å gi en grafisk fremstilling av resultatet. Figuren viser fersk betongtemperatur med økende mengde knus is som brukes under blandingen av betongen. Denne figuren kan brukes for å avgjøre hvor mye is som må til for å oppnå ønsket fersk betongtemperatur.



**Figur 42:** Fersk betongtemperatur og andel is

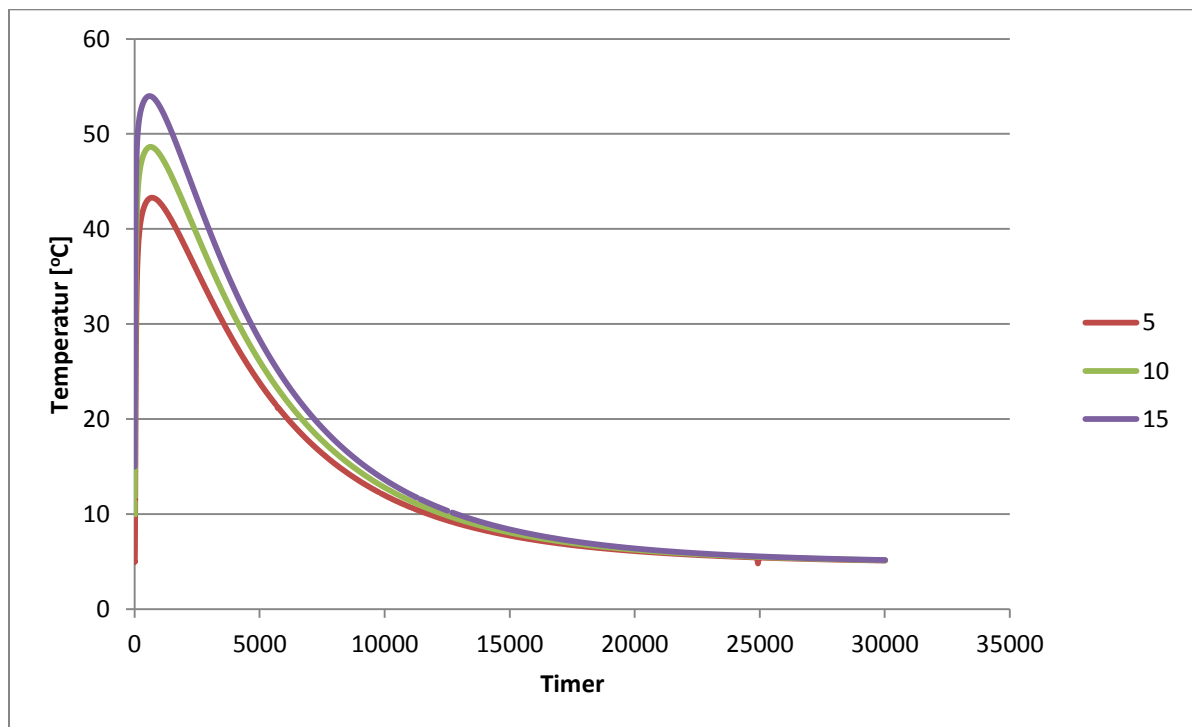
Som vi ser av figuren, må det brukes en god del is for å oppnå en tilstrekkelig lav fersk betongtemperatur. Det er ønskelig å oppnå en så lav temperatur som mulig. I følge Skanska skal Skardfossdammen støpes om vinteren. Det er derfor viktig å ikke ha for lav fersk betongtemperatur, da hydratasjonsprosessen ikke vil initieres. Den ferske betongen må ha en fasthet på 5 MPa før betongtemperaturen når 0°C for å unngå skader (10).

For støp om sommeren kan en fersk betongtemperatur på 5°C være å foretrekke. Om vinteren kan det lønne seg å øke denne temperaturen noe. Som vi ser vil 50 % knust is gi omtrent 5°C.

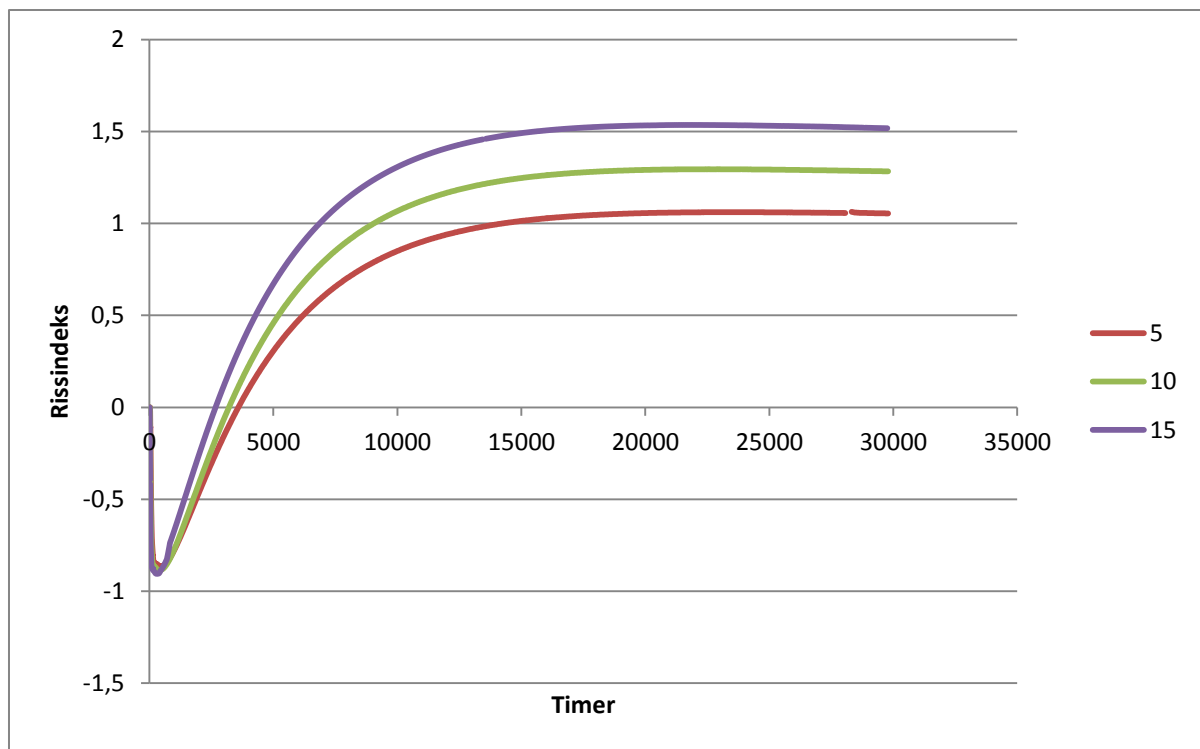
### 5.3.2. Simulering av rissindeks og temperatur

Simuleringene er gjort med samme modell og parametere som i kapittel 4. Det eneste som endres her, er den ferske betongtemperaturen. Det simuleres med en fersk betongtemperatur på 15°C, 10°C og 5°C.

Resultatene av simuleringen er gjengitt i figur 43 og figur 44.



Figur 43: Temperatur



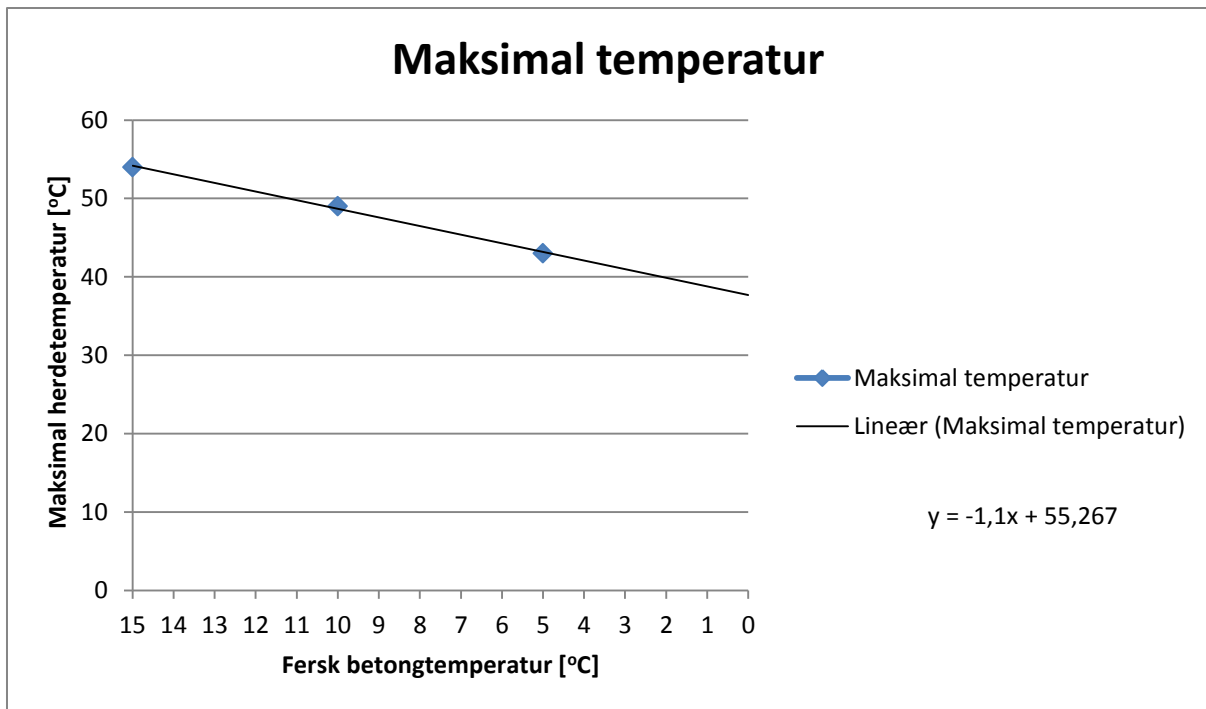
Figur 44: Rissindeks

I tabellen under er resultatene i figurene over oppsummert.

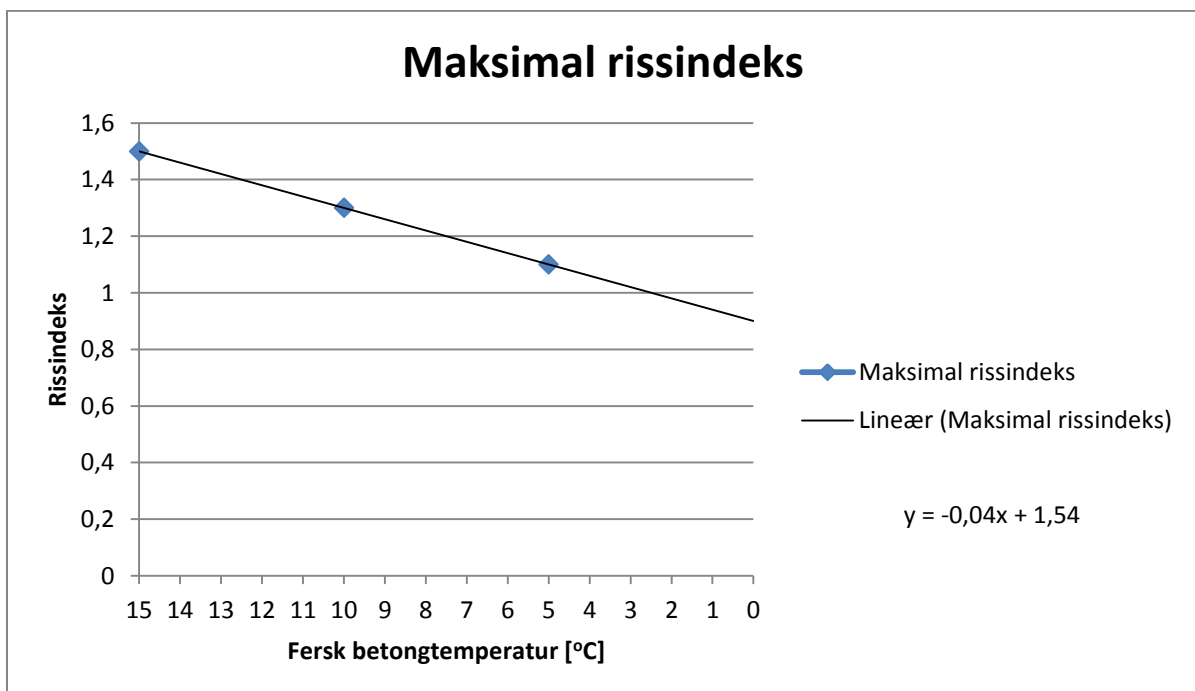
Fersk betongtemperatur	Maksimal temperatur	Maksimal rissindeks
15°C	55°C	1,5
10°C	49°C	1,3
5°C	43°C	1,1

Tabell 16: Oppsummering av resultater

I figurene under, er temperatur og rissindeks plottet. Her er det også lagt til en trendlinje, slik at sammenhengen mellom fersk betongtemperatur, maksimal betongtemperatur og rissindeks i konstruksjonen kommer tydelig fram.



Figur 45: Maksimal herdetemperatur og fersk betongtemperatur



Figur 46: Rissindeks og fersk betongtemperatur



Av figurene ser vi hvordan økt mengde is påvirker rissindeks og herdetemperatur. I figurene er det lagt inn en trendlinje for å vise hvordan temperatur og rissindeks synker med økende mengde knust is. Trendlinjen er lineær, og gir en formel for å finne sammenhengen mellom aksene. Av figur 45 ser vi at det er omtrent et 1:1 forhold mellom maksimal herdetemperatur og fersk betongtemperatur. Figur 46 viser at en reduksjon på én grad reduserer rissindeksen med 0,04. Dette gjør at vi kan finne den ferske betongtemperaturen som gir rissindeks under 1,0, gitt at trendlinjene er tilstrekkelig godt tilpasset de faktiske dataene.

Vi kan konkludere med at en reduksjon av den ferske betongtemperaturen er en effektiv metode for å senke rissindeksen. En tommelfingerregel i bransjen er å erstatte 2 % av det frie vannet i blandingen med is for hver 0,5°C man ønsker å kjøle betongen. Av figur 46 ser vi at dette ikke stemmer helt med våre resultater. Ved kjøling av høyere temperaturer kan dette stemme bedre (8).

Prisen på et slikt tiltak kan være forholdsvis rimelig. Det finnes næringer der is er et biprodukt av produksjonen, eller som har ledig kapasitet i produksjonen av is. Bedrifter i slike næringer kan for eksempel være lakseoppdrett og fiskemottak. Dette gjør at is enkelte steder kan kjøpes billig. Dessverre finnes det ikke slik produksjon eller næringsvirksomhet i Rjukanområdet, og knust is egner seg dårlig for transport over lengre avstander. Man kan eventuelt investere i en industriell ismaskin, og installere denne på blandeverket. Under produksjonen av Altadammen i 1984 kostet et slikt isanlegg omtrent 1,4 millioner kroner (2). Tar vi utgangspunkt i Norges Banks inflasjonsmål på 2,5 % pr år, vil 1,4 millioner tilsvare 2 795 093 kr i 2012 (16). Om infrastrukturen hos Unicon tillater installasjon av et slikt isanlegg er noe usikkert.

#### **5.4. Tiltak 4: Sjikt mellom fjell og betong**

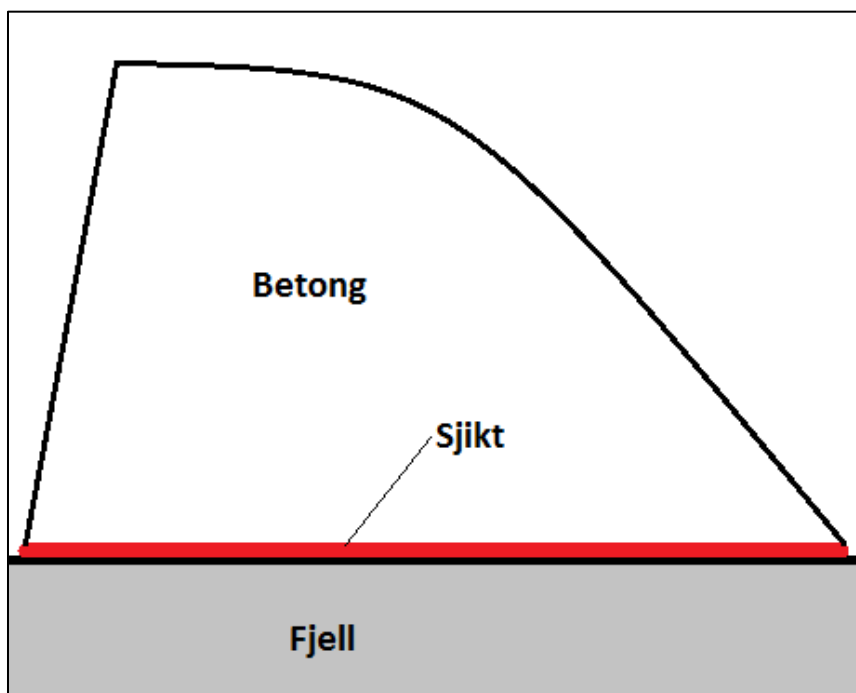
Ytre fastholding er som nevnt en av de vanligste årsakene til riss i massive betongkonstruksjoner. Som nevnt i kapittel 2 drives ytre fastholding av termisk ekspansjon og sammentrekning, samtidig som betongen stivner. Ytre fastholding er et stort problem i massive konstruksjoner med høye herdetemperaturer.

For å hindre problemer knyttet til fastholding, kan man i teorien benytte et tynt lag med et lite stivt materiale. Dette materialet legges mellom betongkonstruksjonen og de tilstøtende eksisterende konstruksjonene. Dermed vil ikke konstruksjonsdelene komme i direkte kontakt med støpen. Når betongen herder, og utvikler varme, vil det mellomliggende sjiktet å ta opp den termiske dilatasjonen. Som vi ser av figur 3, vil dette redusere effekten av ytre fastholding. Sjiktet må ha lav stivhet (E- modul), og være elastisk for å ta opp kreftene fra den ferske betongen. I tillegg er det viktig at materialet har stor tøyningsevne, slik at det ikke sprekker eller ryker.

Dette tiltaket kan være vanskelig å gjennomføre ved produksjon av konstruksjoner med strenge krav til sikkerhet og integritet. Det er en forutsetning at dimensjonerende faktorer som bæreevne og konstruksjonssikkerhet ikke overskrides. Gravitasjonsdammer krever for eksempel at konstruksjonens egenvekt gir god friksjon og tetthet mot underlaget. Bruk av et sjikt materiale mellom betongdammen og underlaget vil kanskje motvirke dette, og dermed ikke oppfylle de krav som stilles.

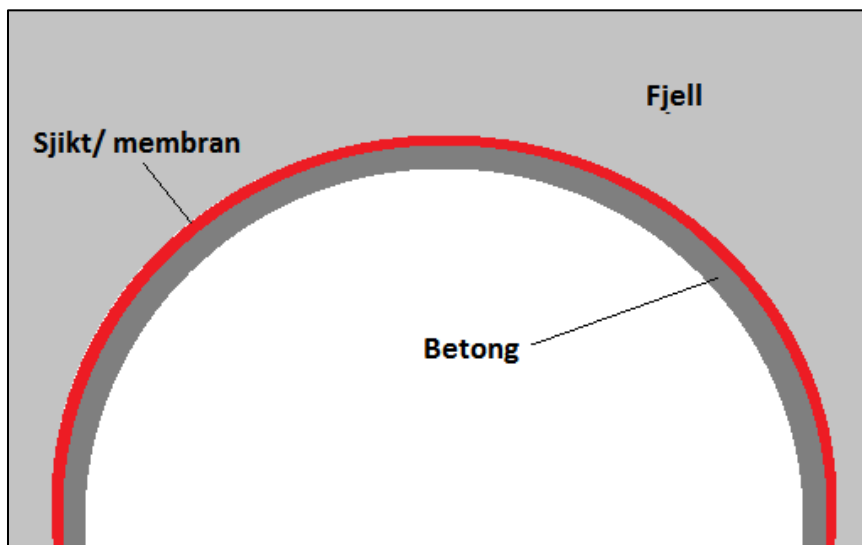
#### 5.4.1. Anvendelser og bruksområder

Metoden kan brukes når man skal støpe en massiv betongkonstruksjon mot fjell, eller allerede eksisterende betongkonstruksjoner. Dette er spesielt effektivt når det støpes mot fjell, da fjellmasser ofte har høy stivhet. Metoden er dermed godt egnet til bruk i forbindelse med støp av Skardfosdammen. Legges sjikt- materialet mellom fjellet og den ferske betongen, vil man kunne redusere effekten av ytre fastholding betraktelig. Sjiktet tar opp eventuelle skjærkrefter som vil oppstå mellom den herdende betongen og fjellet. Dette skjer siden sjiktet har lav stivhet, samtidig som det er duktilt. Det er forutsatt at sjikt- materialet tåler en slik påkjenning uten å ødelegges.



Figur 47: Prinsippkisse for bruk ved støp av betongdam

Metoden kan også benyttes ved utstøpning av tverrsnitt med stor flate mot fjell. Dette gjør at metoden er godt egnet til bruk i tunnel, der det kreves full utstøpning av tunnelprofilen. Dette fører til at problemet med ytre fastholding blir relevant. Som vi ser av figur 6, vil fastholdingsgraden øke når arealet av den tilstøtende konstruksjonen øker. Under full utstøpning av tunneller kreves det en tynn membran mellom fjellet og betongen for å hindre vann og fukt å trenge inn i tunnelen. Denne membranen bør kunne modifiseres slik at den er vanntett, har lav E- modul, høy fasthet og er duktil. Dermed kan membranen, som skal legges mellom utstøpningen og fjellet, brukes for å minke graden av fastholding. Prinsippet er det samme som ved støpning av for eksempel en betongdam, men utførelsen er noe annerledes.



Figur 48: Prinsippkisse for bruk i tunnel

#### 5.4.2. Simulering av sjiktets effekt

I dette kapittelet foretas det tre simuleringer av en enkel modell. Modellen er simulert i programmet iDIANA. Modellen som er brukt i simuleringen er gjengitt i figur 49, og består av en betongkloss med høyde på 2 meter og bredde på 6 meter. Betongklossen ligger på et underlag av fjell. Mellom disse to klossene er det lagt inn et sjikt. Modelleringen og simuleringen er utført av Jan Arve Øverli. Øverli er førsteamanuensis ved Institutt for konstruksjonsteknikk på NTNU i Trondheim.

Hensikten med denne simuleringen er å se hvor stor effekt et slikt sjikt vil ha på ytre fastholding. Resultatene fra simuleringen fremstilles på en litt annen måte i iDIANA enn i 4C Temp&Stress og CrackTeSt COIN. Effekten kommer godt fram av simuleringene.

Det er gjort tre simuleringer. Én uten sjikt, én med sjikt på 50 millimeter og én med sjikt på 100 millimeter. Selve simuleringen utføres ved at utgangstemperaturen i betongen settes 10°C høyere enn temperaturen til fjellet. Nedkjølingen av betongen fra omgivelsene gir en sammentrekning i konstruksjonen. Denne sammentrekningen fører til spenninger, da betongen er fastholdt mot fjellklossen.

Viktige parametere for simuleringen er satt inn i tabellen under.

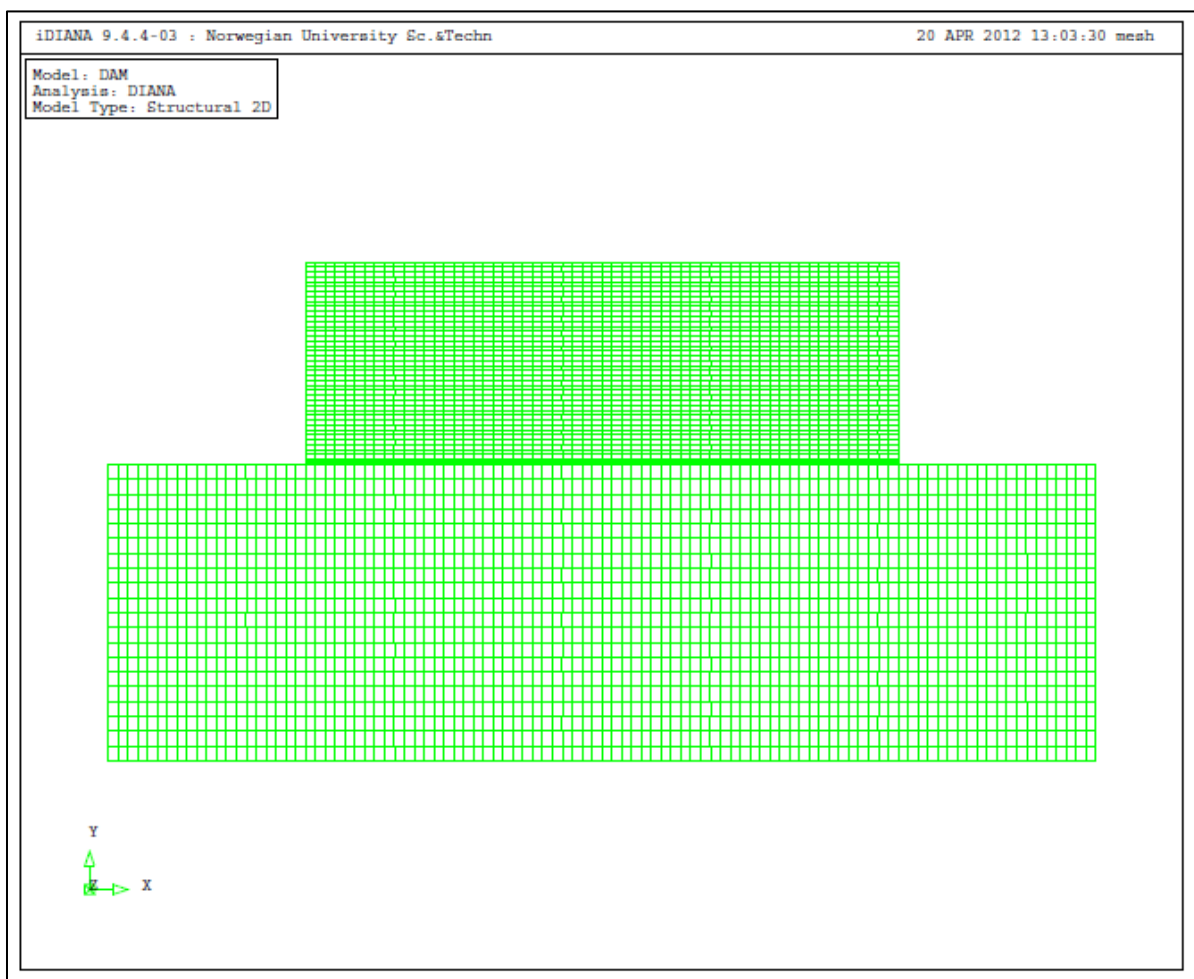
Parameter	Verdi
Initiell temperaturforskjell mellom betong og fjell	10°C
E- modul, betong	30 GPa
E- modul, fjell	60 GPa
E- modul, sjikt	1 GPa
Tykkelse, sjikt	0 mm/ 50 mm / 100 mm

Tabell 17: Modellparametere

Simuleringsscenariene er listet opp under:

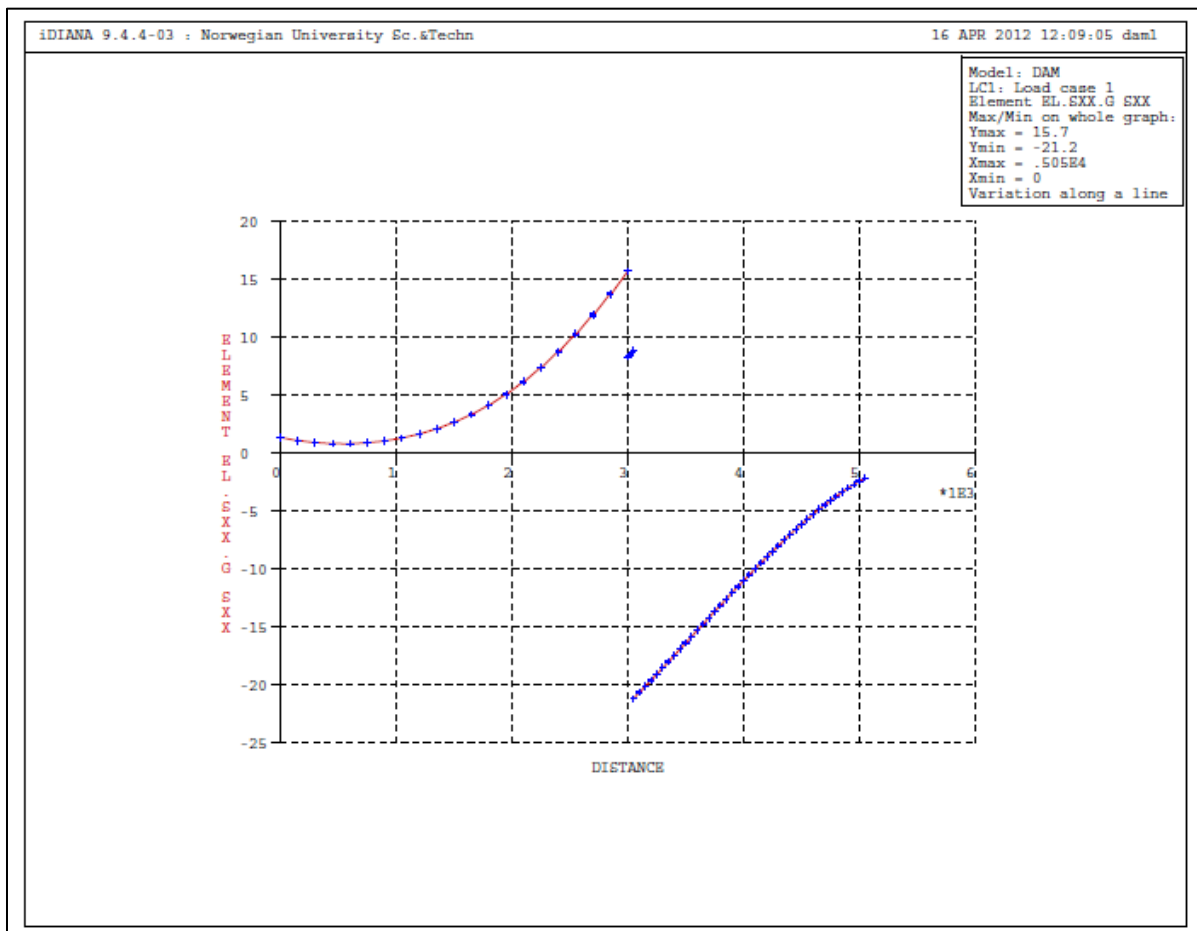
1. Simulering uten sjikt mellom fjell- og betongkloss
2. Simulering med sjikt med tykkelse 50 millimeter mellom fjell- og betongkloss
3. Simulering med sjikt med tykkelse 100 millimeter mellom fjell- og betongkloss

Figur 49 viser modellens geometri og FEM- nett.



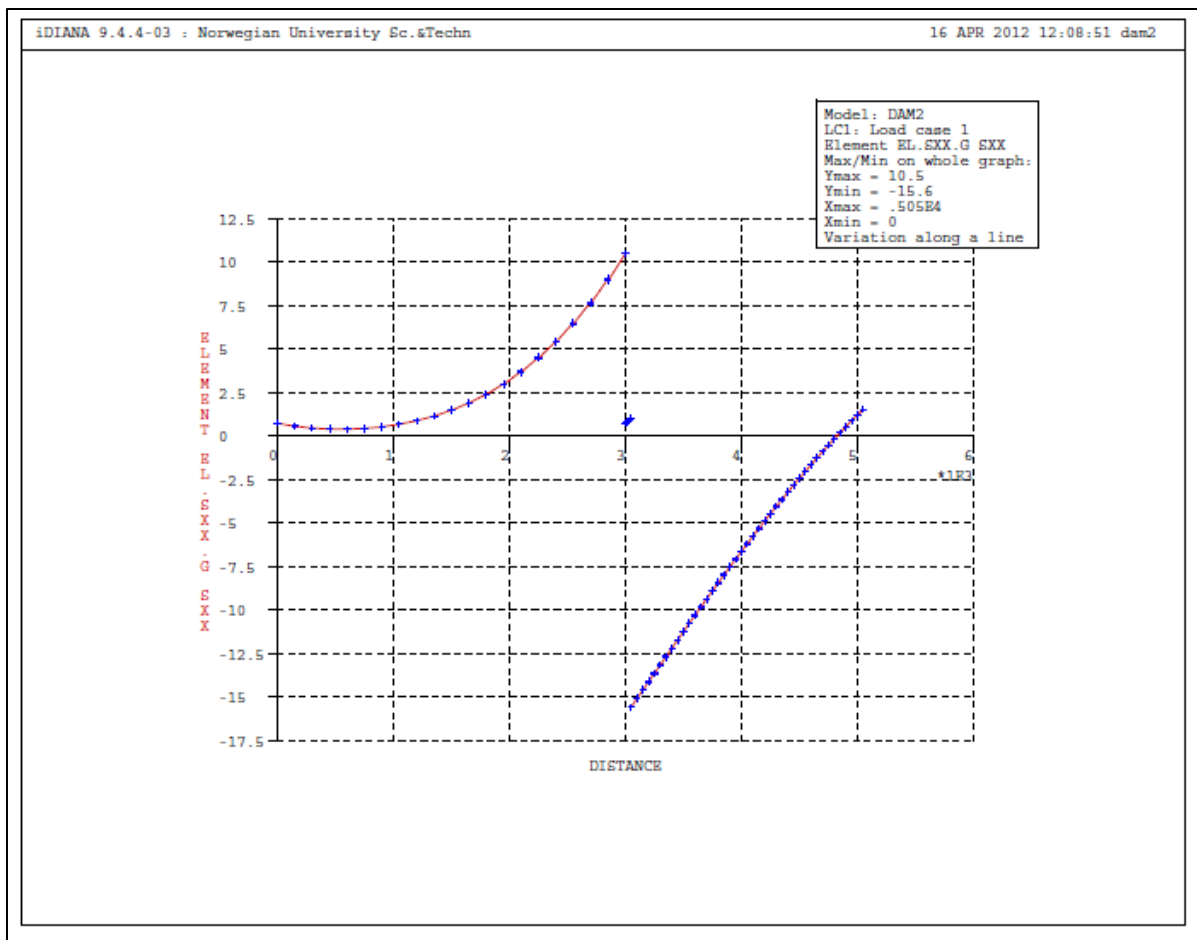
Figur 49: FEM- nett og geometri

Resultatene fra simuleringen vises grafisk ved hjelp av spesielle plott. Figur 50- 53 viser spenningen i betongen. X- akse i figuren angir høyden i modellen, mens y- akse angir spenningen. Nullpunktet for høyden i modellen ligger i bunnen av “fjellet”. Siden fjellet i modellen er tre meter høyt, vil den største spenningen i betongen være 4 meter opp i modellen. Dette tilsvarer midt i betongkonstruksjonen som simuleres. I dette tilfellet er det aktuelt å se på endringene i spenning (y- akse). Dette sier noe om hvor mye spenningen endrer seg ved bruk av sjikt, og siktes tykkelse.



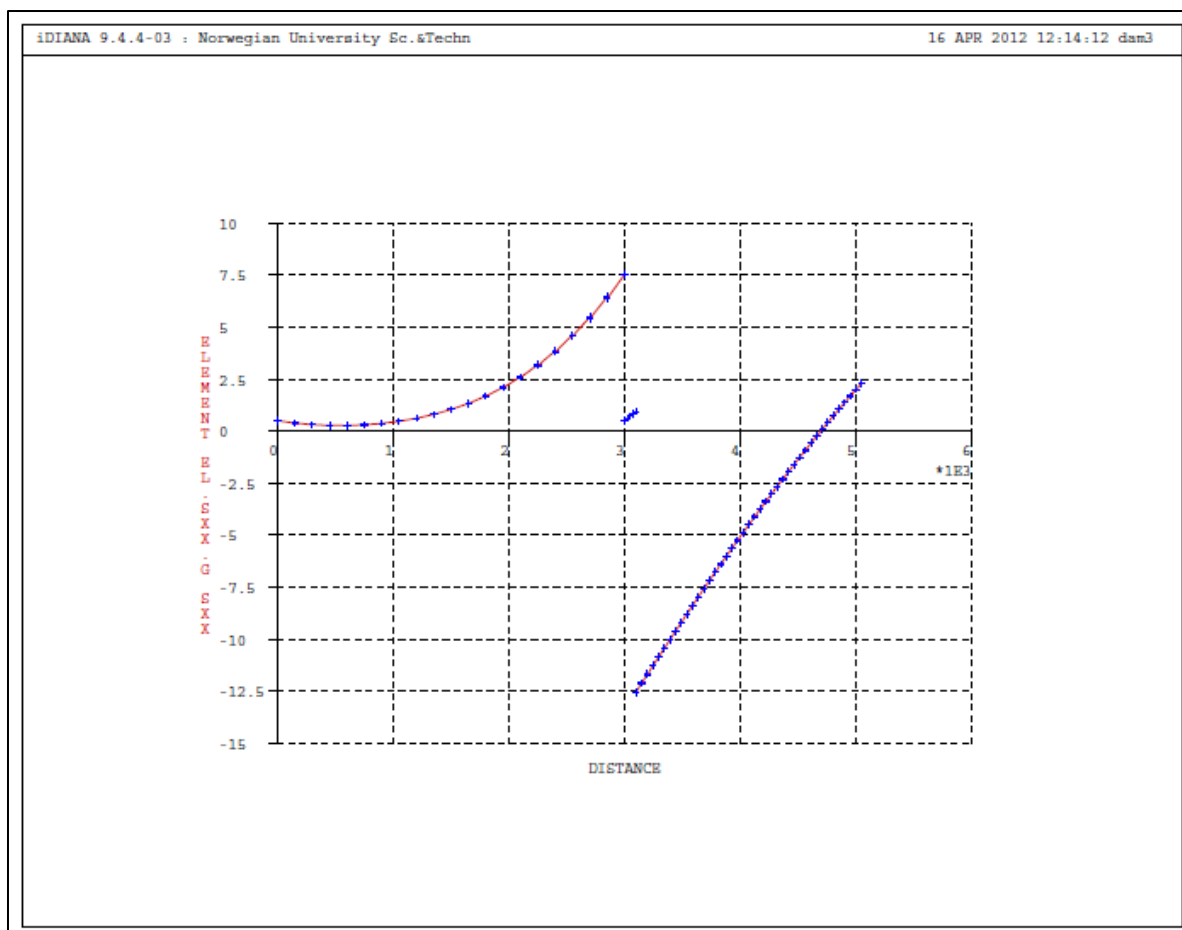
**Figur 50: Simulering 1**

Figur 50 viser resultatet fra simuleringen av modellen uten noen effekt av sjiktet (simulering 1). Dermed ligger betongklossen direkte på fjellklossen. Dette er utgangspunktet for sammenlikningen av simuleringene. Hensikten her er å se hvor stor spenning vi får uten bruk av sjiktet.



**Figur 51: Simulering 2**

Figur 51 viser resultatet fra simulering 2, der det er brukt et sjikt med 50 millimeters tykkelse. Som vi ser, reduseres spenningen 4 meter opp i modellen betraktelig i forhold til simulering 1.



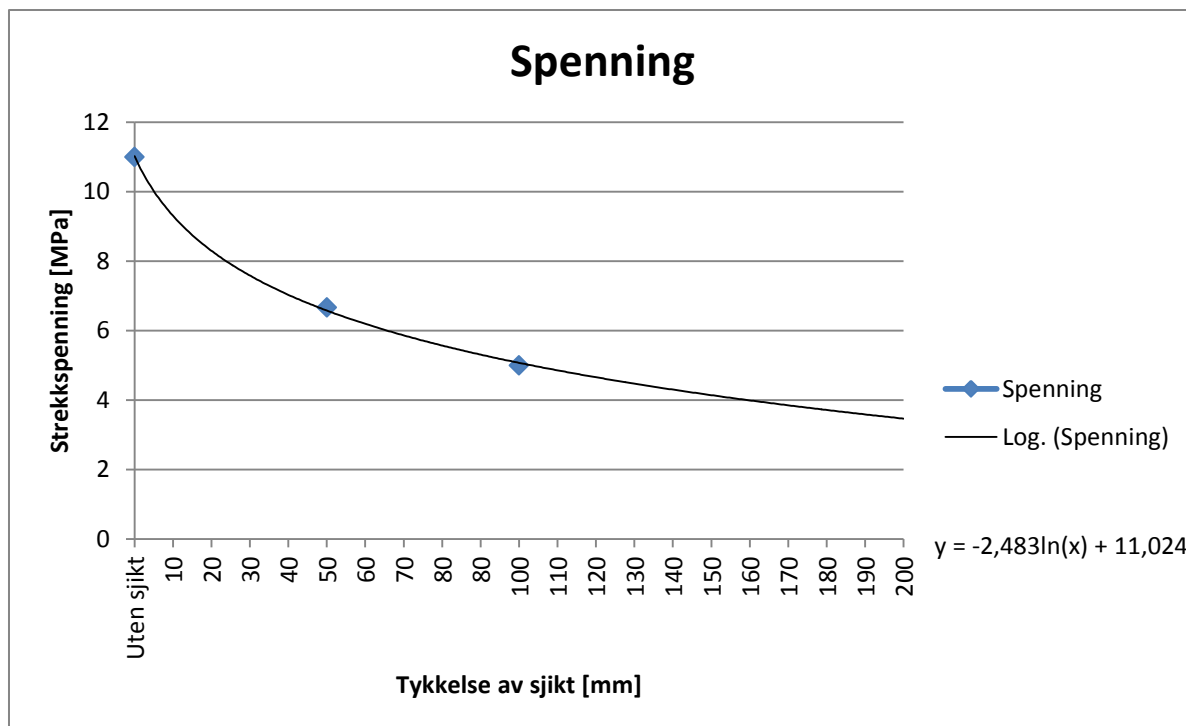
**Figur 52: Simulering 3**

Figur 52 viser resultatet av simuleringen med et sjikt med tykkelse 100 millimeter (simulering 3). Sjiktet er her dobbelt så tykt som i simulering 2. Her ser vi at spenningen reduseres ytterligere.

I tabell 18 er resultatene fra simuleringen gjengitt med tall. Figur 53 gir en grafisk fremstilling av resultatet. Trendlinjen i grafen sier noe om hvordan spenningen reduseres med økende tykkelse av sjiktet.

Simulering	Spenning [MPa]	Høyde i modellen	Reduksjon av spenning
1. Uten sjikt	11	4 meter	-
2. 50 mm sjikt	6,67	4 meter	39,4 %
3. 100 mm sjikt	5	4 meter	54,5 %

**Tabell 18: Oppsummering**



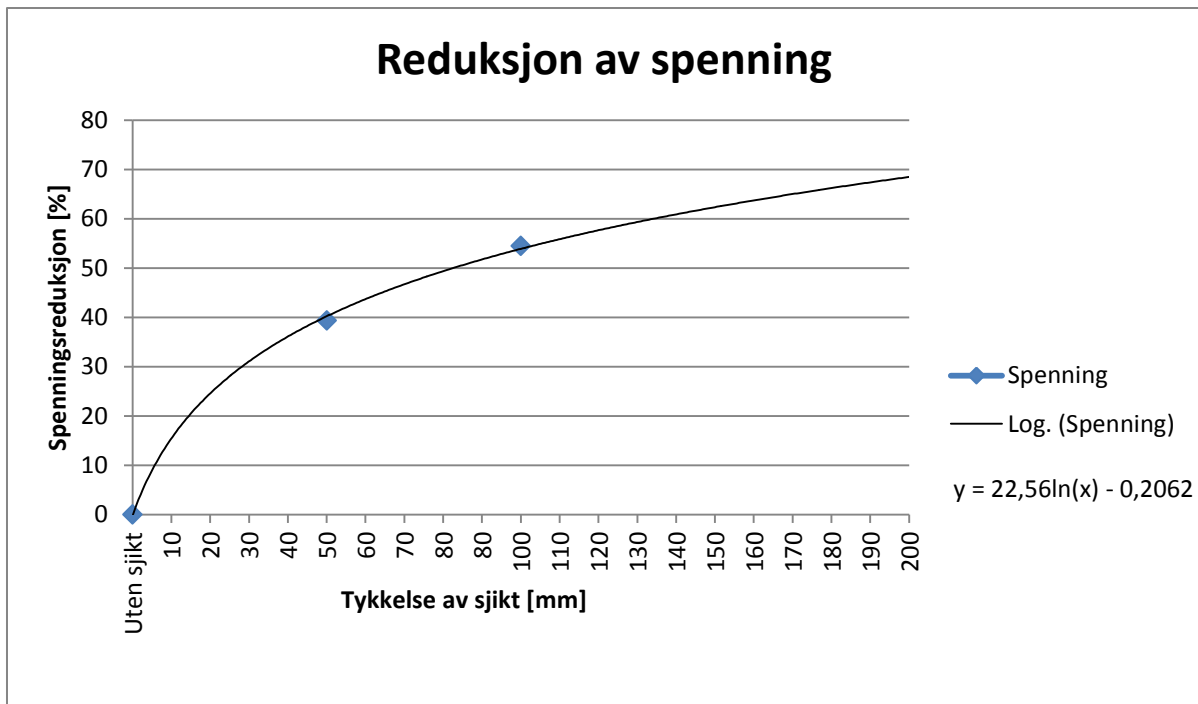
**Figur 53: Effekt av sjiktets tykkelse**

Som vi ser av tabell 18, er spenningene i simulering 2 og 3 lavere enn i simulering 1. Dette viser at bruk av et sjikt med lav stivhet vil redusere strekkspenningene i betongklossen. Ved bruk av et 50 millimeter sjikt, oppnår man en spenningsreduksjon på 39,4 %. Dette er en vesentlig reduksjon fra simuleringsscenario 1. Hvis vi dobler tykkelsen på sjiktet senkes spenningen i betongen ytterligere. Når dette er tilfellet, reduseres spenningene i betongklossen med hele 54,5 %. Ser vi kun på scenario 2 og 3, ser vi at en dobling av sjiktets tykkelse vil gi en spenningsreduksjon på 25 %.

Resultatene i dette delkapittelet gir ikke et resultat i form av rissindeks, men i form av strekkspenninger i betongkonstruksjonen. For å kunne si noe om rissindeksen i de forskjellige scenariene, må vi se på endringen av spenningene. Hvis strekkspenningene i betongen synker, vil det si at rissindeksen synker tilsvarende, gitt at strekkfastheten er konstant. Dette kommer godt frem av formel 5.

Fra kapittel 4 har vi at rissindeksen i simuleringen av Skardfosdammen er omtrent 1,5. Antar vi at det samme gjelder i denne modellen, kan rissindeksen reduseres med 39,4 % ved å legge inn et 50 millimeters sjikt mellom konstruksjonen og fjellet. Dette tilsvarer en ny rissindeks på 0,909. Dette gjør at konstruksjonen mest sannsynlig ikke vil risse. Ved å legge inn et sjikt med tykkelse på 100 millimeter vil rissindeksen reduseres til 0,68. Her vil opprissing ikke forekomme.





**Figur 54: Reduksjon av rissindeks og tykkelse av sjikt**

Ved å legge inn en trendlinje i Microsoft Excel, kan vi enkelt estimere reduksjonen i rissindeks mot tykkelsen av sjiktet. Dette er gjort i figur 53 og 54. Ved bruk av et 200 millimeters sjikt, ser vi at rissindeksen kan reduseres med nesten 70 %.

Prisen på dette tiltaket er vanskelig å fastslå, da den vil variere med hvilket materiale som benyttes, og tykkelsen til sjiktet. Det er ikke gjort tilstrekkelig med forsøk for dette tiltaket til at forfatteren kan si noe om hvilket materiale som er best egnet. I dette kapittelet er det kun bestemt at materialets E- modul skal være 1 GPa. Materialets duktilitet og fasthet er ikke tatt med i betraktningen. I tillegg er det viktig at materialet har høy varmeledningsevne, slik at det ikke gir en isolerende effekt. Dette vil kunne føre til høyere betongtemperaturer, noe som er ugunstig. Aktuelle materialer til bruk kan være polypropylen, polyetylen (HDPE) og bitumenbaserte materialer som asfalt. Dette er materialer med lav stivhet, høy elastisitet og god fasthet.



## 6. Kombinasjon av tiltak

For å få rissindeksen i den aktuelle konstruksjonen under 1,0 kan det være nødvendig å kombinere ulike tiltak. Grunnen til dette er at kun ett tiltak ofte ikke er tilstrekkelig for å redusere rissindeksen til et akseptabelt nivå. Noen tiltak lar seg lettere kombinere enn andre, og noen kombinasjoner kan gi bedre resultater enn andre med tanke på å hindre opprissing.

Bruk av flyveaske gir betongen en del fordelaktige egenskaper. Betongen blir mer kohesiv, flyter bedre, gir høyre langtidshasthet og bedre bestandighet. I tillegg gir økende andel flyveaske redusert maksimal herdetemperatur. Dette gjør at tiltaket er godt egnet til å redusere konstruksjonens rissindeks, enten alene eller i kombinasjon med andre tiltak. Flyveaske lar seg i utgangspunktet kombinere med de fleste andre tiltak. Man skal imidlertid være forsiktig med å kombinere høye doser flyveaske med tiltak som gir ekstremt lav fersk betongtemperatur, da fasthetsutviklingen vil gå svært sakte. Dette kan føre til frostproblematikk i kaldt klima, og minimal fasthet i ung betong (1, 3, 4, 5).

Ved å redusere hulrommet i tilslaget, slik at sementmengden i betongen kan reduseres, oppnår vil en minimal reduksjon av rissindeks og maksimaltemperatur. Dette tiltaket reduserer imidlertid betongkostnaden, da sement ansees som den dyreste komponenten. Dermed kan det være lurt å kombinere dette tiltaket med dyrere tiltak, slik at den totale prisen på betongen blir mer gunstig. Bruk av store steinstørrelser kan føre til utfordringer med tanke på utlegging av betongen og HMS/ SHA.

En lav fersk betongtemperatur er ofte å foretrekke. Dette kan oppnås ved å bruke knust is under blandingen av den aktuelle betongen. Senkes den ferske betongtemperaturen fra 15 °C til 5 °C, vil den maksimale herdetemperaturen synke tilsvarende. Dermed kan temperaturen i konstruksjonen reduseres uten å endre betongresepten. Dette tiltaket lar seg kombinere med de fleste andre tiltak. Siden bruk av knust is under blanding av betong gir en stor reduksjon av maksimal herdetemperatur, vil tiltak som gir ytterligere kjøling av betongen ha liten eller ingen effekt. Tiltak som kjøling av konstruksjonen med innstøpte kjølerør og nedkjøling med flytende nitrogen vil dermed være lite effektive i kombinasjon med bruk av knust is.

Bruk av sjiktmaterialer lar seg lett kombinere med andre tiltak. Grunnen til dette er at tiltaket ikke vil endre herdeforløpet til konstruksjonen, da sjiktets eneste funksjon er å redusere graden av fastholding. I denne oppgaven kan dette tiltaket benyttes alene, da et 100 millimeters sjikt vil gi en rissindeks på 0,68. En ytterligere reduksjon i rissindeks kan oppnås ved å kombinere dette tiltaket med et tiltak som senker betongens maksimale herdetemperatur.

På bakgrunn av dette kan det være lurt å kombinere bruk av flyveaske og et sjiktmateriale. Dette gjør at konstruksjonen får alle egenskapsfordelene ved bruk av flyveaske, og effekten av ytre fastholding blir tilstrekkelig liten. Disse to tiltakene kan også kombineres med et tredje eller fjerde tiltak. Dette kan være tiltak som for eksempel reduksjon av tilslagets hulrom og bruk av knust is under blandingen av betongen. På den måten kan man oppnå en god og bestandig konstruksjon, der herdetemperaturen og betongprisen holdes lav.

Under byggingen av Alta- og Førrevassdammen ble tre av de nevnte tiltakene benyttet. Flyveaske ble benyttet i betongen sammen med store tilslagsstørrelser. Dette var med på å redusere sementmengden og herdetemperaturen. I tillegg ble det benyttet knust is under blandingen av betongen. Dette førte til en lav utgangstemperatur, kombinert med lav maksimaltemperatur i konstruksjonen. Temperaturøkningen i konstruksjonen ble omtrent 20°C, noe som ikke er spesielt mye for så store og massive betongkonstruksjoner (1).

Skanska vil mest sannsynlig velge å kombinere to eller tre av disse tiltakene under produksjonen av Skardfosdammen. Bruk av et sjiktmateriale lar seg mest sannsynlig ikke gjennomføre, da løsningen kanskje ikke godkjennes av Norsk Hydro og Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE). I tillegg er det et ønske fra Skankas prosjektledelse om å legge ut betongen med betongpumpe. Dermed begrenses betongens tilslagsdiameter mest sannsynlig til maksimalt 32 millimeter. Bruk av flyveaske og kjøling av den ferske betongen med knust is vil være de mest aktuelle tiltakene for å senke herdetemperaturen og rissindeksen til et akseptabelt nivå i dette anleggsprosjektet.

## 7. Konklusjon

I denne oppgaven har vi sett på en rekke forskjellige tiltak for å redusere faren for opprissing av massive damkonstruksjoner i betong. Konstruksjonen som er utgangspunkt for disse tiltakene er betongdammen som skal bygges på Skardfoss ved Rjukan i Tinn kommune i Telemark. Det er angitt 7 forskjellige tiltak for å hindre opprissing i herdefasen. I denne oppgaven er 4 av disse beskrevet og prøvd nærmere. Prøvingen av tiltakene er gjort ved simuleringer av herdeforløpet i programmene CrackTeSt COIN og iDIANA.

Bruk av flyveaske som tilsetning i betongen, vil senke herdetemperaturen. Det er imidlertid viktig å huske på at når herdetemperaturen synker, vil betongens egenskaper utvikles tregere. Dette gjør at 28 dagers fasthet blir lavere enn ved bruk av konvensjonell betong. Dermed må man veie ønsket om lav herdetemperatur opp mot en tregere fasthetsutvikling. I denne oppgaven har vi funnet ut at økende mengde flyveaske i betongen vil redusere temperaturen i den herdende betongen. Rissindeksen følger ikke den samme trenden. Her gir bruk av 30 % flyveaske den laveste rissindeksen, mens 50 % gir lavest temperatur. Prisen på betong med flyveaske er antatt lik prisen for konvensjonell betong.

Ved å bruke tilslag med lange siktekurver og store steinstørrelser, kan sementmengden i betongen reduseres. Dette tiltaket reduserer både herdetemperaturen og rissindeksen minimalt. Bruk av store steinstørrelser i tilslaget gjør at man må bruke tungt og grovt utstyr under produksjonen. Dette gir utfordringer knyttet til utlegging og HMS/ SHA. Prisen på dette tiltaket vil være avhengig av typen tilslag som brukes. Utleggingsmetoder og utstyrsleie kan bli dyrere ved bruk av betong med store steinstørrelser. På generell basis vil betongkostnaden synke i forhold til konvensjonell betong, da sementmengden er mindre.

For å oppnå ønsket om en lav fersk betongtemperatur, kan man benytte knust is under blandingen av betongen. Ved bruk av knust is under blandingen, kan man senke utgangstemperaturen til den ferske betongen vesentlig. En lav fersk betongtemperatur vil ha stor innvirkning på både herdetemperatur og rissindeks. Knust is er forholdsvis billig å kjøpe, men noe mer kostbart å produsere selv. Produksjon av is krever spesielt utstyr, og korte transportavstander. Dette er ikke alltid tilfellet, og tiltaket kan derfor være noe utfordrende å gjennomføre.

Produksjon av nye betongkonstruksjoner i tilknytning til gamle konstruksjonsdeler, eller flater med høy stivhet, kan føre til opprissing. Et tiltak for å hindre dette, kan være å legge inn et sjikt mellom støpen og den eksisterende konstruksjonen. Sjektet har som oppgave å ta opp den termiske dilatasjonen i den herdende betongen. Tiltaket har vist seg å være svært effektivt med tanke på rissindeks, men har ingen innvirkning på betongens maksimale herdetemperatur. Tiltaket har mange bruksområder, spesielt ved utstøpning av tunneler og produksjon av massive betongkonstruksjoner mot fjell. Kostnaden av tiltaket er avhengig av sjiktets tykkelse og hvilket materiale som benyttes.

Det finnes også andre metoder som kan benyttes for å senke rissindeksen. Dette kan være kjøling av konstruksjonen med innstøpte kjølerør, oppvarming av tilstøtende konstruksjonsdeler eller kjøling av den ferske betongen med flytende nitrogen. Dette er metoder som er noe tid- og kostnads-krevende, men har blitt brukt med stort hell i andre anleggsprosjekter.

En kombinasjon av flere tiltak kan senke både rissindeksen og herdetemperaturen. Ved bruk av for eksempel 30 % flyveaske i betongen og et sjikt materiale mellom konstruksjonen og tilstøtende flater med høy E- modul, kan rissindeksen reduseres betraktning. Bruker man i tillegg knust is under blandingen av betongen, slik at den ferske betongtemperaturen blir lav, kan rissindeksen reduseres ytterligere.

## **8. Anbefalinger til videre arbeider**

Som en anbefaling til videre arbeider vil jeg foreslå følgende:

- Prøve å finne egnede materialer til bruk i sjikt. Dette må være materialer som enkelt lar seg benytte. Materialene må ha lav stivhet (E- modul) og høy elastisitet.
- Finne den kombinasjonen av tiltak som gir størst reduksjon av rissindeks, med minst mulig kostnad. Ved å veie tiltakets effekt opp mot kostnaden, kan man finne de mest økonomisk gunstige tiltakene.
- Beregne kostnad for tiltakene for spesifikke prosjekter. Ved å se tiltakene opp mot flere spesifikke prosjekter kan man få en oversikt over når det lønner seg å bruke hvilke tiltak.





## Referanser

- (1) Jacobsen S. TKT 4215 Concrete Technology. Trondheim: NTNU, Faculty of Engineering, Science and Technology, Department of Structural Engineering; 2010.
- (2) Bjøntegaard Ø. Volumendringer og rissdannelser i betong. Oslo: Statens Vegvesen; 2009.
- (3) Bremseth SK. Fly ash in concrete. A literature study of the advantages and disadvantages. COIN Project report. 2010; 18.
- (4) Malhotra VM, Ramezaniapour AA. Fly ash in concrete. Ottawa: CANMET; 1994.
- (5) Rahhal VF, Batic O. Mineral admixtures contribution to the development of heat of hydration and strength. American Society for Testing and Materials; 1994.
- (6) Sverre Smeplass. Samtaler og korrespondanse pr e- post i perioden 15.01.2012 - 11.06.2012.
- (8) Grace Construction. Hot weather concrete. Cambridge: Grace Construction; 2006. Sitert: 18.05.2012. Tilgjengelig fra:  
[http://www.na.graceconstruction.com/custom/concrete/downloads/tb\\_0101.pdf](http://www.na.graceconstruction.com/custom/concrete/downloads/tb_0101.pdf)
- (9) Sear LKA. Properties and use of coal fly ash: A valuable industrial by-product: coal fly ash, or pulverized fuel ash, from coal-fired power stations - the production, properties and applications of the material. London: Thomas Telford; 2001.
- (10) Standard Norge. NS-EN 13670:2009+NA:2010. Utførelse av betongkonstruksjoner 2010.
- (11) Smeplass S, Bjøntegaard Ø, Kompen R, Harem E. Senketunnelen i Bjørvika, erfaringsrapport. Kontroll med opprissing i betongens herdefase. Oslo: Statens Vegvesen; 2010.
- (12) EBL. Betongdammer. Oslo: EnergiNorge; 2010. Sitert 22.05.2012. Tilgjengelig fra:  
<http://www.energifakta.no/documents/Vannkraft/Betongdam.htm>
- (13) Honningsvåg B. Hydropower in the new millennium: proceedings of the 4th International Conference on Hydropower Development. Hydropower'01 in Bergen 20-22 June 2001. Lisse: A.A. Balkema; 2001
- (14) Wigum BJ, Danielsen SW, Hotvedt O, Pedersen B. Production and utilization of manufactured sand: state of the art report. Oslo: SINTEF Building and Infrastructure; 2009.
- (15) Ukjent forfatter. Kulturminner i norsk kraftproduksjon: en evaluering av bevaringsverdige kraftverk (KINK). Oslo: Norges Vassdrags- og Energidirektorat; 2006.

(16) Norges Bank. Inflasjon. Oslo: Norges Bank; 2006. Sitert 18.05.2012. Tilgjengelig fra:  
<http://www.norges-bank.no/no/prisstabilitet/inflasjon/>

## **Vedlegg**

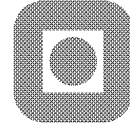


## **A. Oppgavetekst**

Vedlegget inneholder oppgaveteksten for masteroppgaven.

Se neste side.





## ***MASTEROPPGAVE 2012***

(TBA4035 Anleggs- og produksjonsteknikk, masteroppgave)

VÅREN 2012

*for stud. techn.*

**Eivind Hagen**

***Evaluering av aktuelle tiltak for å redusere faren for termisk opprissing i massive damkonstruksjoner i betong***

## **Bakgrunn**

Termisk opprissing av betongkonstruksjoner oppstår normalt i nedkjølingsfasen etter støp av store tverrsnitt (indre fastholding), i kaldskjøter og ved kontaktstøp mot fjell (ytre fastholding). Riss som skyldes ytre fastholding er normalt gjennomgående, og kan derfor være en utfordring der det er stilt krav til vanntetthet. Slike riss kan også påvirke betongens bestandighet.

Skanska skal oppgradere deler av vannkraftanleggene i Rjukanstrengen for Hydro. I dette arbeidet inngår støp av to nye massivdammer i betong, i tillegg til omfattende rehabilitering av eldre konstruksjoner. I damkonstruksjonene stilles det strenge krav både til tetthet, funksjonalitet og bestandighet. Skanska bruker det nyutviklede beregnings- programmet “CrackTeSt COIN” for analyse av risiko for termisk induisert opprissing.

## **Oppgave**

Oppgaven går ut på å vurdere hvilke tiltak som kan brukes for å redusere risikoen for oppsprekking i Skarfosdammen. Tiltakene kan være rettet både mot betongsammensetning, utførelsesteknikk og konstruksjonsutforming. Effekten av tiltakene evalueres ved hjelp av spenningsanalyser. Det hører med til oppgaven å vurdere kostnadseffektiviteten av tiltakene.

## **Gjennomføring**

Oppgaven utføres delvis på instituttet, delvis på Skanskas byggeplass på Rjukan. Kontaktperson hos Skanska er Sverre Smeplass. Gjennomføringen av oppgaven skal tilpasses de ressurser som stilles til disposisjon.

Oppgaven er utlevert 16. januar 2012, og skal innleveres til Institutt for bygg, anlegg og transport innen 12. juni 2012.

2012-01-16

Amund Bruland

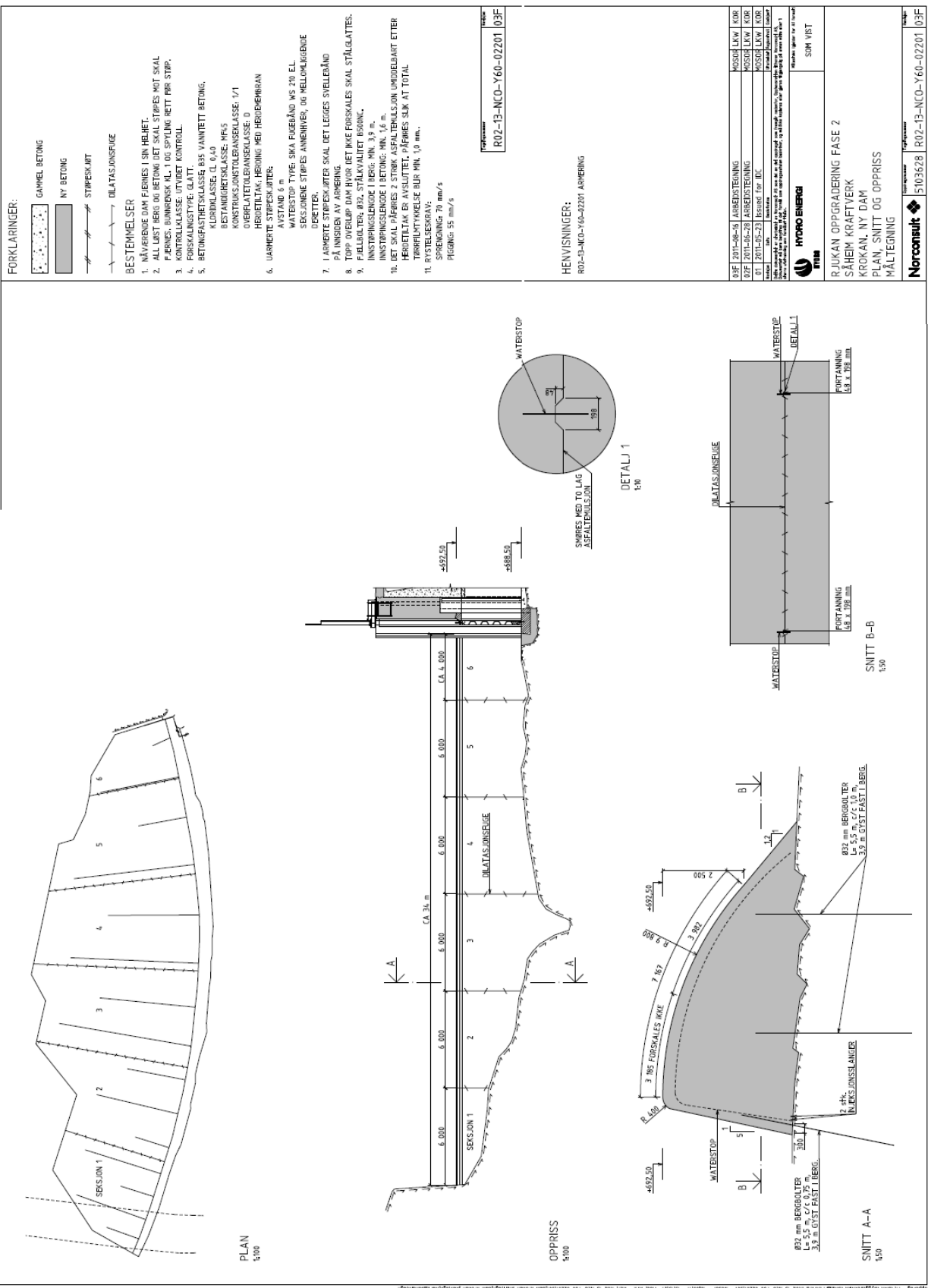
(faglærer)



## **B. Plantegninger for Krokandammen**

Vedlegget inneholder plantegning for Krokandammen ved Rjukan i Tinn kommune i Telemark.

Se neste side.



- FORKLARINGER:**
- GAMMEL BETONG
  - NY BETONG
  - STREPSKJERT
  - DILATASJONSFUGE
- BESTEMMELSER**
1. MÅVÆRENDE DAM FJERNES I SIN HØIET.
  2. ALL LØST BERG OG BETONG DET SKAL STØPES MOT SKAL FJERNES. BUNNRENS KL. 1 OG SPYLING RETT PÅ STØP.
  3. KONTROLLKLASSE: UTVIKRET KONTROLL.
  4. FORSKALINGSSTYPE: GLATT.
  5. BETONGFESTRETSKLASSE: B35 VANNTETT BETONG. KLORIKLASSE: CL 0,40
  6. REININGSBETONGKVALITET: M35
  7. KLORIKLASSE: KL 0,40
  8. OVERBEITTELKVALITETSKLASSE: 1/1
  9. OVERBEITTELKVALITETSKLASSE: 0
  10. HEBETILTAK: HESING MED HESEREMERAN
  11. UARMERTE STREPSKJERTER: AVSTAND: 6 m
  12. WATERSTOP TYPE: SKA FUGEÅND NS 210 EL. SEKSJONENE STØPES ANNEHVER, OG MELLOMLØSSENE DEKRETTES.
  13. I ARMERTE STREPSKJERTER SKAL DET LEGGES SYLLENÅND PÅ INNSIDEN AV ARMERING.
  14. TOPP OVERLØP DAM HVOR DET IKKE FORSKALES SKAL STÅLLATTES.
  15. FJALLGULTER: Ø32, STÅLKVALITET: B300C.
  16. INNSTØPPINGSLENGDE I BERG: MIN. 3,9 m.
  17. INNSTØPPINGSLENGDE I BETONG: MIN. 1,6 m.
  18. DET SKAL PÅPÅRES 2 STØRK ASPALTBELEGGSJON UNDERLÅNT ETTER HEBETILTAK ER AVSLUTTET, PÅPÅRES SIKR AT TOTAL HEBETILTAKSLENGDE ER: 3,9 m.
  19. SPREIDNING: 70 mm/s
  20. FUGING: 55 mm/s

**HENVISNINGER:**

R02-13-NCO-Y60-02201 ARMERING

PROJEKTNUMMER	REVISJON
R02-13-NCO-Y60-02201	03F

DRIF	2011-06-04	ARBEIDSTEGNING	MOSCH	LAW	KOR
DRIF	2011-06-28	ARBEIDSTEGNING	MOSCH	LAW	KOR
DRIF	2011-06-28	REVISJON FOR BIC	MOSCH	LAW	KOR

**HYDRO ENERGI**

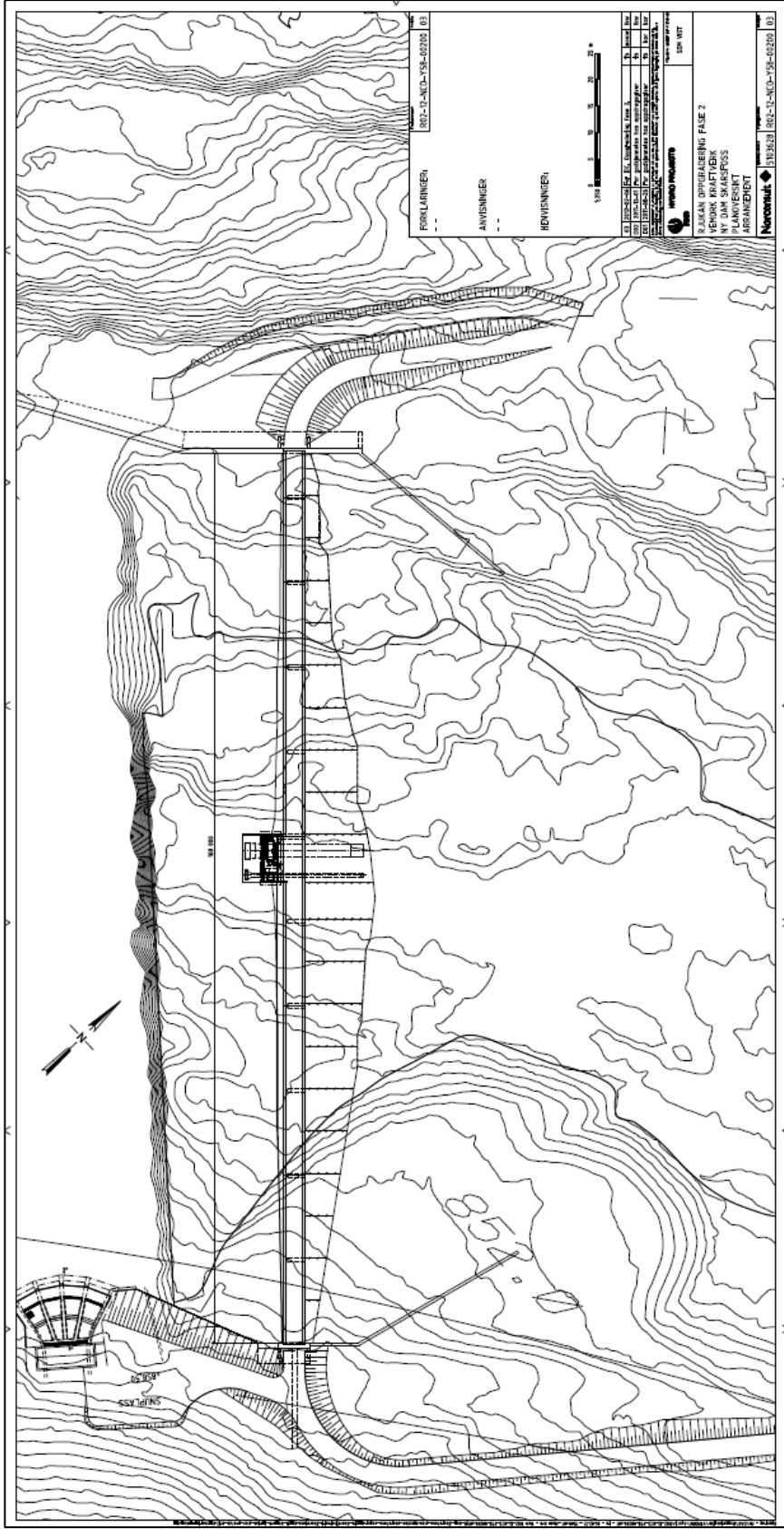
**RUKAN OPPGRADERING FASE 2**  
**SÅHEIM KRAFTVERK**  
**KROKAN, NY DAM**  
**PLAN, SNITT OG OPPRISS**  
**MÅLTEGNING**

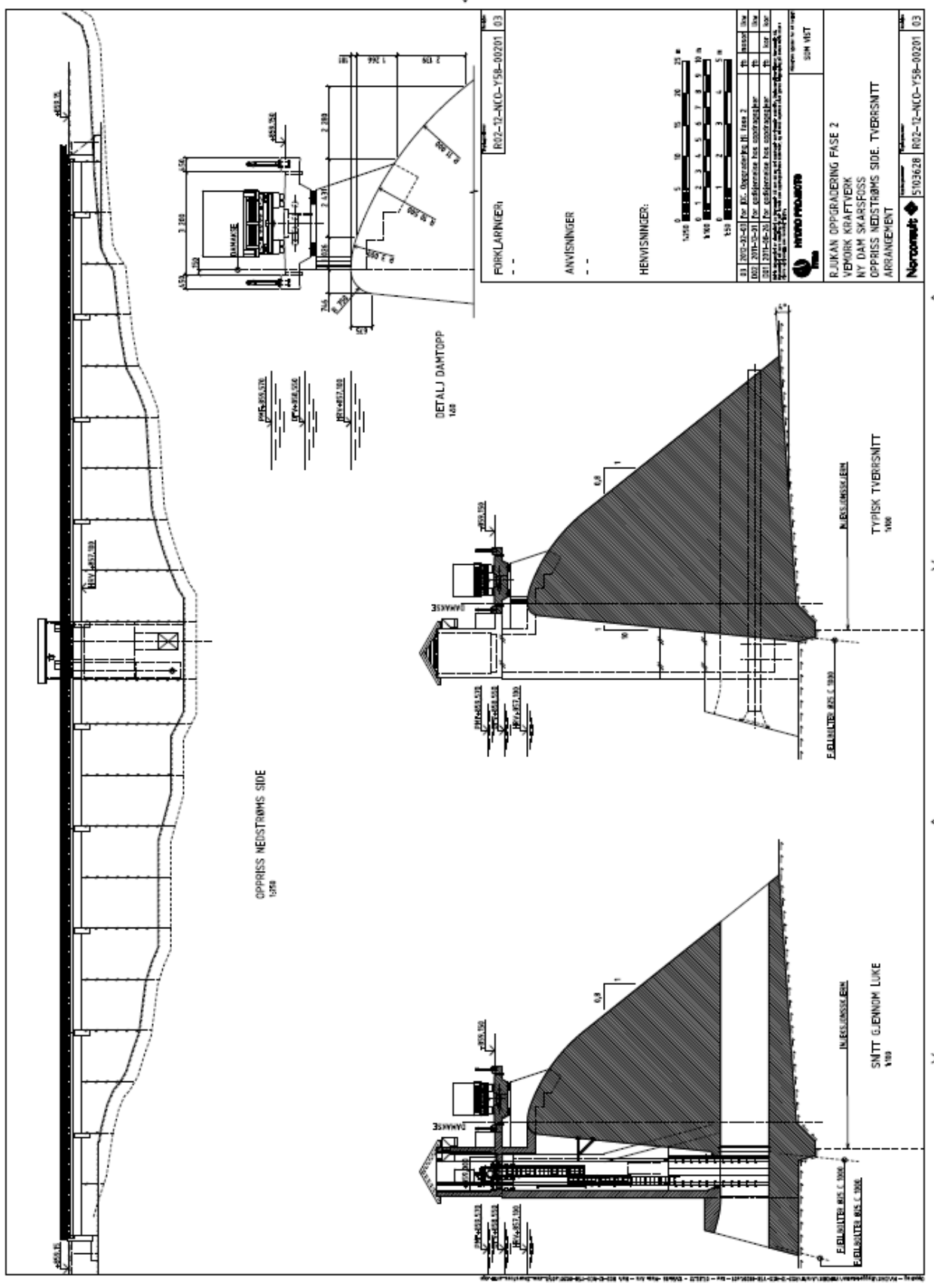
**Norconsult** 5103628 R02-13-NCO-Y60-02201 03F

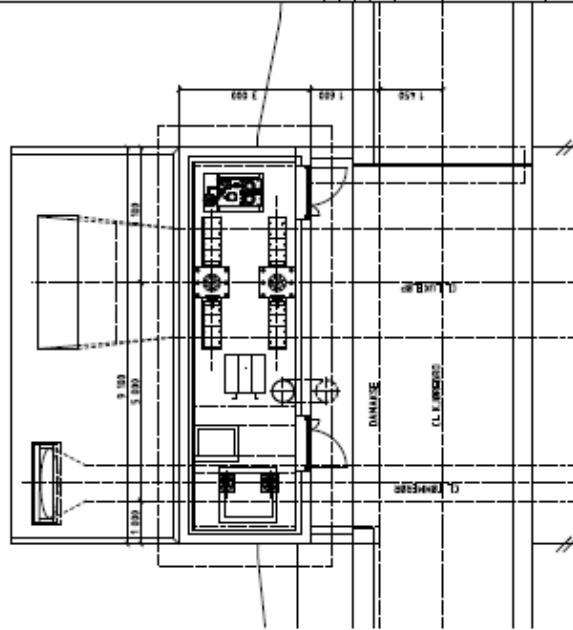
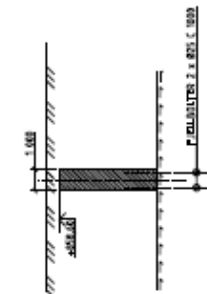
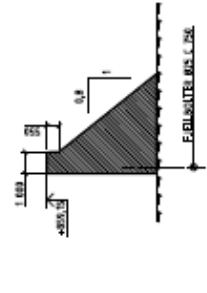
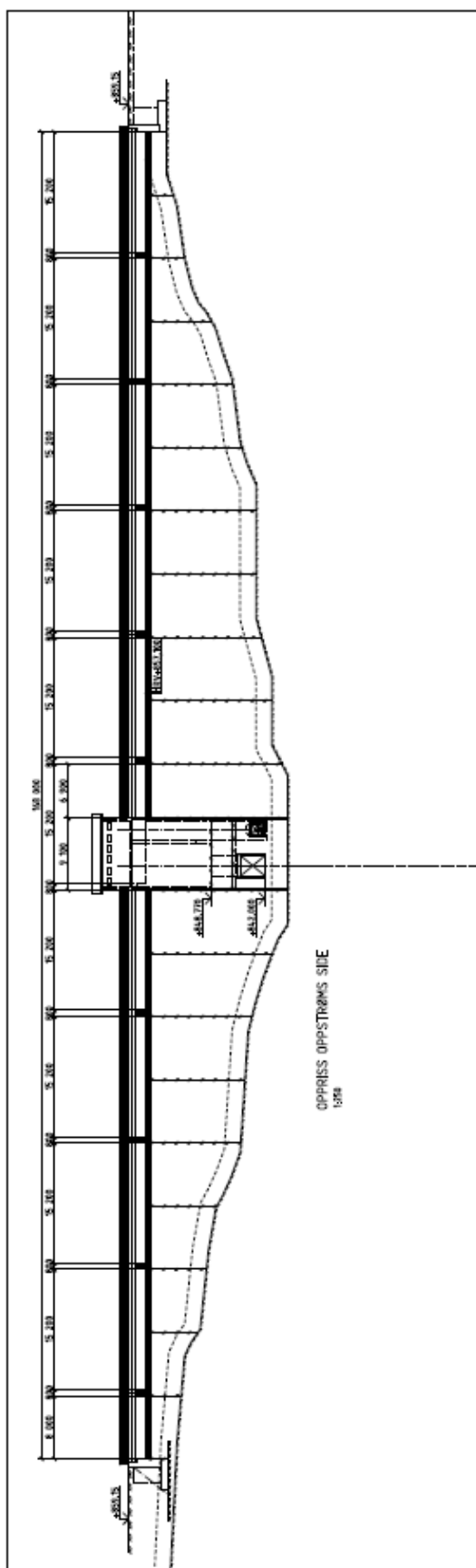
## **C. Plantegninger for Skardfosdammen**

Vedlegget inneholder tegninger av plan og snitt fra Skardfosdammen ved nordenden av Skardfoss. Tegningene er produsert av Norconsult for Skanska og Norsk Hydro.

Se neste side.







**FORKLARINGER:** R02-12-NCD-Y58-00202\_03

**ANVISNINGER:**

**HEVSNINGER:**

1:500	0	5	10	15	20	25	30
1:500	0	5	10	15	20	25	30
1:500	0	5	10	15	20	25	30

81. 2002-01-20	For BK. Oppgradering II fase 2	Dr. Ingeborg	Dr. Ingeborg
003. 2015-05-21	For endringerne bas. konstruksjoner	Dr. Ingeborg	Dr. Ingeborg
001. 2015-06-26	For endringerne bas. konstruksjoner	Dr. Ingeborg	Dr. Ingeborg

**INTRO PROSJEKT**

**SEM VEST**

**RUKAN OPPGRADERING FASE 2**  
**NY DAM KRAFTVERK**  
**NY DAM SKARFSS**  
**OPPRISS OPPSTRØMS SIDE, TVÆRSNITT SØEDAMMER**  
**PLAN LUKERUS, ARRANGEMENT**

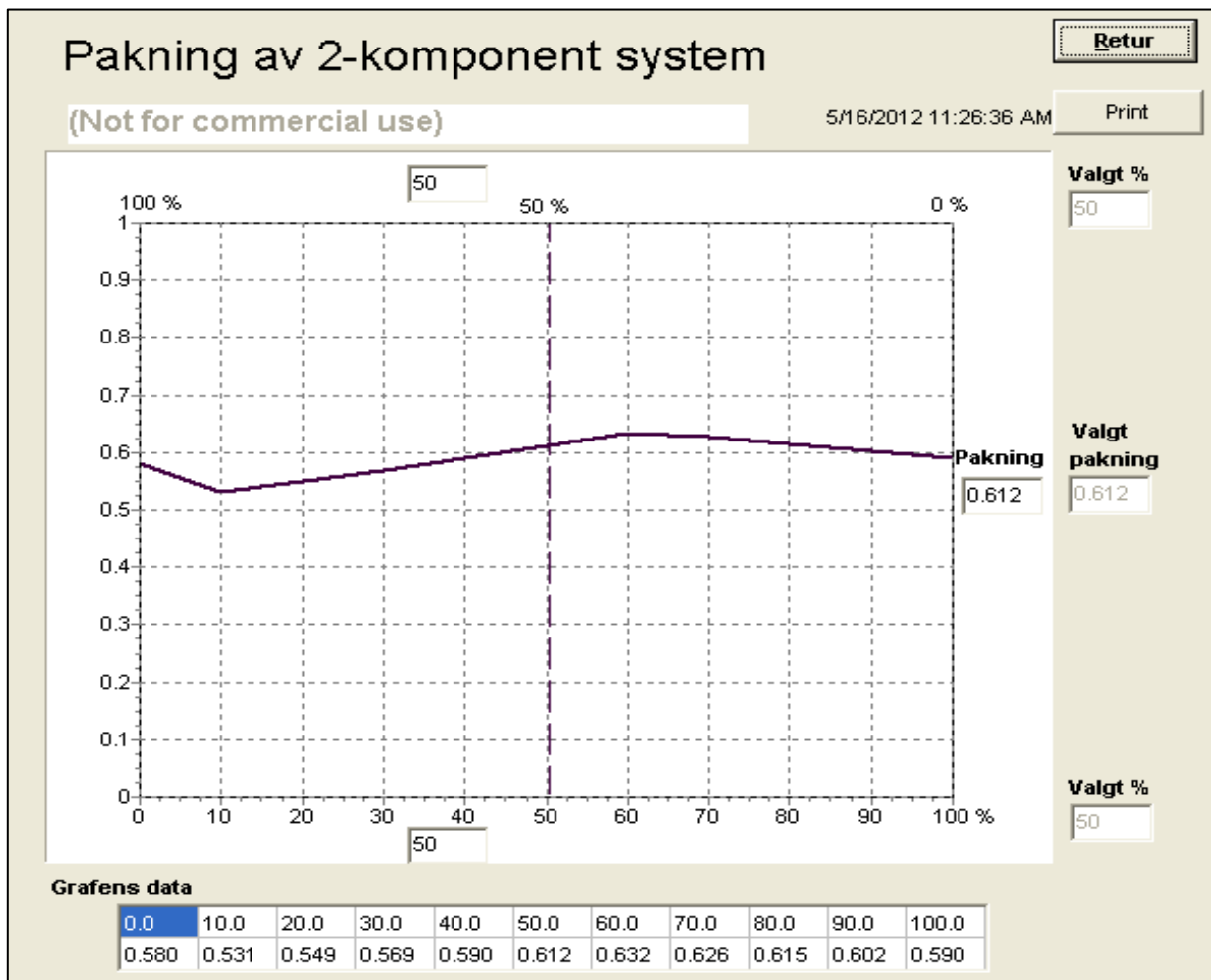
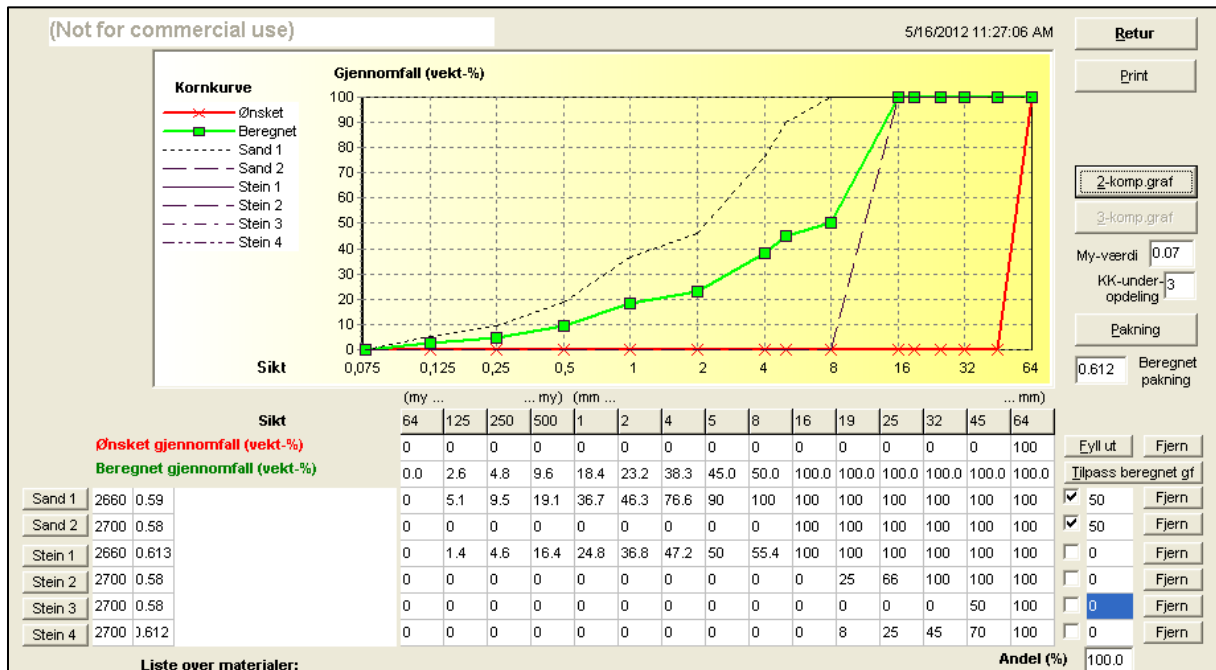
**Norconsult** 15103628 R02-12-NCD-Y58-00202\_03

## **D. Dokumentasjon fra 4C Packing**

Vedlegget inneholder skjermbilder fra programmet 4C Packing, brukt for å finne hulrom i sammensatte tilslag.

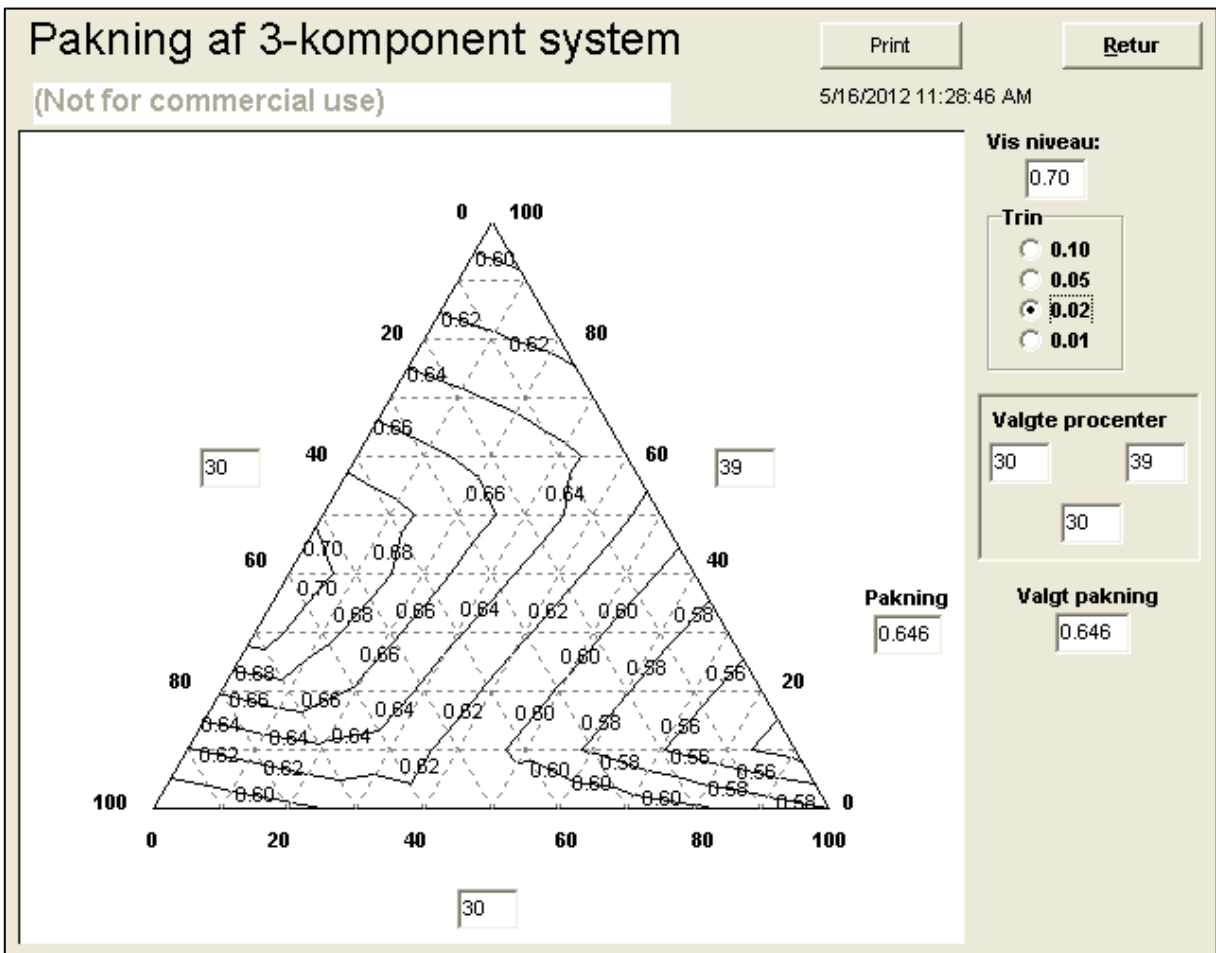
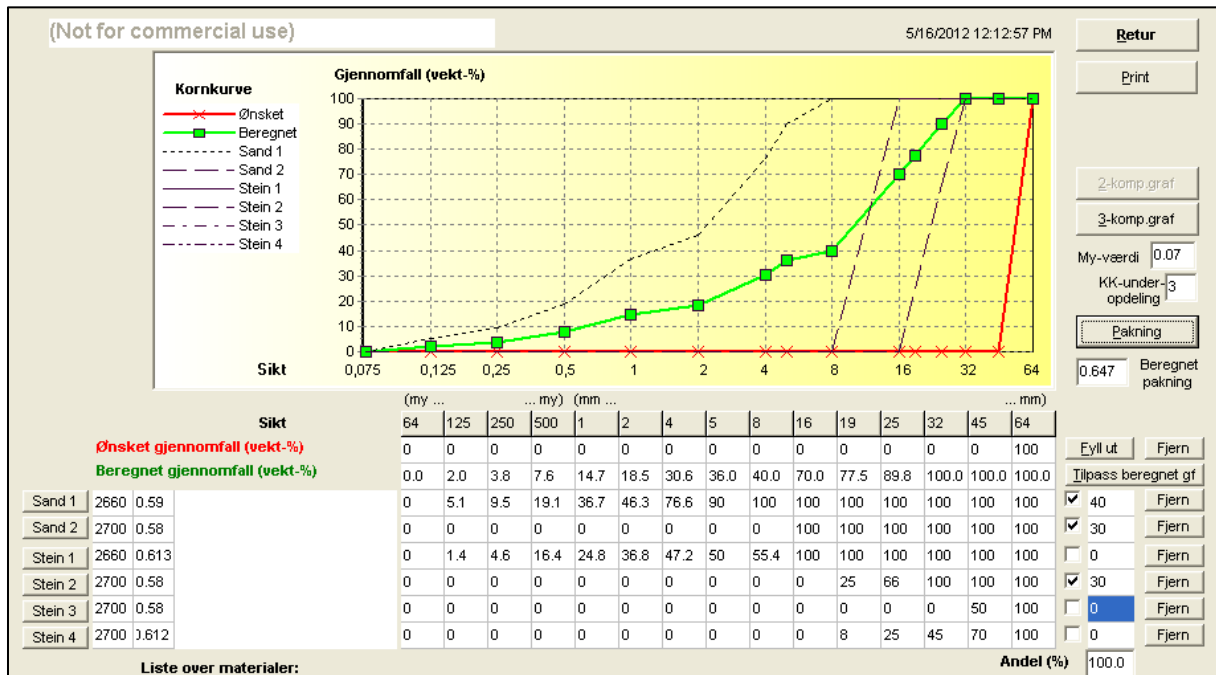
Se neste side.

# 0- 16 mm

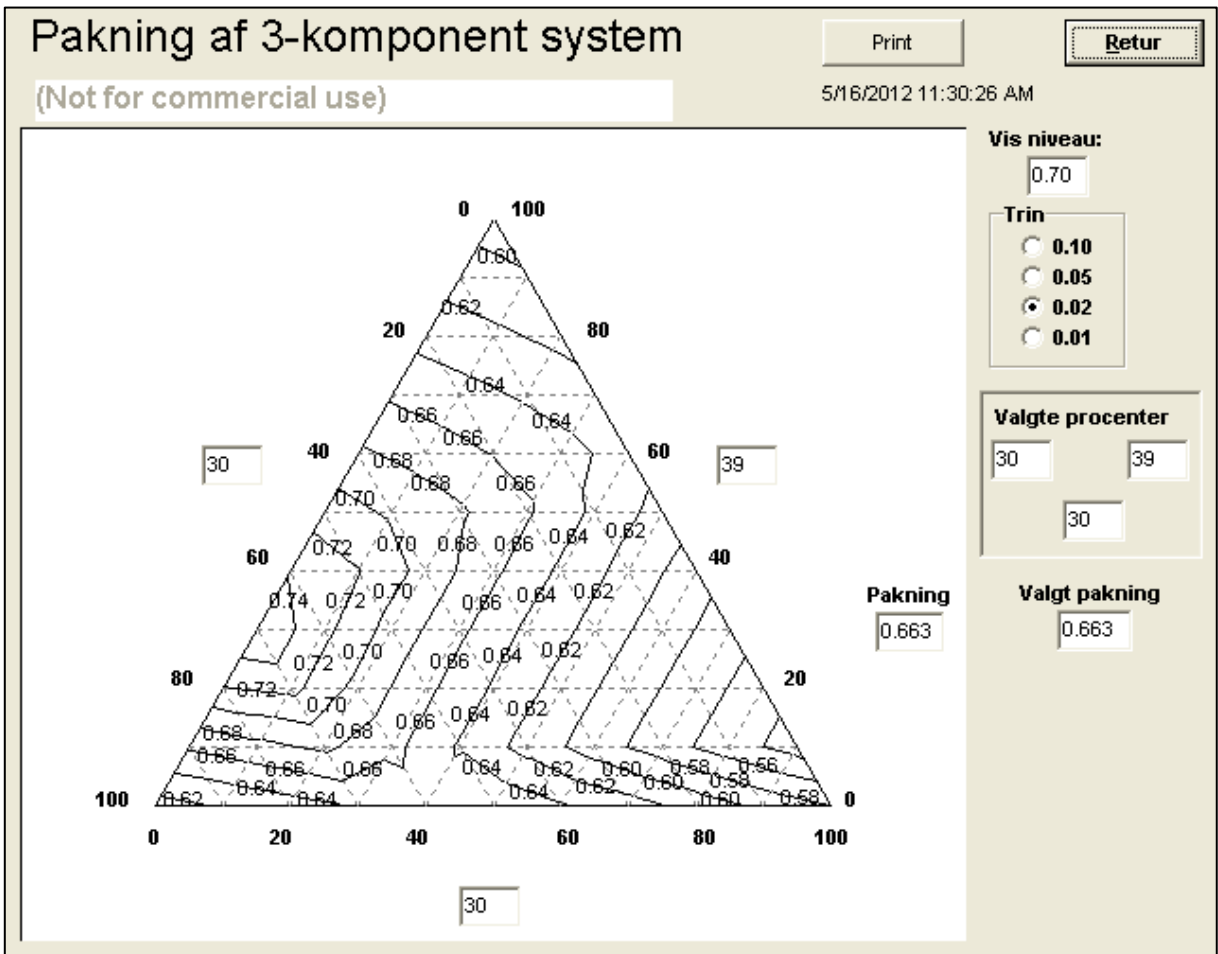
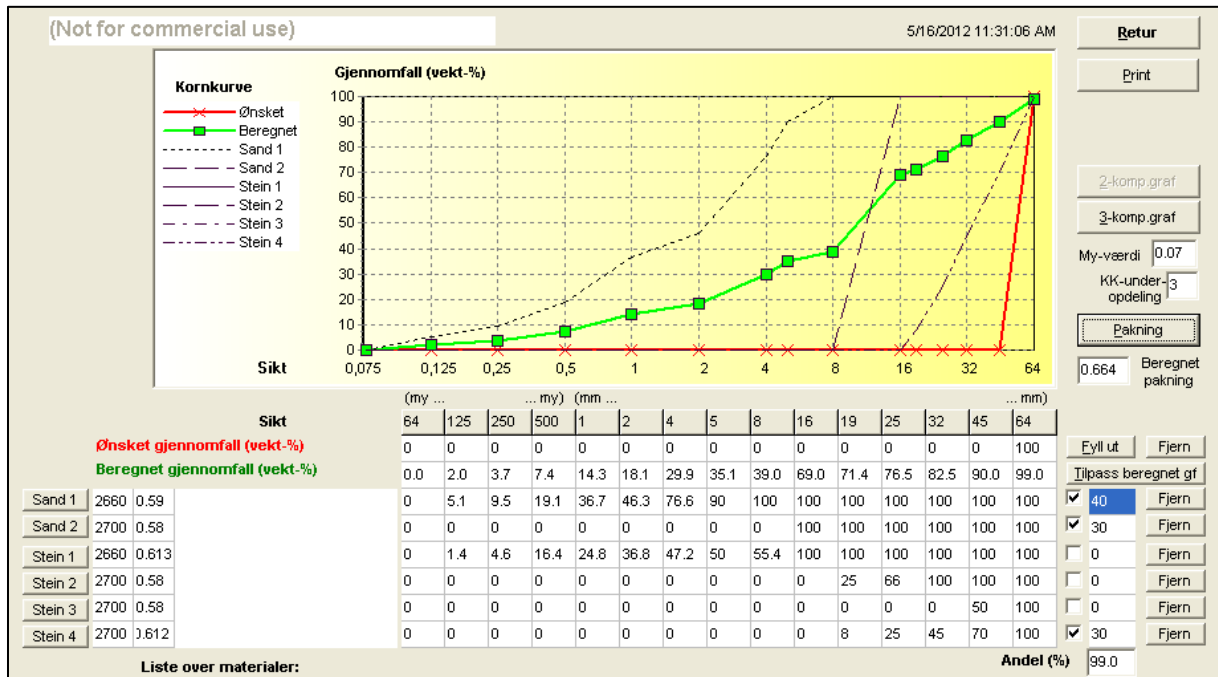




# 0- 32 mm



# 0- 64 mm



## **E. Endring av sementmengde i betong med redusert matriksvolum**

Vedlegget inneholder utskrifter fra Microsoft Excel. Her er sementmengden i betong funnet ved å endre betongens matriksvolum.

Se neste side.







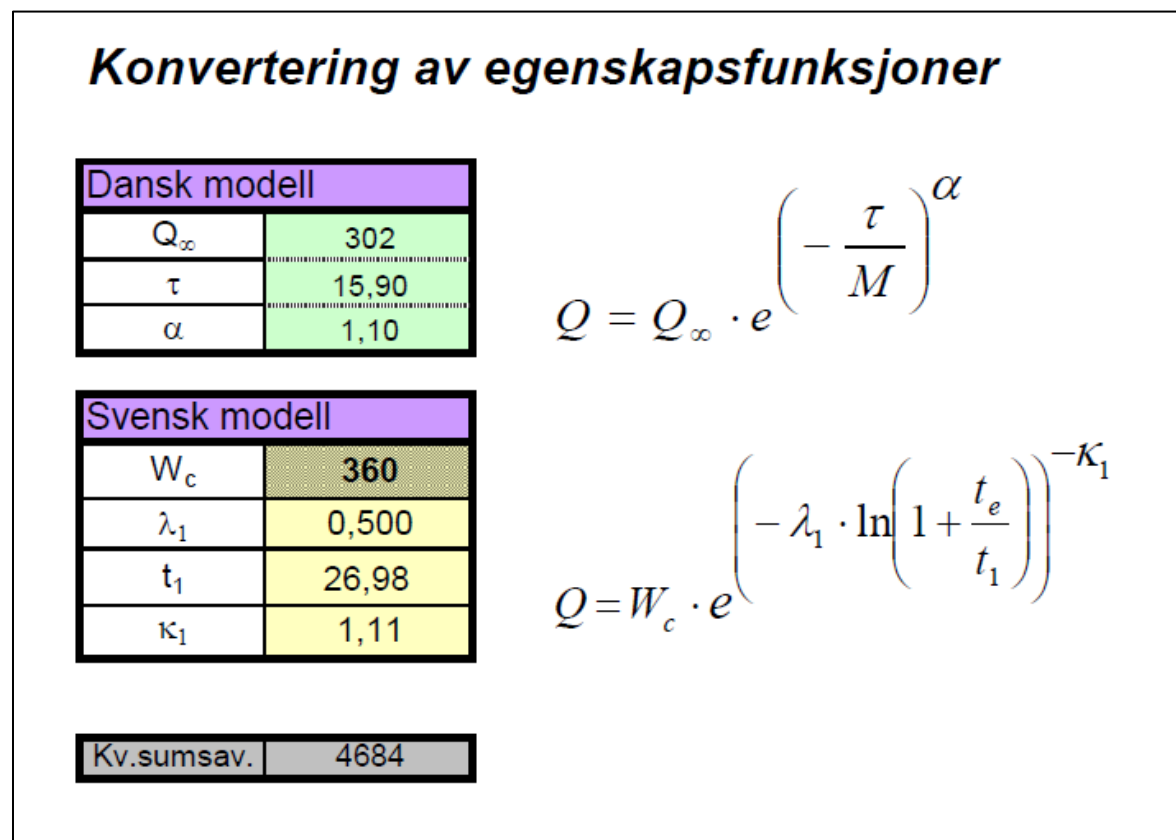
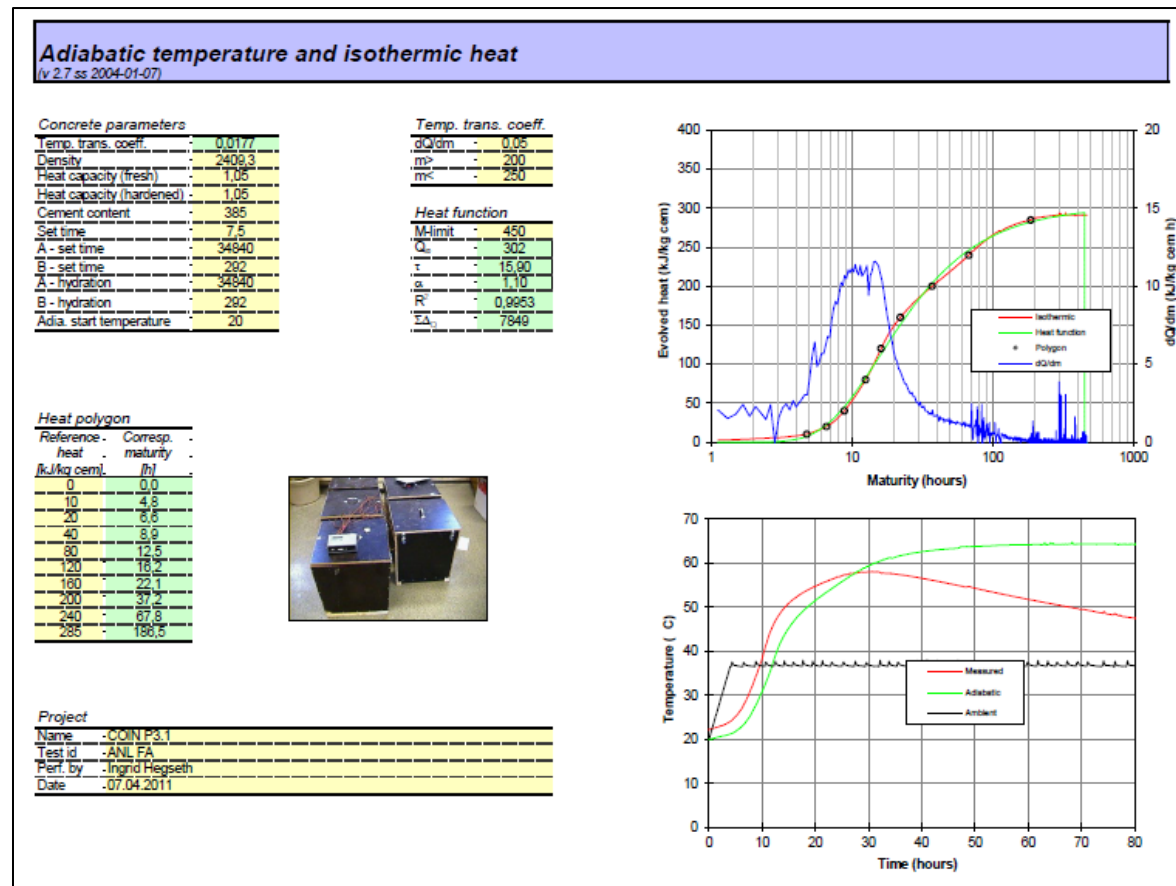
## **F. Betongdata for betonger med flyveaske**

Vedlegget inneholder data fra herdekasseforsøk gjort av Sintef COIN, samt danske og svenske parametere for disse betongene. Prøvedata fra NCC finnes til sist i vedlegget.

Se neste side.



## 20 % flyveaske





## 30 % flyveaske

### Adiabatic temperature and isothermic heat

(v 2.7 ss 2004-01-07)

#### Concrete parameters

Temp. trans. coeff.	0,0180
Density	2392
Heat capacity (fresh)	1,04
Heat capacity (hardened)	1,04
Cement content	379
Set time	7
A - set time	32000
B - set time	500
A - hydration	32000
B - hydration	500
Adia. start temperature	20

#### Temp. trans. coeff.

d/d <sub>0</sub> m	0,03
m <sup>2</sup>	370
m <sup>2</sup>	418

#### Heat function

M-limit	416
Q <sub>∞</sub>	276
τ	17,13
α	1,21
R <sup>2</sup>	0,9910
ΣΔ <sub>i</sub>	24858

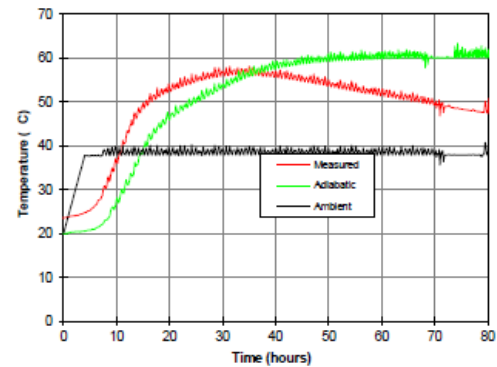
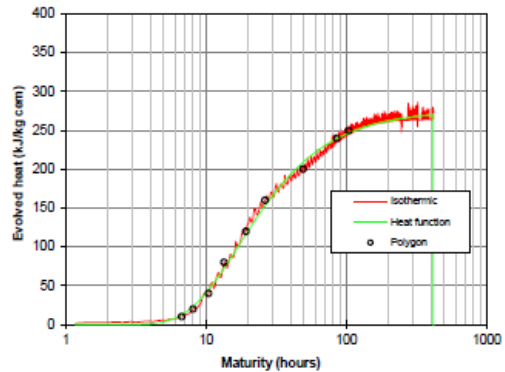
#### Heat polygon

Reference heat kJ/kg ceml.	Corresp. maturity [h]
0	0,0
10	6,7
20	8,1
40	10,5
80	13,5
120	15,2
160	16,4
200	17,3
240	18,2
280	18,6
320	19,0



#### Project

Name	-COIN P3.1
Test id	-ANL FA + 10 FA
Perf. by	-Ingrid Hegseth
Date	-21.06.2011



## Konvertering av egenskapsfunksjoner

Dansk modell	
Q <sub>∞</sub>	276
τ	17,13
α	1,21

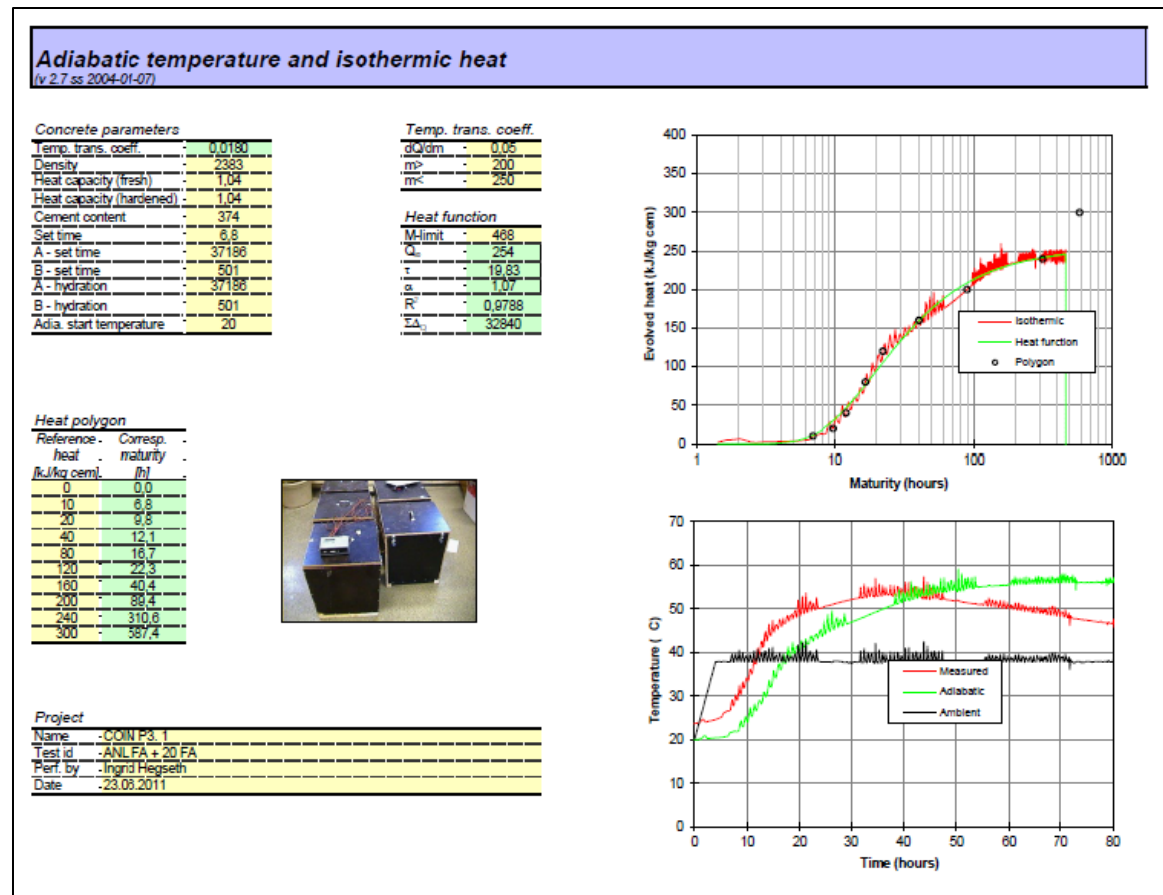
$$Q = Q_{\infty} \cdot e^{\left(-\frac{\tau}{M}\right)^{\alpha}}$$

Svensk modell	
W <sub>c</sub>	360
λ <sub>1</sub>	0,325
t <sub>1</sub>	29,57
κ <sub>1</sub>	1,10

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

Kv.sumsav.	541792
------------	--------

## 40 % flyveaske



## Konvertering av egenskapsfunksjoner

Dansk modell	
Q <sub>∞</sub>	254
τ	19,83
α	1,07





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

Svensk modell	
W <sub>c</sub>	360
λ <sub>1</sub>	0,325
t <sub>1</sub>	29,57
κ <sub>1</sub>	1,10

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

Kv.sumsav.	1252328
------------	---------

## Prøvningsrapport 30 % flyveaske

 <b>SINTEF</b>  <b>SINTEF Byggforsk</b> Betong- og natursteinlaboratoriene Postadresse: 7465 Trondheim Besøksadresse: Richard Birkelands vei 3 Telefon: 73 59 52 24 Telefaks: 73 59 71 36  Foretaksregisteret: NO 948 007 029 MVA  Sertifisert prøvingslaboratorium U16 	<b>PRØVINGSRAPPORT</b>		
	OPPDRAAGSGIVER <b>NCC Construction AS</b> <b>Losgata 3</b> <b>7042 Trondheim</b>		
	BESTILLING / OPPDRAGSGIVERS REF Sven-Inge Asplund		
	OPPDRAGETS ART <b>TUNNEL MØLLENBERG</b> <b>Dokumentasjon av egenskaper for utstøpt betong</b> - <b>Trykkfasthet</b> - <b>Strekkfasthet</b> - <b>Dilatasjon</b>		
GRADERING Fortrolig	ELEKTRONISK ARKIVKODE I:\Pro\3D0593 - BETONGPRØVING\Fag\33380-33389\33380 NCC	FAGLIG ANSVARLIG Per Arne Dahl 	RAPPORTNUMMER 33380
PROSJEKTNR 3D0593.31	DATO 2010-08-25	SAKSBEARBEIDER  Mari Bøhnsdalen Eide/ Sindre Sandbakk	ANT SIDER/VEDLEGG 4/1

### 1 Mottatt fersk betong og tillaging av prøvestykker

SINTEF Byggforsk mottok fersk betong fra NorBetongs blandeverk på Heggstadmyra tirsdag 2010-07-06, klokken 1500. Utstøping ble gjort i tidsrommet 15.00 - 15.40 samme dag.

Det ble støpt ut:

- 44 terninger med dimensjon 100x100x100 mm til bestemmelse av trykkfasthet
- 9 prismer med dimensjon 10 x100x600 mm til bestemmelse av E-modul og strekkfasthet
- 1 prisme med dimensjon 100x100x500 mm til dilatasjonsforsøk

Egenskaper for den ferske betongen er gitt i tabell 1.

**Tabell 1: Egenskaper, fersk betong**

Luftinnhold	Densitet
4,4 %	2340 kg/m <sup>3</sup>

Prøvningsresultatene refererer seg kun til de aktuelle prøver.  
Uttragsvis eller forkortet gjengivelse samt eventuell oversettelse av rapporten skal godkjennes av SINTEF.  
Prøvematerialet kan kastes 1 måned etter rapportdato dersom ikke annet er avtalt skriftlig.

## 2 Trykkfasthet

Det ble støpt ut totalt 44 stk 100 mm terninger for bestemmelse av trykkfasthet etter herding ved henholdsvis 5, 20 og 35 °C. Terningene ble støpt ut i former som på forhånd var lagret ved aktuell temperatur. Etter utstøping ble formene oppbevart tildekket i vannbad ved de ulike temperaturnivåene fram til avforming. Etter avforming ble terningene vannlagret ved aktuell temperatur. Terningene er prøvd etter NS 12390-3. Resultatene er gitt i tabell 2.

**Tabell 2 Resultater trykkfasthet**

Temperatur	5°C		20°C		35°C		
	Termin	Enkelt-resultat	Snitt	Enkelt-resultat	Snitt	Enkelt-resultat	Snitt
Trykkfasthet, MPa	8 timer					6,6	6,5
						6,3	
	16 timer			6,7	5,9	16,5	16,5
				5,1		16,4	
	20 timer			10,6	10,7	19,2	19,5
				10,8		19,8	
	27 timer					21,5	21,8
						22,0	
	38 timer			18,7	19,1	25,9	25,7
				19,4		25,5	
	50 timer	11,3	11,2	22,2	22,1		
		11,1		22,0			
	72 timer	16,3	16,3	25,4	25,5		
		16,2		25,5			
	93 timer					37,9	38,5
						39,0	
	118 timer	23,7	23,7				
		23,6					
168 timer	26,7	26,4	32,5	32,9			
	26,0		33,3				
240 timer	30,6	30,7					
	30,7						
336 timer			40,6	40,3			
			40,0				
360 timer	33,9	34,1					
	34,3						
28 døgn	38,5	38,5	52,0	51,9	62,4	62,8	
	38,4		51,8		63,1		

Prøvningsresultatene refererer seg kun til de aktuelle prøver.  
 Utdragsvis eller forkortet gjengivelse samt eventuell oversettelse av rapporten skal godkjennes av SINTEF.  
 Prøvematerialet kan kastes 1 måned etter rapportdato dersom ikke annet er avtalt skriftlig.

### 3 E-modul og strekkfasthet

Det ble utstøpt totalt 9 prizmer med dimensjon 100 x 100 x 600 mm til bestemmelse av E-modul og (direkte) strekkfasthet, som ble bestemt ved 1, 3 og 29 døgn. Prøvingen er utført i henhold til SINTEFs interne prosedyre KS 14-05-04-106.

På prøvedatoen for 28 døgn, 2010-08-03, ble det oppdaget at prismene hadde ligget i luft, mest sannsynlig i de siste 14 dagene. De ble da lagt i vann 1 døgn, og prøvd ved 29 døgnns alder, 2010-08-04. En halvdel fra hvert prisme ble deretter vannlagret frem til 2010-08-05. Terninger ble så tildannet og trykkprøvd ved 30 døgnns alder.

Resultater for E-modul, strekkfasthet og trykkfasthet er gjengitt i henholdsvis tabell 3, 4 og 5. Kurver for spenning/tøyning er gitt i vedlegg 1.

**Tabell 3 Resultater for E-modul**

Prisme nr.		1	2	3	Snitt	Std.avvik
E-modul, GPa Prøvd etter	1 døgn	18,7	18,5	18,7	18,6	0,15
	3 døgn	22,1	22,6	23,2	22,6	0,55
	29 døgn	26,2	29,0	29,3	28,2	1,74

**Tabell 4 Resultater for strekkfasthet**

Prisme nr.		1	2	3	Snitt	Std.avvik
Strekkfasthet, MPa Prøvd etter	1 døgn	1,50	1,28	1,31	1,40	0,12
	3 døgn	2,29	2,34	2,15	2,30	0,10
	29 døgn	4,28	4,37	4,19	4,30	0,09

**Tabell 5 Resultater for trykkfasthet av terninger tildannet fra prizmer**

Prisme nr.		1	2	3	Snitt	Std.avvik
Trykkfasthet, MPa	30 døgn	51,6	53,0	53,0	52,5	0,80

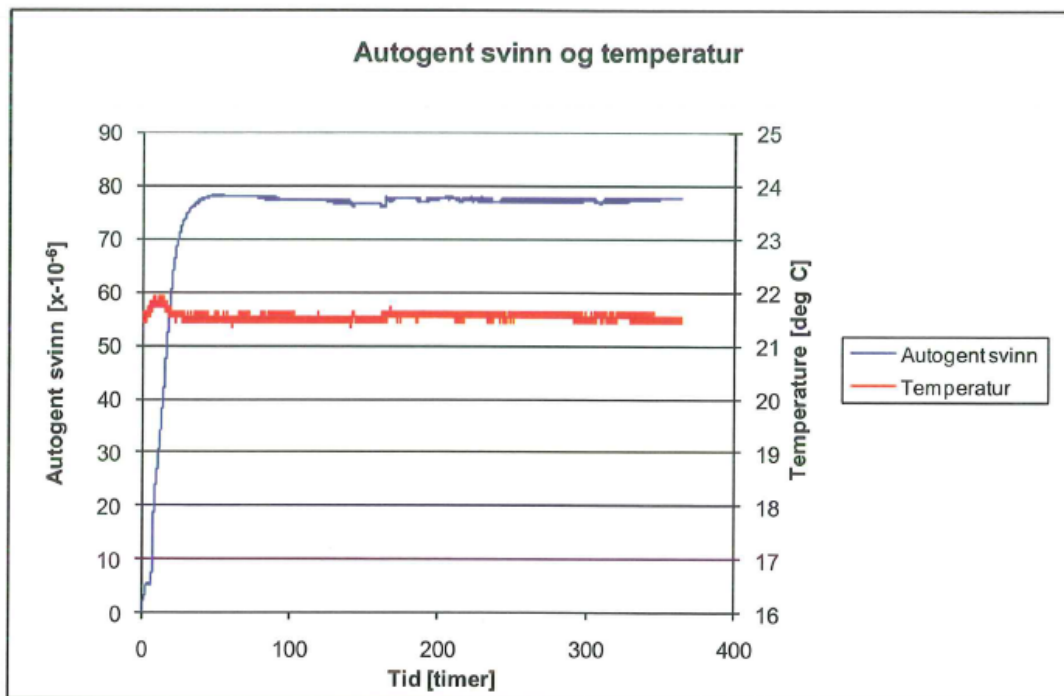
Prøvningsresultatene refererer seg kun til de aktuelle prøver.  
Utdragsvis eller forkortet gjengivelse samt eventuell oversettelse av rapporten skal godkjennes av SINTEF.  
Prøvematerialet kan kastes 1 måned etter rapportdato dersom ikke annet er avtalt skriftlig.

#### 4 Dilatasjon/autogent svinn

Autogen deformasjon ble bestemt på et 100/100/500 mm prisme. Prøvingen ble utført i henhold til SINTEFs interne prosedyre KS70 135. Prøvingen ble avsluttet etter 15 døgn, da strømbrydd forstyrret temperaturkontrollen. Tiden er angitt som timer etter kl 1700 2010-07-06. Prøvestykket var isolert under forsøket. Resultatene er gitt i tabell 6, mens figur over det autogene svinnet er gitt i figur 1.

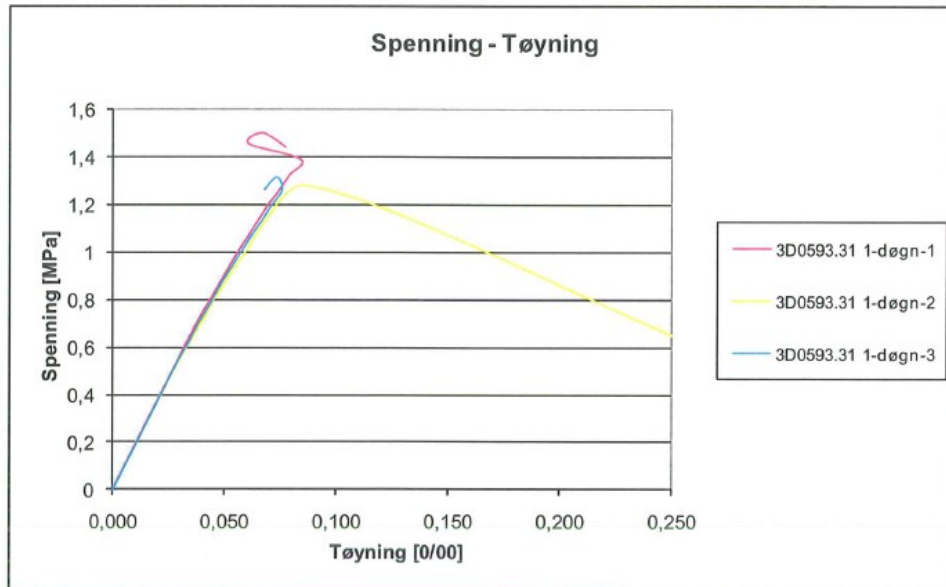
**Tabell 6 Resultater autogent svinn**

Autogent svinn, $10^{-6}$	77,5
---------------------------	------

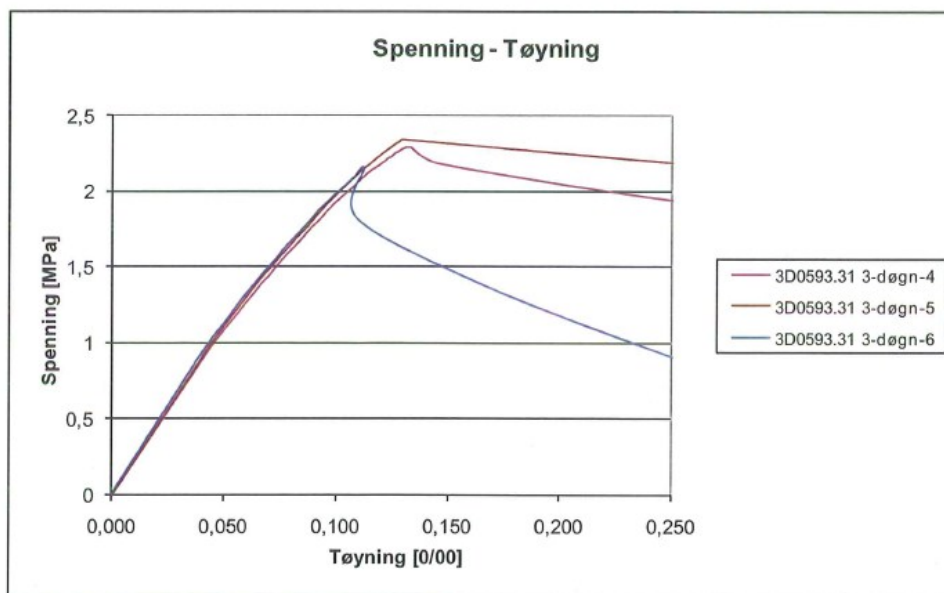


**Figur 1 Autogent svinn etter 15 døgn**



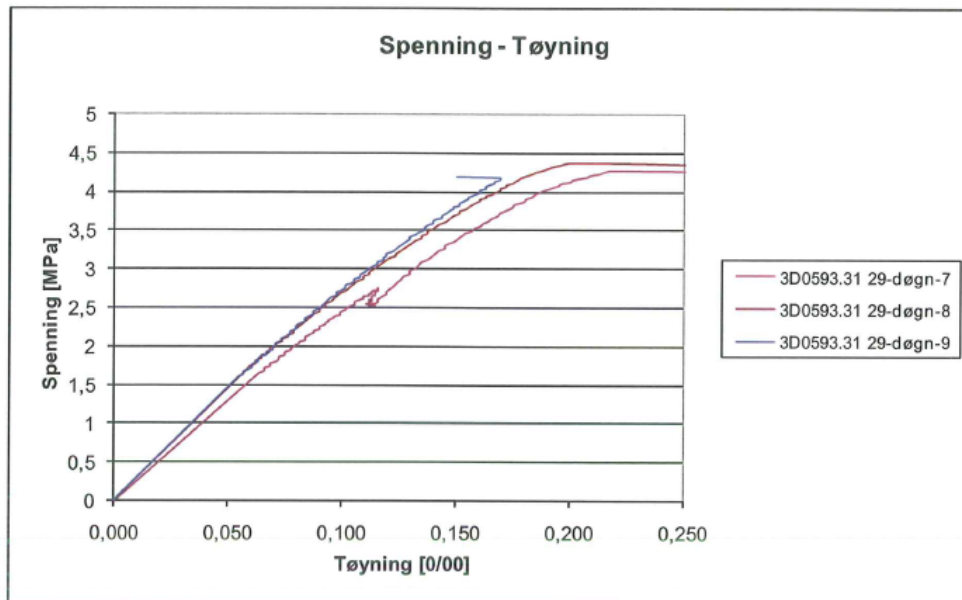


Figur 2 Spenning/tøying ved 1 døgns alder



Figur 3 Spenning/tøying ved 3 døgns alder

Prøvsresultatene refererer seg kun til de aktuelle prøver.  
Utdragsvis eller forkortet gjengivelse samt eventuell oversettelse av rapporten skal godkjennes av SINTEF.  
Prøvematerialet kan kastes 1 måned etter rapportdato dersom ikke annet er avtalt skriftlig.



Figur 4 Spenning/tøyning ved 29 døgns alder

Prøvningsresultatene refererer seg kun til de aktuelle prøver.  
Utdragsvis eller forkortet gjengivelse samt eventuell oversettelse av rapporten skal godkjennes av SINTEF.  
Prøvematerialet kan kastes 1 måned etter rapportdato dersom ikke annet er avtalt skriftlig.



## Prøvningsrapport 50 % flyveaske

 <b>SINTEF</b> <b>SINTEF Byggforsk</b> Betong- og natursteinlaboratoriene Postadresse: 7465 Trondheim Besøksadresse: Richard Birkelands vei 3 Telefon: 73 59 52 24 Telefaks: 73 59 71 36  Foretaksregisteret: NO 948 007 029 MVA  Sertifisert prøvingslaboratorium U16 		<b>PRØVINGSRAPPORT</b>	
		OPPDRAAGSGIVER <b>NCC Construction AS</b> <b>Losgata 3</b> <b>7042 Trondheim</b>	
		BESTILLING / OPPDRAGSGIVERS REF Sven-Inge Asplund	
OPPDRAGETS ART <b>TUNNEL MØLLENBERG - Ung Betong LVB 100 % FA</b> <b>Dokumentasjon av egenskaper for utstøpt betong</b> - Trykkfasthet - Strekkfasthet - Dilatasjon - Herdekasseberegninger			
GRADERING Fortrolig			
ELEKTRONISK ARKIVKODE I:\Pro\3D0593 - BETONGPRØVING\Fagl\33400-33409\33409-A Ung Betong LVB 100 % FA.docx		FAGLIG ANSVARLIG Per Arne Dahl 	RAPPORTNUMMER 33409/A
PROSJEKTNR 3D0593.42	DATO 2011-06-30	SAKSBEARBEIDER  Mari Bøhnsdalen Eide/ Gunrid Kjellmark	ANT SIDER/VEDLEGG 5/2

### 1 Mottatt fersk betong og tillaging av prøvestykker

SINTEF Byggforsk mottok fersk betong fra NorBetongs blandeverk på Heggstadmyra mandag 2011-03-21, klokken 12:30. Vanntilsetning var gjort klokken 12:02, og utstøping ble gjort i tidsrommet 12:30 – 13:30 samme dag.

Det ble støpt ut:

- 44 stk 100 mm terninger til bestemmelse av trykkfasthet
- 9 stk 100×100×600 mm prismer til bestemmelse av F-modul og strekkfasthet
- 3 stk 100×100×500 mm prismer til dilatasjonsforsøk
- Herdekasse, 300 dm<sup>3</sup>

### 2 Fersk betong

Ved mottak ble den ferske betongen prøvd hos SINTEF etter NS-EN 12350 for bestemmelse av synk (del 2), densitet (del 6) og luftinnhold (del 7).

Resultatene er gjengitt i tabell 1.

Tabell 1: Egenskaper, fersk betong

Synk, mm	Luftinnhold %	Densitet kg/m <sup>3</sup>
230	2,8	2375

Prøvningsresultatene refererer seg kun til de aktuelle prøver.  
Utdragsvis eller forkortet gjengivelse samt eventuell oversettelse av rapporten skal godkjennes av SINTEF.  
Prøvematerialet kan kastes 1 måned etter rapportdato dersom ikke annet er avtalt skriftlig.

### 3 Trykkfasthet

Det ble støpt ut totalt 44 stk 100 mm terninger for bestemmelse av utvikling av trykkfasthet under herding ved henholdsvis 5, 20 og 35 °C. Terningene ble støpt ut i former som på forhånd var lagret ved aktuell temperatur. Etter utstøping ble formene oppbevart tildekket i vannbad ved de ulike temperaturnivåene fram til avforming. Etter avforming ble terningene vannlagret ved aktuell temperatur. Terningene er prøvd etter NS 12390-3. Resultatene er gitt i tabell 2.

**Tabell 2 Resultater for trykkfasthet**

Temperatur	5 °C		20 °C		35 °C		
	Enkelt-resultat	Middel	Enkelt-resultat	Middel	Enkelt-resultat	Middel	
Trykkfasthet, MPa	8 timer					1,6	1,7
						1,8	
	16 timer			2,8	2,7	9,3	9,3
				2,6		9,3	
	20 timer			4,4	4,2	10,6	10,6
				4,0		10,6	
	27 timer					13,3	13,4
						13,4	
	38 timer			10,1	10,1	15,9	16,5
				10,0		17,0	
	50 timer	5,5	5,3	12,5	12,6		
		5,1		12,6			
	72 timer	9,0	9,0	15,0	15,3		
		9,0		15,5			
	93 timer					28,9	29,1
						29,3	
	118 timer	13,2	13,2				
		13,1					
168 timer	15,2	15,1	21,0	21,1			
	15,0		21,2				
240 timer	17,4	17,2					
	17,0						
336 timer			28,4	27,5			
			26,6				
360 timer	18,9	18,9					
	18,9						
28 døgn	22,9	22,4	35,7	36,0	53,0	52,5	
	21,9		36,2		51,9		

#### 4 E-modul og strekkfasthet

Det ble utstøpt totalt 9 stk 100×100×600 mm prismer til bestemmelse av E-modul og (direkte) strekkfasthet, ved hhv 3, 7 og 25 døgn alder. Prøvingen er utført i henhold til SINTEFs interne prosedyre KS 14-05-04-106.

Resultater for E-modul og strekkfasthet er gitt i tabell 3 og 4. Kurver for spenning/tøyning er gitt i vedlegg 1.

**Tabell 3 Resultater for E-modul**

Prisme nr.		1	2	3	Middel	Std.avvik
E-modul, GPa, ved alder	3 døgn	20,1	20,3	18,1	19,5	1,24
	7 døgn	22,8	20,4	20,4	21,2	1,40
	25 døgn	27,2	27,3	28,3	27,6	0,59

**Tabell 4 Resultater for strekkfasthet**

Prisme nr.		1	2	3	Middel	Std.avvik
Strekkfasthet, MPa, ved alder	3 døgn	1,55	1,36	1,25	1,39	0,15
	7 døgn	1,69	1,50	1,67	1,62	0,11
	25 døgn	2,88	2,87	2,35	2,70	0,30

#### 5 Dilatasjon/autogent svinn

##### 5.1 Generelt

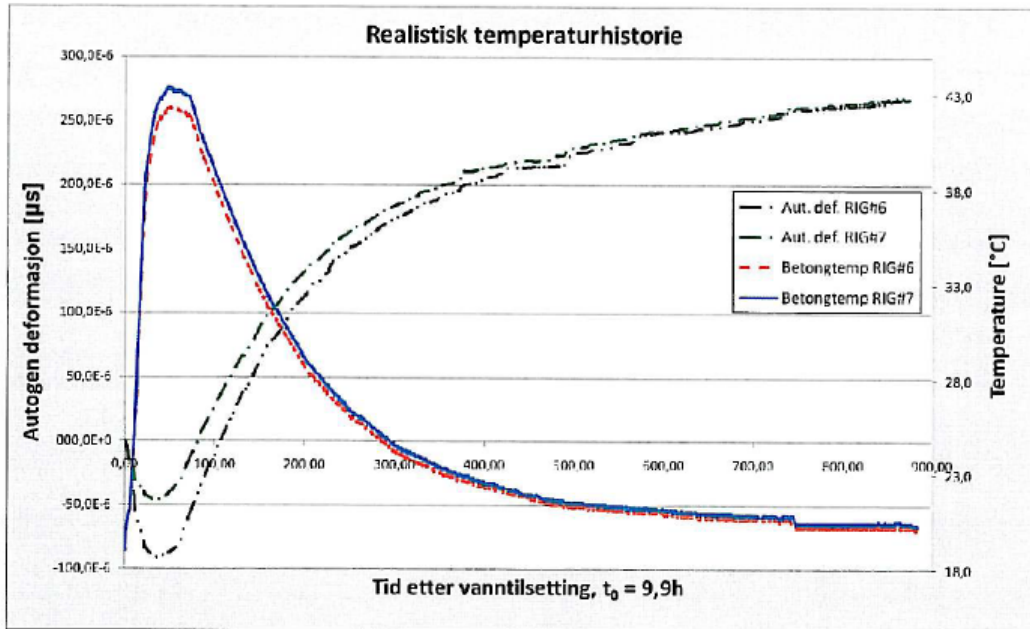
Autogen deformasjon ved isoterm og realistisk temperaturforløp ble bestemt på henholdsvis ett og to 100×100×500 mm prismer i SINTEF / NTNUs rigg for måling av fri deformasjon. Prøvingen ble utført i perioden 2011-03-21 – 2011-05-16. Tiden er angitt som timer etter 2011-03-21 kl 12:02 (tid for vanntilsetting). Prøvestykkene var isolert under forsøket. Autogen deformasjon ved 28 døgn alder er gitt i tabell 5, mens dilatasjonskurvene er gitt i figur 1 og 2 for henholdsvis realistisk og isoterm temperaturhistorie.

##### 5.2 Temperaturstyring

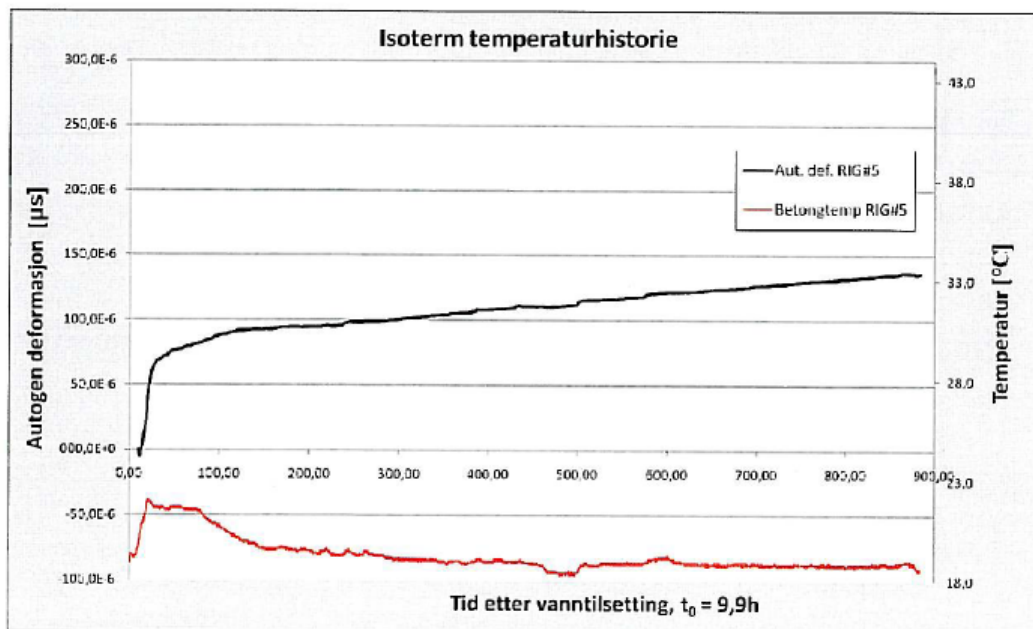
Temperaturstyring ble gjort i henhold til temperaturberegning av gjennomsnittstemperaturen for aktuell betong og en standardisert veggkonstruksjon. Ved beregning ble det antatt fersk betongtemperatur 20 °C og omgivelsestemperatur 20 °C.

**Tabell 5 Resultater for autogent svinn ved 28 døgn (672 timer)**

Autogent svinn, 28 døgn [µs]	10 <sup>-6</sup>
Rigg #5, isoterm	124,7
Rigg #6, realistisk	246,5
Rigg #7, realistisk	248,3



Figur 1 Dilatasjon ved realistisk temperaturhistorie



Figur 2 Dilatasjon ved isoterm temperaturhistorie

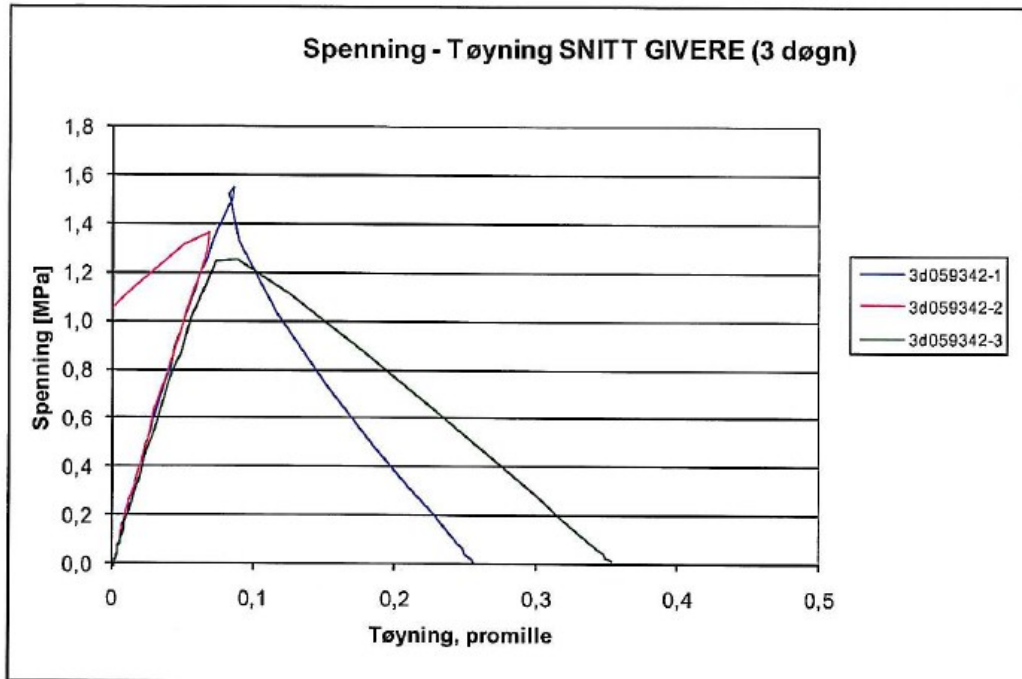
## 6 Herdekasseberegninger

Akkumulert isoterm varmeutvikling ble bestemt etter NT Build 480 i et 300 dm<sup>3</sup> stort semi-adiabatisk kalorimeter. Verdiene er beregnet som varmeutvikling per kg total mengde bindemiddel (sement, flyveaske og silika).

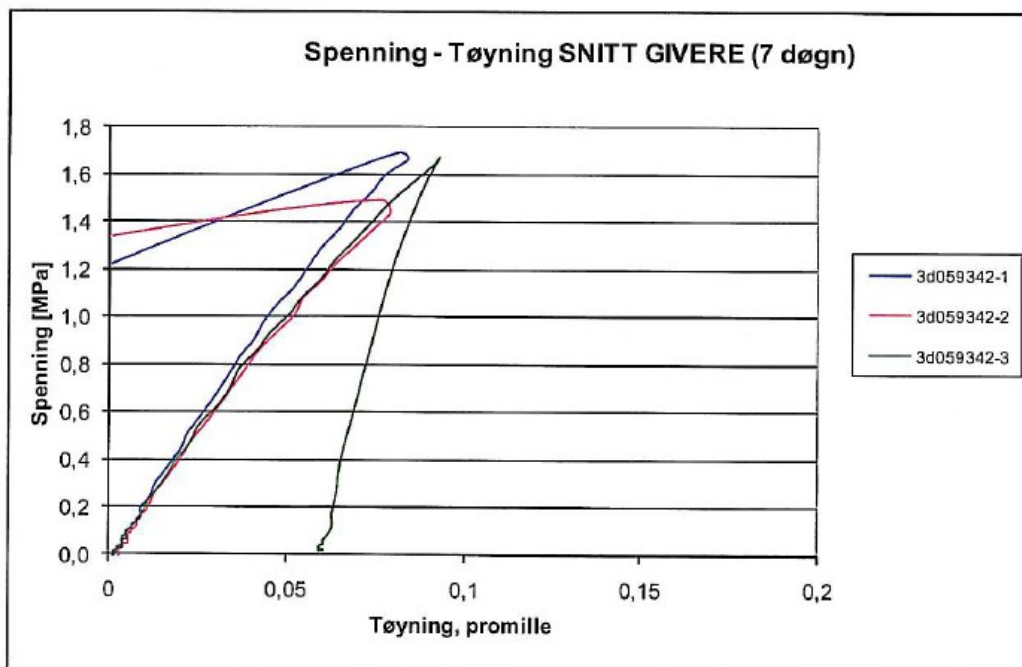
Resultatene er gitt i tabell 6 og i vedlegg 2.

**Tabell 6 Varmeutvikling ved hydratisering**

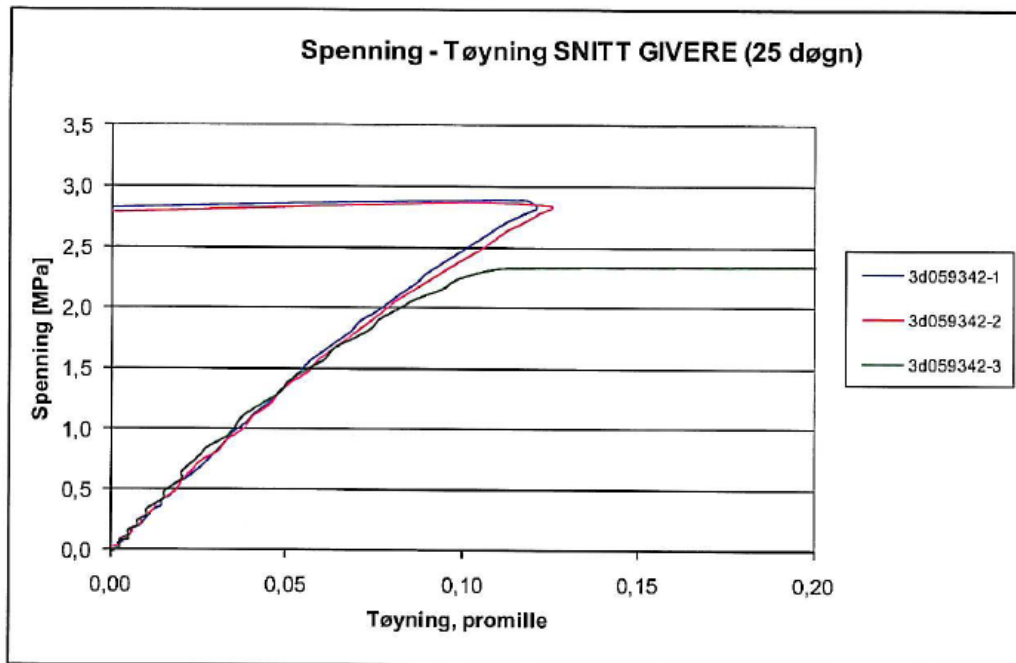
Avbindingstid (reell tid ved 20 °C), timer	9,8
Avbindingstid (modenhetstid), timer	9,9
Varmeutvikling, $Q_{\infty}$ , kJ/kg bindemiddel	258
Retardasjonsparameter, $\tau$ , timer	21,22
Krumningsparameter, $\alpha$	0,92



Figur 1 Spenning/tøying ved 3 døgns alder



Figur 2 Spenning/tøying ved 7 døgns alder



Figur 3 Spenning/tøyning ved 25 døgnns alder

### Adiabatic temperature and isothermic heat

(v 2.7 ss 2004-01-07)

#### Concrete parameters

Temp. trans. coeff.	0,0040
Density	2375
Heat capacity (fresh)	1,03
Heat capacity (hardened)	1,03
Cement content	332
Set time	9,9
A - set time	33500
B - set time	1470
A - hydration	33500
B - hydration	1470
Adia. start temperature	19,5

#### Temp. trans. coeff.

dQ/dm	0,07
m>	250
m<	300

#### Heat function

M-limit	450
Q <sub>∞</sub>	258
τ	21,22
α	0,92
R <sup>2</sup>	0,9742
ΣΔQ	9917

#### Heat polygon

Reference heat [kJ/kg cem]	Corresp. maturity [h]
0	0,0
10	7,5
20	9,6
40	12,1
80	17,3
120	24,7
160	46,2
200	103,6
240	331,8
300	581,2

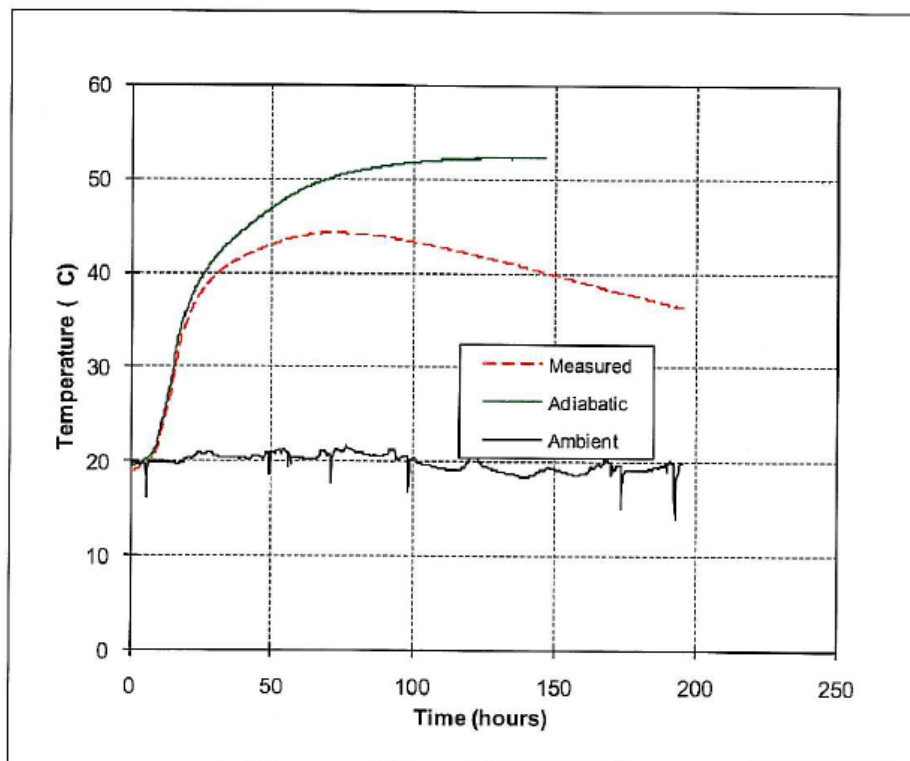
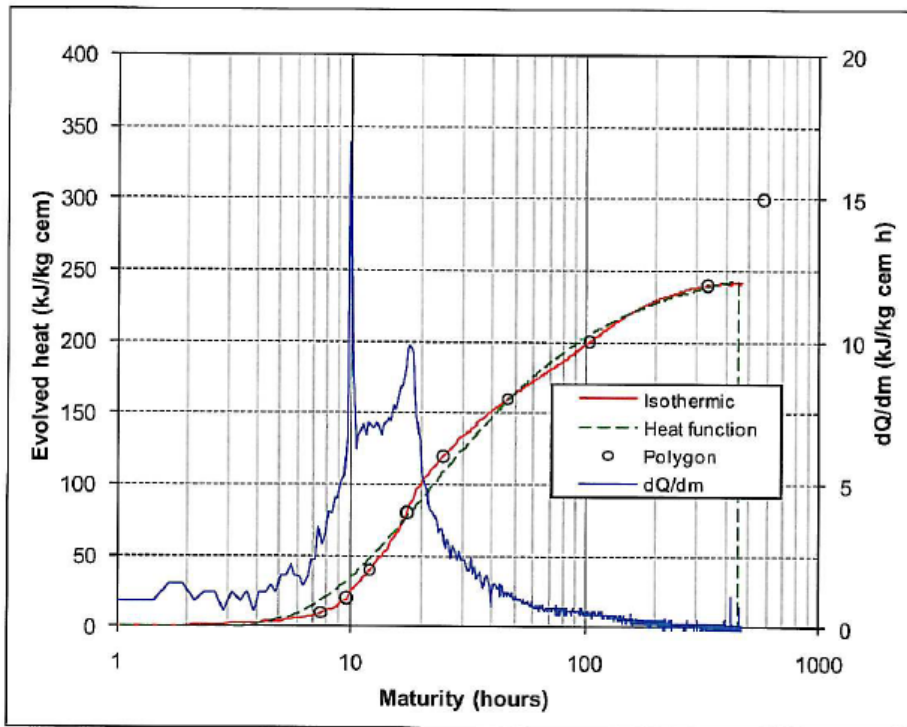
Adapt the temperature transmission coefficient: <Ctrl> t  
 Adapt the heat function: <Ctrl> h



#### Project

Name	100 % FA
Test id	3D0593.42/33409
Perf. by	Mari Bøhnsdalen Eide, SINTEF Byggeforsk
Date	2011-06-28







## **G. Low heat concrete (40 % fly ash)**

Vedlegget inneholder betongdata og resept for en betong med 40 % flyveaske. Betongen er utgangspunkt for betongen som er brukt til simuleringer i kapittel 3 og 4.

Se neste side.

# **Low-heat concrete (40% fly-ash): Input for stress calculations**

Revidert 2011-03-23 med korrigerede parametre for kryp (fra Ji.G's avhandling)

Referanser:

AF Spesialprosjekt, materialdokumentasjon: Dahl P.A (2006) Bjørvikaprojektet, entreprise Sørenga: Dokumentasjon av egenskaper for lavvarmebetong. Sintef Provningsrapport, 2006-03-14

Ji G. (2008) Cracking Risk of Concrete Structures in the Hardening Phase: Experiments, Material Modelling and Finite Element Analysis, Doctoral thesis, NTNU, Dept. of Structural Eng., ISBN 978-82-471-1079-9

## **Innhold**

<b>1</b>	<b>RESEPT</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>INPUTPARAMETRER</b> .....	<b>2</b>
2.1	AKTIVISERINGSENERGI .....	2
2.2	VARMEUTVIKLING .....	3
2.3	TERMISKE EGENSKAPER .....	3
2.4	TRYKKFASTHET.....	3
2.5	STREKKFASTHET.....	4
2.6	TERMISK DILATASJONSKOEFFISIENT:.....	4
2.7	AUTOGEN SVINN: .....	4
2.8	ELASTISITET OG KRYP: .....	4

Øyvind Bjøntegaard, 2011-03-23

## 1 RESEPT

### Materialsammensetning (ved 5 % luftinnhold)

Resept		C40 65 % FA
Tørre materialer i kg per m <sup>3</sup> betong	Sement	201
	Flygeaske	131
	Silikastøv	16
	Sand 0-8 mm	960
	Pukk 8-18 mm	188
	Pukk 18-32 mm	744
Glenium 151, kg/m <sup>3</sup>		5,45
Micro Air, kg/m <sup>3</sup>		0,08
Vann (totalt), kg/m <sup>3</sup>		150
effektiv $v/(c+2s+0,7fa)$		0,44

Densitet = 2400 kg/m<sup>3</sup>

$FA/c\text{-forhold} = 65\%$

$FA/(c + FA)\text{-forhold} = 40\%$

## 2 INPUTPARAMETRER

(Tilrettelagte data for ConTeSt Pro, oversendt fra Daniela Bosnjak, Norconsult)

### 2.1 Aktiveringsenergi

Parameter		
$\theta_{ref}$	4788	(K)
$\kappa_3$	0.12	(-)

(Nedenfor: aktiveringsenergi fra prøvningsrapporten, lagt inn av ØB)

#### Resultater, aktiveringsenergi

Aktiveringsenergikonstant (NS 3656)	A	37 186
	B	501

## 2.2 Varmeutvikling

Betong med fiber

Parameter		
$\lambda_1$	4	(-)
$\kappa_1$	2.14	(-)
$t_1$	3.15	(h)
$C_{tot}$	388	kg/m <sup>3</sup>
$W_c$	341	(kJ/kg)

Betong uten fiber

Parameter		
$\lambda_1$	2.56	(-)
$\kappa_1$	1.41	(-)
$t_1$	4.5	(h)
$C_{tot}$	351	kg/m <sup>3</sup>
$W_c$	330	(kJ/kg)

4C-Temp og stress-parametere fra prøvningsrapporten (ØB):

### Resultater, varmeutvikling

Romtemperatur	38°C
Varmeutvikling, Q, kJ/kg bindemiddel	268
$\tau$	21,55
$\alpha$	0,79

## 2.3 Termiske egenskaper

Parameter		
varmekapasitet	1000	(J/kg °C)
varmeledningsevne	1.7-2.1	(W/m °C)

## 2.4 Trykkfasthet

Equivalent tid, $t_{eq}$	Fasthetsforholdet, $\eta$
6	0 ‰
12	0 ‰
18	53 ‰
24	137 ‰
72	488 ‰
168	721 ‰
672	1000 ‰

Trykkfasthet fra prøvningsrapporten (ØB):

**Resultater, fasthetsutvikling ved ulike temperaturnivåer**

Temperatur		5°C	20°C	35°C
Trykkfasthet MPa etter (middel for to terninger)	8 timer	-	-	5,5
	14 timer	-	-	13,3
	16 timer	-	4,5	-
	20 timer	-	-	16,5
	24 timer	-	10,1	-
	27 timer	-	-	18,5
	38 timer	-	15,4	-
	40 timer	-	-	23,8
	48 timer	-	18,5	-
	53 timer	6,0	-	-
	72 timer	-	22,3	-
	80 timer	11,1	-	-
	93 timer	-	-	35,1
	120 timer	16,4	-	-
	160 timer	21,8	-	-
	168 timer	-	31,6	-
	240 timer	26,4	-	-
560 timer	35,1	-	-	
28 døgn	37,0	53,1	62,0	

**2.5 Strekkfasthet**

Parameter		
$\beta$	0.43	(-)
$f_{\text{tref}}$	3,0 *)	(MPa)

\*) ØB: Angitt opprinnelig som 4,0 MPa basert på spaltestrekking; verdien er derfor konvertert til  $4,0 \times 0,75 = 3,0$  MPa for å være representativ for direkte (aksial) strekkfasthet.

**2.6 Termisk dilatasjonskoeffisient:**

Parameter		
$\alpha_T$	7.2E-6	(1/K)

**2.7 Autogen svinn:**

Det velges å neglisjere autogen svinn, siden maksimum målt verdi er ca 10E-6

**2.8 Elastisitet og kryp:**

Kryp beskrevet med Double Power Low med parametre  $\phi_0 = 1.47$ ,  $d = 0.24$ ,  $p = 0.24$  brukes i beregningene. Den overføres til relaksasjonsdata beskrevet med Maxwell chain parametre ved hjelp av Relax program.

E- modulutviklingen beskrives med modell:  $E_c = E_{c28} \left( \exp\left(s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_{eq} - t_0}}\right)^{n_E}\right)\right)$

Parameter		
$E_{c28}$	39.84	(GPa)
s	0.34	(-)
$t_0$	12	(h)
$n_E$	0.26	(-)





## **H. Rapport fra CrackTeSt COIN**

Vedlegget inneholder rapport fra CrackTeSt COIN fra simuleringen av Skardfosdammen i kapittel 4. Her også betongdata fra kapittel 5.1, 5.2 og 5.3 tatt med. Navn på betongene er listet opp under.

Kapittel 4: 3.lowheat

Kapittel 5.1: 20 % FA

30 % FA

40 % FA

50 % FA

Kapittel 5.2: Betong

Kapittel 5.3 Betong.sem.red

Se neste side.



# **C:Skardfoss Rapport.CPR**

## **Report**

## Contents

<b>1 Software &amp; Project Information</b>	<b>2</b>
1.1 Software	2
1.2 Project	2
<b>2 Geometry &amp; Time</b>	<b>3</b>
2.1 Description	3
2.1.1 Blocks	3
2.1.2 Computation time	3
<b>3 Element Size</b>	<b>4</b>
<b>4 Computation Mesh</b>	<b>5</b>
<b>5 Heat Properties</b>	<b>6</b>
5.1 Description	6
5.1.3 Block type list	6
5.1.4 Block connection list	10
5.1.5 Boundary type list	10
5.1.6 Boundary connection list	11
5.1.7 Inner point type list	11
5.1.8 Simulation of filling process for young concrete	11
<b>6 Plane-Surface Analysis</b>	<b>12</b>
6.1 Description	12
6.1.9 Stress case	12
6.1.10 Block data list	12
6.1.11 Block type list	12
<b>7 Heat Computation Results</b>	<b>15</b>
7.1 Temp Punkt	15
7.2 Temp max block2	15
7.3 TempMaxColor	15
<b>8 Plane-Surface Computation Results</b>	<b>17</b>
8.1 Strain max color	17
8.2 Strain pkt	17

# 1 Software & Project Information

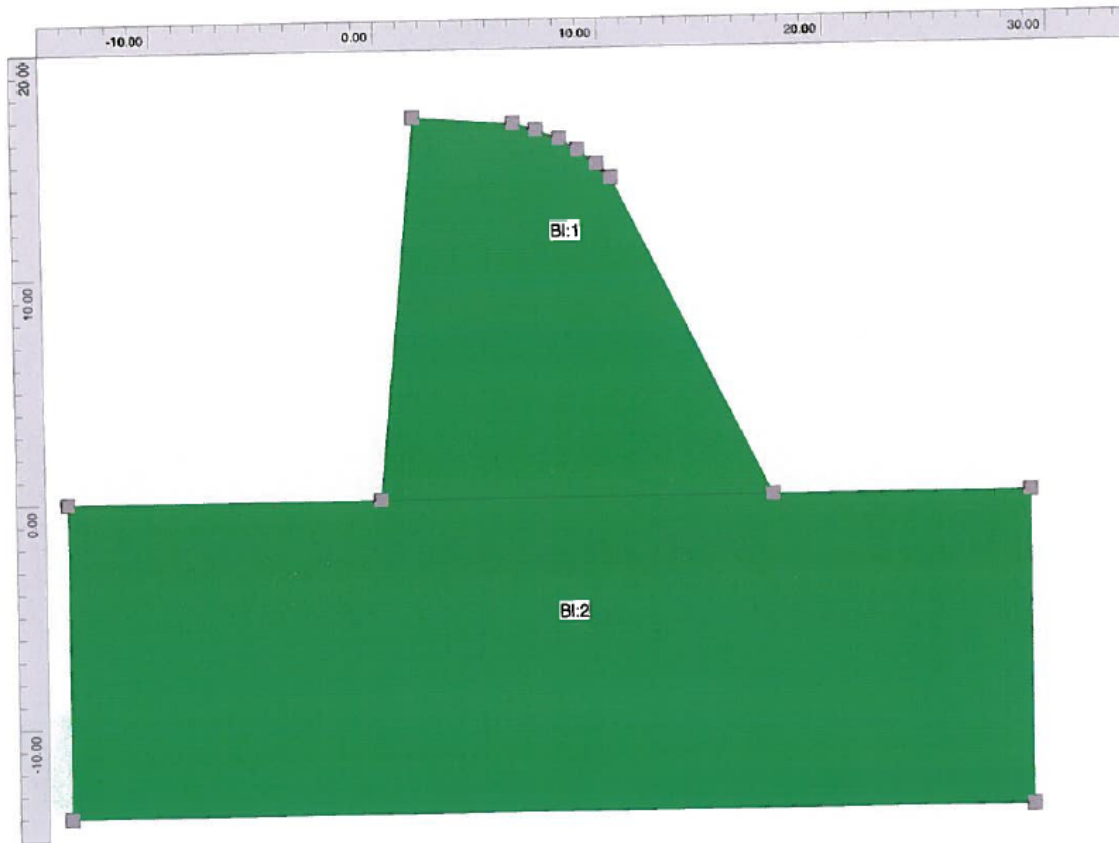
## 1.1 Software

System name: CrackTeSt COIN  
System version: 1.0  
Developed by: JEJMS Concrete AB

## 1.2 Project

Original filename: C:\Users\Eivind Hagen\Documents\CrackTeSt\Working\Skardfoss.CPR  
Created: 2012.03.01 14.23.38  
Created by: Eivind Hagen on EIVINDHAGEN-PC  
Current filename: C:\Users\Eivind Hagen\Documents\CrackTeSt\Working\Skardfoss Rapport.CPR  
Last change: 2012.06.02 15.51.22  
Last change by: Eivind Hagen on EIVINDHAGEN-PC

## 2 Geometry & Time



### 2.1 Description

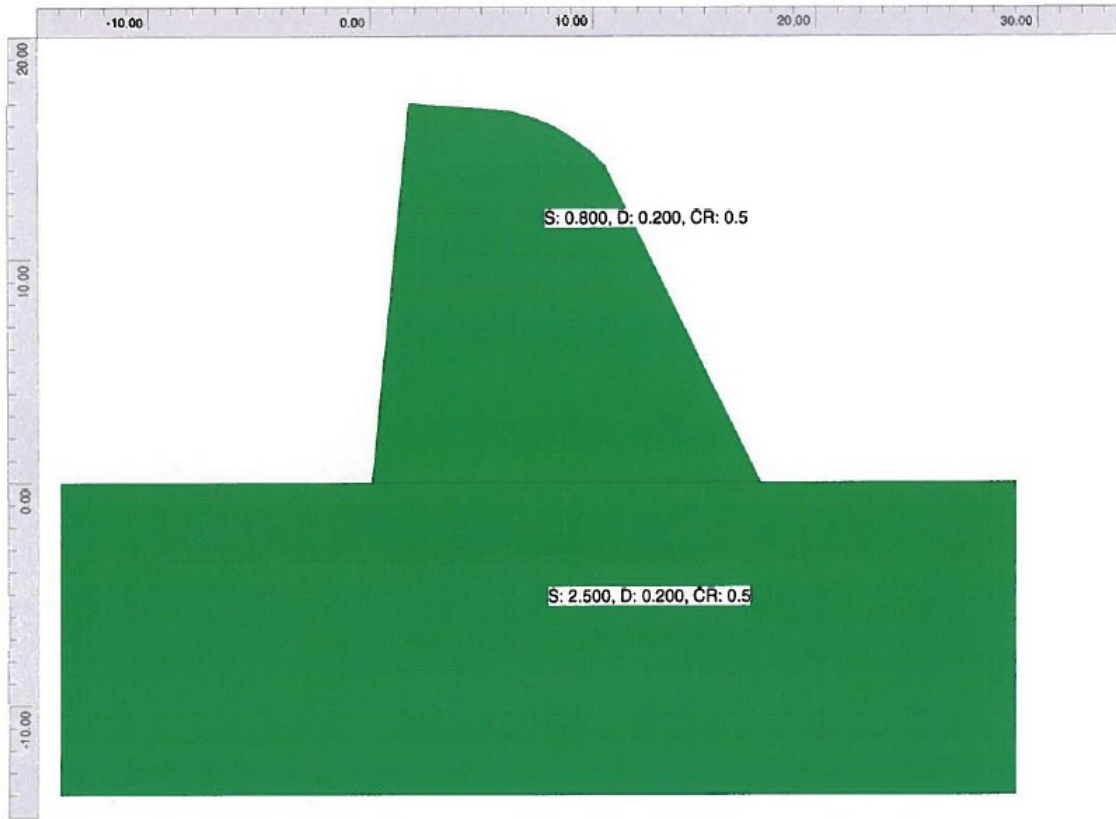
#### 2.1.1 Blocks

Block 1: (0.000;0.000) - (17.500;0.000) - (10.500;14.206) - (9.882;14.820) - (9.058;15.440) - (8.235;15.956) - (7.210;16.370) - (6.177;16.676) - (1.700;17.000)  
Block 2: (29.000;-14.000) - (29.000;0.000) - (17.500;0.000) - (0.000;0.000) - (-14.000;0.000) - (-14.000;-14.000)

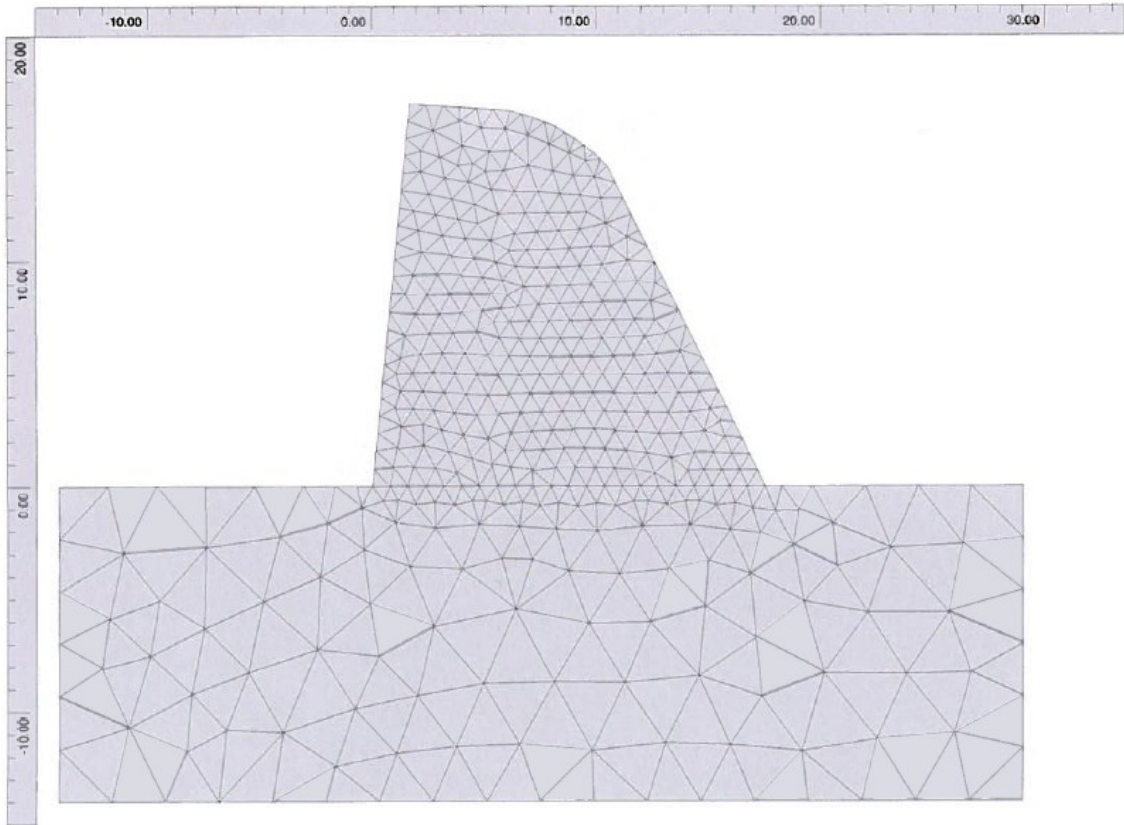
#### 2.1.2 Computation time

Total time length: 30000 (h)

### 3 Element Size

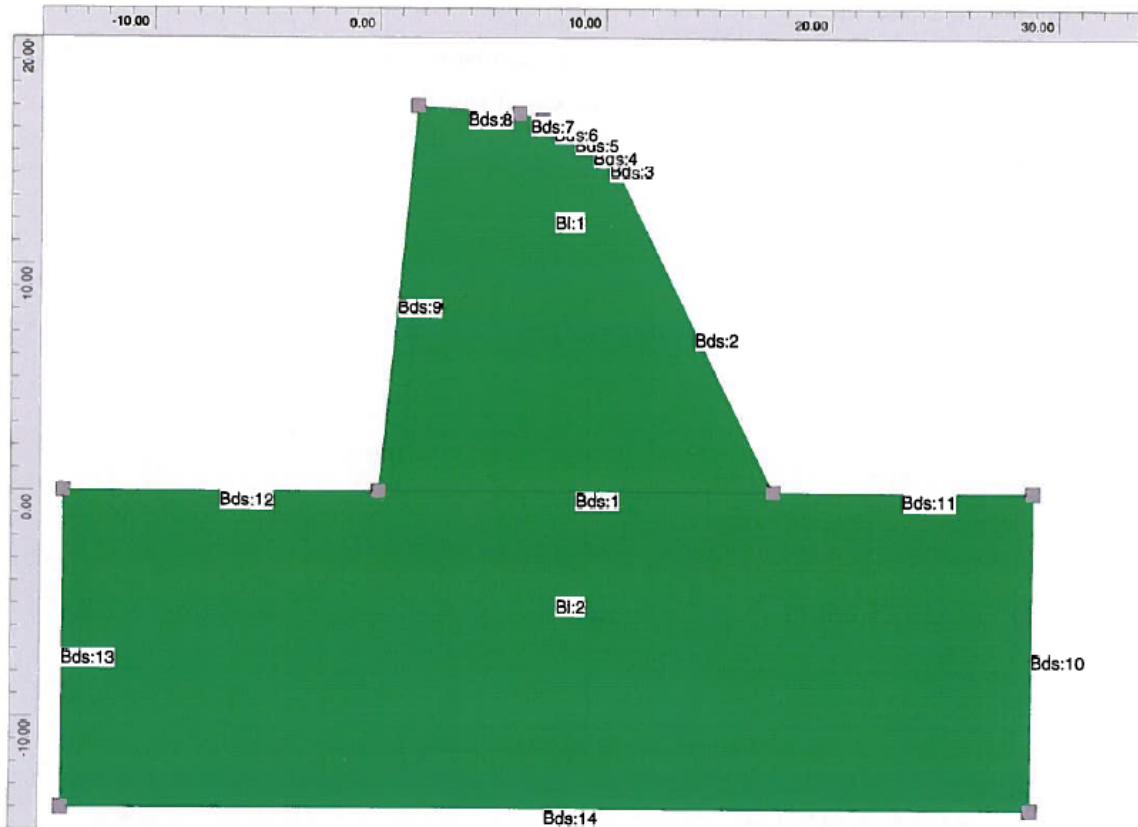


## 4 Computation Mesh





## 5 Heat Properties



### 5.1 Description

#### 5.1.3 Block type list

Fjell: Other material

Start temperature:

Constant: 0.0

Material definition: Fjell (str)

Source

Fjell, underlag for dammer

Description

Original material parameters

Density: 2700 (kg/m<sup>3</sup>), Heat cap. 850 (J/(kg·K))

Heat cond. 2.222 (W/m<sup>2</sup>K)

Betong: Young concrete

Start temperature:

Constant: 15.0

Material definition: 3\_Low-heat concrete, 40% Fly Ash (str)

Source

Dahl, 2006

Bosnjak

Bjøntegaard, 2011

Description

C = cement = 201 kg/m<sup>3</sup>; FA = Fly ash = 131 kg/m<sup>3</sup>

SF = Silica fume = 16 kg/m<sup>3</sup>

C\_tot = C + FA + SF = 348

kg/m<sup>3</sup>  
 $w_{tot} = \text{total water content} = 150 \text{ kg/m}^3$   
 $w/C_{eff} = w_{tot}/(C + 0.7FA + 2SF) = 0.46$

Original material parameters  
Density: 2400 (kg/m<sup>3</sup>), Heat cap. 1000 (J/(kg·K))  
Heat cond. (W/m<sup>2</sup>K) as piece-wise linear function of equivalent time of maturity (h), (equ. time; heat cond.): (0;2.1), (100;2.1), (124;1.7), (10000;1.7),  
QInfinite 348 (kg/m<sup>3</sup>), Wc 330000 (J/kg), t1 15.93 (h), Kappa1 1.01 (-)  
te0 0 (h), BetaD 1 (-), ASet 37186 (J/mol), BSet 501 (J/mol K), A 37186 (J/mol), B 501 (J/mol K)  
s 0.259 (-), tIni 9 (h), tFin 12 (h), nSet 2 (-)  
Fset 0.564 (MPa), ncc28d 0.1 (-)  
Fcc28 50 (MPa)

Following material parameters are changed by the user  
QInfinite 319.6 (kg/m<sup>3</sup>)

Betong 20%FA: Young concrete  
Start temperature:  
Constant: 15.0  
Material definition: 3\_Low-heat concrete, 40% Fly Ash (str)  
Source  
Dahl, 2006  
Bosnjak  
Bjøntegaard, 2011  
Description  
C = cement = 201 kg/m<sup>3</sup>; FA = Fly ash = 131 kg/m<sup>3</sup>  
SF = Silica fume = 16 kg/m<sup>3</sup>  
 $C_{tot} = C + FA + SF = 348 \text{ kg/m}^3$   
 $w_{tot} = \text{total water content} = 150 \text{ kg/m}^3$   
 $w/C_{eff} = w_{tot}/(C + 0.7FA + 2SF) = 0.46$

Original material parameters  
Density: 2400 (kg/m<sup>3</sup>), Heat cap. 1000 (J/(kg·K))  
Heat cond. (W/m<sup>2</sup>K) as piece-wise linear function of equivalent time of maturity (h), (equ. time; heat cond.): (0;2.1), (100;2.1), (124;1.7), (10000;1.7),  
QInfinite 348 (kg/m<sup>3</sup>), Wc 330000 (J/kg), t1 15.93 (h), Kappa1 1.01 (-)  
te0 0 (h), BetaD 1 (-), ASet 37186 (J/mol), BSet 501 (J/mol K), A 37186 (J/mol), B 501 (J/mol K)  
s 0.259 (-), tIni 9 (h), tFin 12 (h), nSet 2 (-)  
Fset 0.564 (MPa), ncc28d 0.1 (-)  
Fcc28 50 (MPa)

Following material parameters are changed by the user  
QInfinite 375 (kg/m<sup>3</sup>)  
Wc 342500 (J/kg)  
t1 11.005 (h)  
Kappa1 1.4032 (-)  
ASet 32000 (J/mol)  
BSet 500 (J/mol K)  
A 32000 (J/mol)  
B 500 (J/mol K)  
s 0.3431 (-)  
tIni 8 (h)  
tFin 14.451 (h)  
FSet 0.267 (h)  
ncc28d 0.5 (h)  
Fcc28 52.84 (MPa)

Betong 30%FA: Young concrete  
Start temperature:  
Constant: 15.0  
Material definition: 3\_Low-heat concrete, 40% Fly Ash (str)  
Source  
Dahl, 2006  
Bosnjak  
Bjøntegaard, 2011  
Description  
C = cement = 201 kg/m<sup>3</sup>; FA = Fly ash = 131 kg/m<sup>3</sup>  
SF = Silica fume = 16 kg/m<sup>3</sup>  
 $C_{tot} = C + FA + SF = 348 \text{ kg/m}^3$   
 $w_{tot} = \text{total water content} = 150 \text{ kg/m}^3$   
 $w/C_{eff} = w_{tot}/(C + 0.7FA + 2SF) = 0.46$

Original material parameters

Density: 2400 (kg/m<sup>3</sup>), Heat cap. 1000 (J/(kg·K))  
Heat cond. (W/m<sup>2</sup>K) as piece-wise linear function of equivalent time of maturity (h), (equ. time; heat cond.): (0;2.1), (100;2.1), (124;1.7), (10000;1.7),  
QInfinite 348 (kg/m<sup>3</sup>), Wc 330000 (J/kg), t1 15.93 (h), Kappa1 1.01 (-)  
te0 0 (h), BetaD 1 (-), ASet 37186 (J/mol), BSet 501 (J/mol K), A 37186 (J/mol), B 501 (J/mol K)  
s 0.259 (-), tIni 9 (h), tFin 12 (h), nSet 2 (-)  
Fset 0.564 (MPa), ncc28d 0.1 (-)  
Fcc28 50 (MPa)

Following material parameters are changed by the user

QInfinite 375 (kg/m<sup>3</sup>)  
t1 11.005 (h)  
Kappa1 1.4032 (-)  
ASet 35000 (J/mol)  
BSet 35000 (J/mol K)  
A 500 (J/mol)  
B 500 (J/mol K)  
s 0.3431 (-)  
tIni 8 (h)  
tFin 14.4693 (h)  
FSet 0.267 (h)  
ncc28d 0.5 (h)  
Fcc28 51.74 (MPa)

Betong 40%FA: Young concrete

Start temperature:

Constant: 15.0

Material definition: 3\_Low-heat concrete, 40% Fly Ash (str)

Source

Dahl, 2006  
Bosnjak  
Bjøntegaard, 2011

Description

C = cement = 201 kg/m<sup>3</sup>; FA = Fly ash = 131 kg/m<sup>3</sup>  
SF = Silica fume = 16 kg/m<sup>3</sup>  
C\_tot = C + FA + SF = 348 kg/m<sup>3</sup>  
w\_tot = total water content = 150 kg/m<sup>3</sup>  
w/C\_eff = w\_tot/(C + 0.7FA + 2SF) = 0.46

Original material parameters

Density: 2400 (kg/m<sup>3</sup>), Heat cap. 1000 (J/(kg·K))  
Heat cond. (W/m<sup>2</sup>K) as piece-wise linear function of equivalent time of maturity (h), (equ. time; heat cond.): (0;2.1), (100;2.1), (124;1.7), (10000;1.7),  
QInfinite 348 (kg/m<sup>3</sup>), Wc 330000 (J/kg), t1 15.93 (h), Kappa1 1.01 (-)  
te0 0 (h), BetaD 1 (-), ASet 37186 (J/mol), BSet 501 (J/mol K), A 37186 (J/mol), B 501 (J/mol K)  
s 0.259 (-), tIni 9 (h), tFin 12 (h), nSet 2 (-)  
Fset 0.564 (MPa), ncc28d 0.1 (-)  
Fcc28 50 (MPa)

Following material parameters are changed by the user

QInfinite 375 (kg/m<sup>3</sup>)  
Wc 286171 (J/kg)  
t1 11.0051 (h)  
Kappa1 1.4032 (-)  
s 0.3431 (-)  
tIni 8 (h)  
tFin 14.5025 (h)  
FSet 0.267 (h)  
ncc28d 0.4999 (h)  
Fcc28 49.85 (MPa)

Betong 50%FA: Young concrete

Start temperature:

Constant: 15.0

Material definition: 3\_Low-heat concrete, 40% Fly Ash (str)

Source

Dahl, 2006  
Bosnjak  
Bjøntegaard, 2011

Description

C = cement = 201 kg/m<sup>3</sup>; FA = Fly ash = 131 kg/m<sup>3</sup>

SF = Silica fume = 16 kg/m<sup>3</sup>

C\_tot = C + FA + SF = 348 kg/m<sup>3</sup>

w\_tot = total water content = 150 kg/m<sup>3</sup>

w/C\_eff = w\_tot/(C + 0.7FA + 2SF) = 0.46

Original material parameters

Density: 2400 (kg/m<sup>3</sup>), Heat cap. 1000 (J/(kg·K))

Heat cond. (W/m<sup>2</sup>K) as piece-wise linear function of equivalent time of maturity (h), (equ. time; heat cond.): (0;2.1), (100;2.1), (124;1.7), (10000;1.7),

QInfinite 348 (kg/m<sup>3</sup>), Wc 330000 (J/kg), t1 15.93 (h), Kappa1 1.01 (-)

te0 0 (h), BetaD 1 (-), ASet 37186 (J/mol), BSet 501 (J/mol K), A 37186 (J/mol), B 501 (J/mol K)

s 0.259 (-), tlni 9 (h), tFin 12 (h), nSet 2 (-)

Fset 0.564 (MPa), ncc28d 0.1 (-)

Fcc28 50 (MPa)

Following material parameters are changed by the user

QInfinite 375 (kg/m<sup>3</sup>)

Wc 270398 (J/kg)

t1 11.0052 (h)

Kappa1 1.40319 (-)

ASet 40000 (J/mol)

BSet 500 (J/mol K)

A 40000 (J/mol)

B 500 (J/mol K)

s 0.3431 (-)

tlni 8 (h)

tFin 14.826 (h)

Fset 0.267 (h)

ncc28d 0.4999 (h)

Fcc28 35.8893 (MPa)

Betong.sem.red: Young concrete

Start temperature:

Constant: 15.0

Material definition: 3\_Low-heat concrete, 40% Fly Ash (str)

Source

Dahl, 2006

Bosnjak

Bjøntegaard, 2011

Description

C = cement = 201 kg/m<sup>3</sup>; FA = Fly ash = 131 kg/m<sup>3</sup>

SF = Silica fume = 16 kg/m<sup>3</sup>

C\_tot = C + FA + SF = 348 kg/m<sup>3</sup>

w\_tot = total water content = 150 kg/m<sup>3</sup>

w/C\_eff = w\_tot/(C + 0.7FA + 2SF) = 0.46

Original material parameters

Density: 2400 (kg/m<sup>3</sup>), Heat cap. 1000 (J/(kg·K))

Heat cond. (W/m<sup>2</sup>K) as piece-wise linear function of equivalent time of maturity (h), (equ. time; heat cond.): (0;2.1), (100;2.1), (124;1.7), (10000;1.7),

QInfinite 348 (kg/m<sup>3</sup>), Wc 330000 (J/kg), t1 15.93 (h), Kappa1 1.01 (-)

te0 0 (h), BetaD 1 (-), ASet 37186 (J/mol), BSet 501 (J/mol K), A 37186 (J/mol), B 501 (J/mol K)

s 0.259 (-), tlni 9 (h), tFin 12 (h), nSet 2 (-)

Fset 0.564 (MPa), ncc28d 0.1 (-)

Fcc28 50 (MPa)

Following material parameters are changed by the user

QInfinite 319.6 (kg/m<sup>3</sup>)

3.lowheat: Young concrete

Start temperature:

Constant: 15.0

Material definition: 3\_Low-heat concrete, 40% Fly Ash (str)

Source

Dahl, 2006

Bosnjak

Bjøntegaard, 2011

Description

C = cement = 201 kg/m<sup>3</sup>; FA = Fly ash = 131 kg/m<sup>3</sup>

SF = Silica fume = 16 kg/m<sup>3</sup>

C\_tot = C + FA + SF = 348 kg/m<sup>3</sup>

w\_tot = total water content = 150

kg/m<sup>3</sup>

$$w/C_{\text{eff}} = w_{\text{tot}} / (C + 0.7FA + 2SF) = 0.46$$

Original material parameters

Density: 2400 (kg/m<sup>3</sup>), Heat cap. 1000 (J/(kg·K))

Heat cond. (W/m<sup>2</sup>K) as piece-wise linear function of equivalent time of maturity (h), (equ. time; heat cond.): (0;2.1), (100;2.1), (124;1.7), (10000;1.7),

QInfinite 348 (kg/m<sup>3</sup>), Wc 330000 (J/kg), t1 15.93 (h), Kappa1 1.01 (-)

te0 0 (h), BetaD 1 (-), ASet 37186 (J/mol), BSet 501 (J/mol K), A 37186 (J/mol), B 501 (J/mol K)

s 0.259 (-), tIni 9 (h), tFin 12 (h), nSet 2 (-)

Fset 0.564 (MPa), ncc28d 0.1 (-)

Fcc28 50 (MPa)

Following material parameters are changed by the user

#### 5.1.4 Block connection list

Block 1: 3.lowheat, simulate filling

Block 2: Fjell

#### 5.1.5 Boundary type list

Mot grunn

Temperature

Constant 0 (°C)

Heat transfer coefficient

Constant 200 (W/m<sup>2</sup>K)

Supplied heat

Constant 0 (W/m<sup>2</sup>)

Fri flate

Temperature

Constant 5 (°C)

Wind velocity

Constant 1 (m/s)

Heat transfer coefficient

Constant 1000 (W/m<sup>2</sup>K)

Free surface

Supplied heat

Constant 0 (W/m<sup>2</sup>)

Forskaling

Temperature

Constant 5 (°C)

Wind velocity

Constant 1 (m/s)

Heat transfer coefficient

Piece-wise constant (time (h);htc (W/m<sup>2</sup>K))

(0;7.31452)

Free surface

Wood/Plywood 0.019 (m)

(144;7.31452)

Free surface

Wood/Plywood 0.019 (m)

(145;1000)

Free surface

(10000;1000)

Free surface

Supplied heat

Constant 0 (W/m<sup>2</sup>)

Moving Boundary: Moving boundary

Temperature

Constant 12 (°C)

Wind velocity

Constant 1 (m/s)

Heat transfer coefficient

Constant 1000 (W/m<sup>2</sup>K)

Free surface

Supplied heat

Constant 0 (W/m<sup>2</sup>)

### **5.1.6 Boundary connection list**

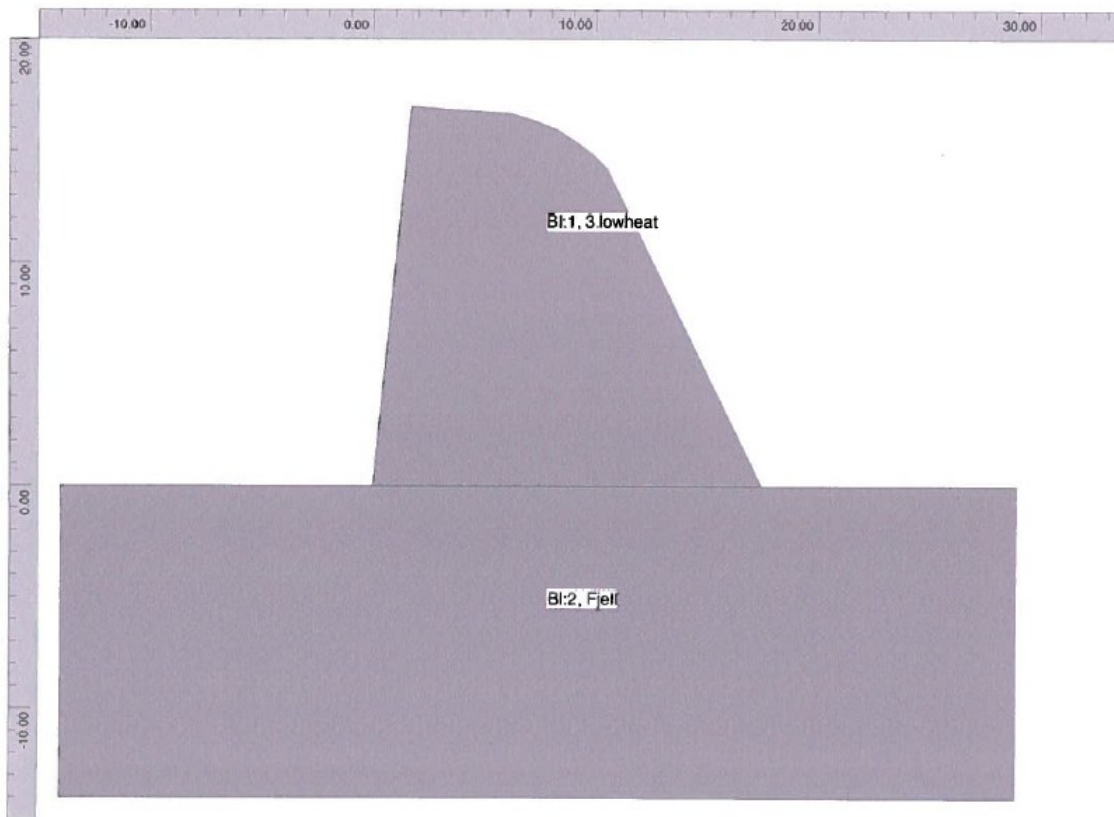
Boundary segment 1: inner segment (full thermal contact)  
Boundary segment 2: Forskaling  
Boundary segment 3: Forskaling  
Boundary segment 4: Forskaling  
Boundary segment 5: Forskaling  
Boundary segment 6: Fri flate  
Boundary segment 7: Fri flate  
Boundary segment 8: Fri flate  
Boundary segment 9: Forskaling  
Boundary segment 10: adiabetic (no heat flow)  
Boundary segment 11: Fri flate  
Boundary segment 12: Fri flate  
Boundary segment 13: adiabetic (no heat flow)  
Boundary segment 14: Mot grunn

### **5.1.7 Inner point type list**

### **5.1.8 Simulation of filling process for young concrete**

Surface position as a piece-wise linear func. of time (time (h); y-coord. (m))  
(0;0), (7.5;17),

## 6 Plane-Surface Analysis



### 6.1 Description

#### 6.1.9 Stress case

Default time stepping  
Translation  
Full restraint (1.000)  
Rotation around X-axis  
Full restraint (1.000)  
Rotation around Y-axis  
Full restraint (1.000)

#### 6.1.10 Block data list

Block 1: 3.lowheat  
Block 2: Fjell

#### 6.1.11 Block type list

Fjell: Other material  
Material definition: Fjell (str)  
Source  
Fjell, underlag for dammer  
Description  
Original material parameters  
E-modulus 60 (GPa), AlfaTemp 1e-05 (1/K)  
Fcc 0 (MPa), Ftref 15 (MPa)

**Betong: Young concrete**

Material definition: 3\_Low-heat concrete, 40% Fly Ash (str)

Source

Dahl, 2006  
Bosnjak  
Bjøntegaard, 2011

Description

C = cement = 201 kg/m<sup>3</sup>; FA = Fly ash = 131 kg/m<sup>3</sup>  
SF = Silica fume = 16 kg/m<sup>3</sup>  
C\_tot = C + FA + SF = 348 kg/m<sup>3</sup>  
w\_tot = total water content = 150 kg/m<sup>3</sup>  
w/C\_eff = w\_tot/(C + 0.7FA + 2SF) = 0.46

Original material parameters

AlfaTemp 7.2e-06 (1/K), Fcc28d 50 (MPa), Fct28d 3 (MPa), nct 0.43 (-)  
RelaxTime1 0 (d), TimeZero 0 (d)  
Relax: Age 0 (d), Units (GPa) 0

Following material parameters are changed by the user

Fct28d 4 (MPa)

**Betong 20%FA: Young concrete**

Material definition: 3\_Low-heat concrete, 40% Fly Ash (str)

Source

Dahl, 2006  
Bosnjak  
Bjøntegaard, 2011

Description

C = cement = 201 kg/m<sup>3</sup>; FA = Fly ash = 131 kg/m<sup>3</sup>  
SF = Silica fume = 16 kg/m<sup>3</sup>  
C\_tot = C + FA + SF = 348 kg/m<sup>3</sup>  
w\_tot = total water content = 150 kg/m<sup>3</sup>  
w/C\_eff = w\_tot/(C + 0.7FA + 2SF) = 0.46

Original material parameters

AlfaTemp 7.2e-06 (1/K), Fcc28d 50 (MPa), Fct28d 3 (MPa), nct 0.43 (-)  
RelaxTime1 0 (d), TimeZero 0 (d)  
Relax: Age 0 (d), Units (GPa) 0

Following material parameters are changed by the user

Fcc28d 52.84 (MPa)

Fct28d 4.4 (MPa)

**Betong 30%FA: Young concrete**

Material definition: 3\_Low-heat concrete, 40% Fly Ash (str)

Source

Dahl, 2006  
Bosnjak  
Bjøntegaard, 2011

Description

C = cement = 201 kg/m<sup>3</sup>; FA = Fly ash = 131 kg/m<sup>3</sup>  
SF = Silica fume = 16 kg/m<sup>3</sup>  
C\_tot = C + FA + SF = 348 kg/m<sup>3</sup>  
w\_tot = total water content = 150 kg/m<sup>3</sup>  
w/C\_eff = w\_tot/(C + 0.7FA + 2SF) = 0.46

Original material parameters

AlfaTemp 7.2e-06 (1/K), Fcc28d 50 (MPa), Fct28d 3 (MPa), nct 0.43 (-)  
RelaxTime1 0 (d), TimeZero 0 (d)  
Relax: Age 0 (d), Units (GPa) 0

Following material parameters are changed by the user

Fcc28d 51.74 (MPa)

Fct28d 4.3 (MPa)

**Betong 40%FA: Young concrete**

Material definition: 3\_Low-heat concrete, 40% Fly Ash (str)

Source

Dahl, 2006  
Bosnjak  
Bjøntegaard, 2011

Description

C = cement = 201 kg/m<sup>3</sup>; FA = Fly ash = 131 kg/m<sup>3</sup>  
SF = Silica fume = 16 kg/m<sup>3</sup>  
C\_tot = C + FA + SF = 348



kg/m<sup>3</sup>  
w\_tot = total water content = 150 kg/m<sup>3</sup>  
w/C\_eff = w\_tot/(C +0.7FA+2SF) = 0.46

Original material parameters  
AlfaTemp 7.2e-06 (1/K), Fcc28d 50 (MPa), Fct28d 3 (MPa), nct 0.43 (-)  
RelaxTimeI 0 (d), TimeZero 0 (d)  
Relax: Age 0 (d), Units (GPa) 0

Following material parameters are changed by the user  
Fcc28d 49.85 (MPa)  
Fct28d 4 (MPa)

Betong 50%FA: Young concrete  
Material definition: 3\_Low-heat concrete, 40% Fly Ash (str)

Source  
Dahl, 2006  
Bosnjak  
Bjøntegaard, 2011

Description  
C = cement = 201 kg/m<sup>3</sup>; FA = Fly ash = 131 kg/m<sup>3</sup>  
SF = Silica fume = 16 kg/m<sup>3</sup>  
C\_tot = C + FA + SF = 348 kg/m<sup>3</sup>  
w\_tot = total water content = 150 kg/m<sup>3</sup>  
w/C\_eff = w\_tot/(C +0.7FA+2SF) = 0.46

Original material parameters  
AlfaTemp 7.2e-06 (1/K), Fcc28d 50 (MPa), Fct28d 3 (MPa), nct 0.43 (-)  
RelaxTimeI 0 (d), TimeZero 0 (d)  
Relax: Age 0 (d), Units (GPa) 0

Following material parameters are changed by the user  
Fcc28d 35.8893 (MPa)  
Fct28d 2.7 (MPa)

Betong.sem.red: Young concrete  
Material definition: 3\_Low-heat concrete, 40% Fly Ash (str)

Source  
Dahl, 2006  
Bosnjak  
Bjøntegaard, 2011

Description  
C = cement = 201 kg/m<sup>3</sup>; FA = Fly ash = 131 kg/m<sup>3</sup>  
SF = Silica fume = 16 kg/m<sup>3</sup>  
C\_tot = C + FA + SF = 348 kg/m<sup>3</sup>  
w\_tot = total water content = 150 kg/m<sup>3</sup>  
w/C\_eff = w\_tot/(C +0.7FA+2SF) = 0.46

Original material parameters  
AlfaTemp 7.2e-06 (1/K), Fcc28d 50 (MPa), Fct28d 3 (MPa), nct 0.43 (-)  
RelaxTimeI 0 (d), TimeZero 0 (d)  
Relax: Age 0 (d), Units (GPa) 0

Following material parameters are changed by the user  
Fct28d 4 (MPa)

3.lowheat: Young concrete  
Material definition: 3\_Low-heat concrete, 40% Fly Ash (str)

Source  
Dahl, 2006  
Bosnjak  
Bjøntegaard, 2011

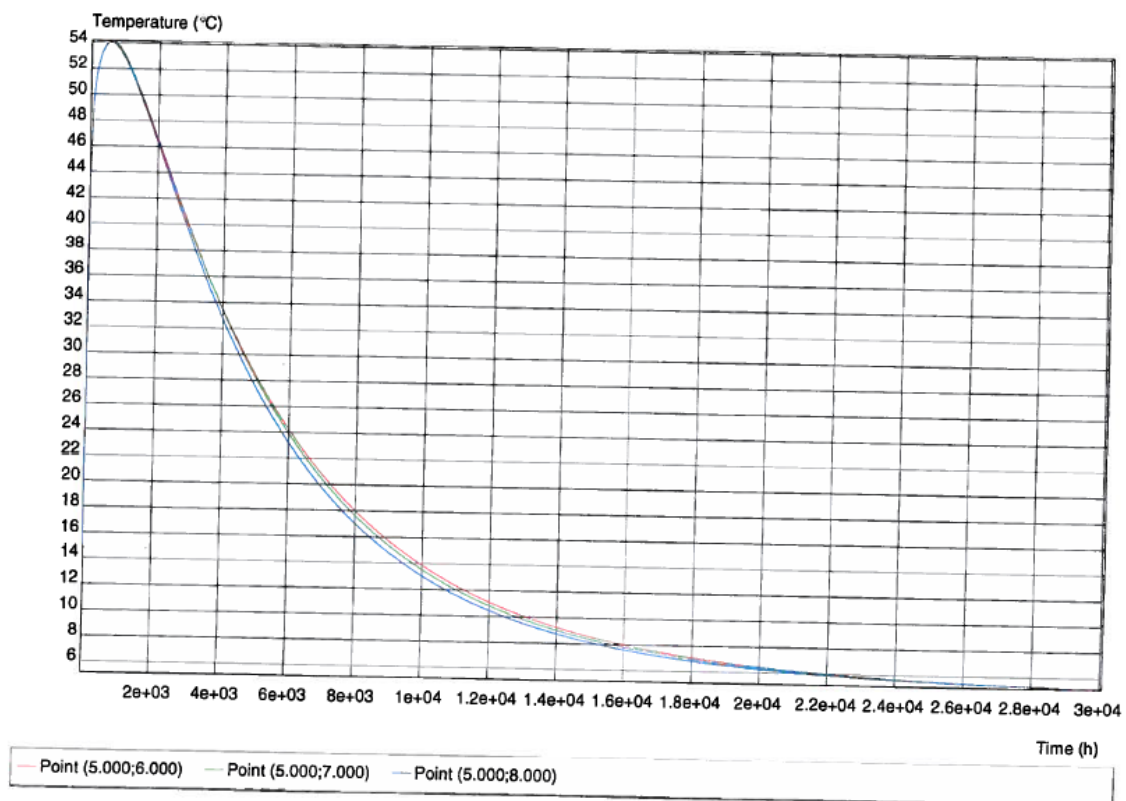
Description  
C = cement = 201 kg/m<sup>3</sup>; FA = Fly ash = 131 kg/m<sup>3</sup>  
SF = Silica fume = 16 kg/m<sup>3</sup>  
C\_tot = C + FA + SF = 348 kg/m<sup>3</sup>  
w\_tot = total water content = 150 kg/m<sup>3</sup>  
w/C\_eff = w\_tot/(C +0.7FA+2SF) = 0.46

Original material parameters  
AlfaTemp 7.2e-06 (1/K), Fcc28d 50 (MPa), Fct28d 3 (MPa), nct 0.43 (-)  
RelaxTimeI 0 (d), TimeZero 0 (d)  
Relax: Age 0 (d), Units (GPa) 0

Following material parameters are changed by the user  
Fct28d 4 (MPa)

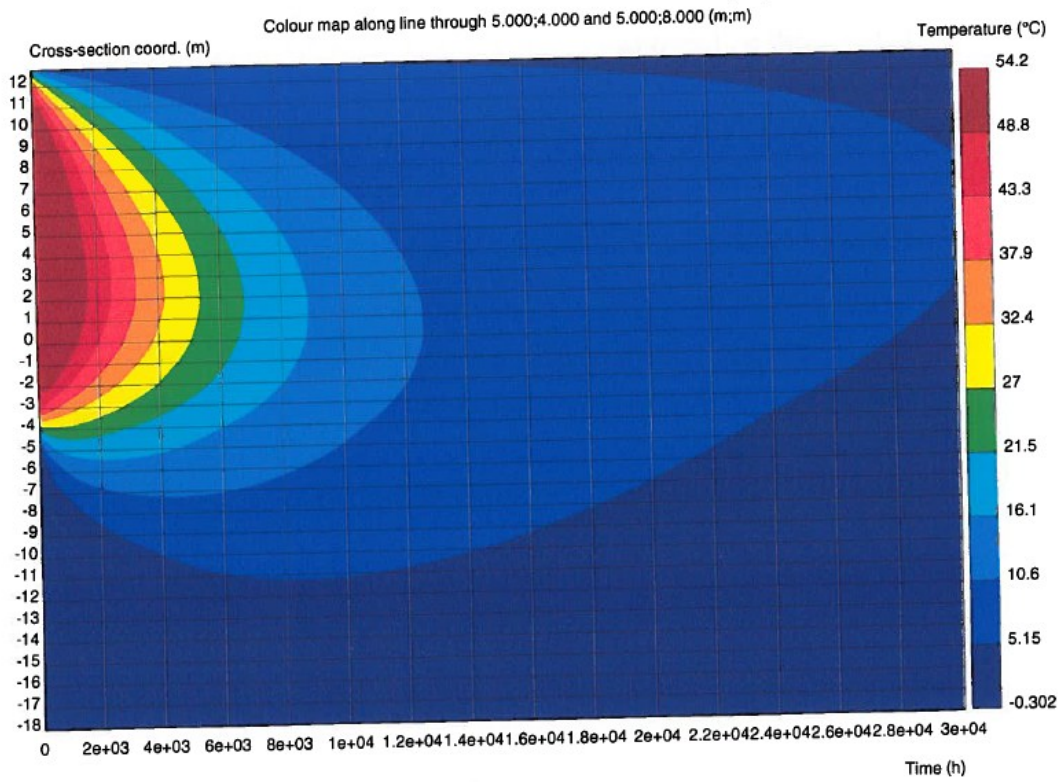
## 7 Heat Computation Results

### 7.1 Temp Punkt



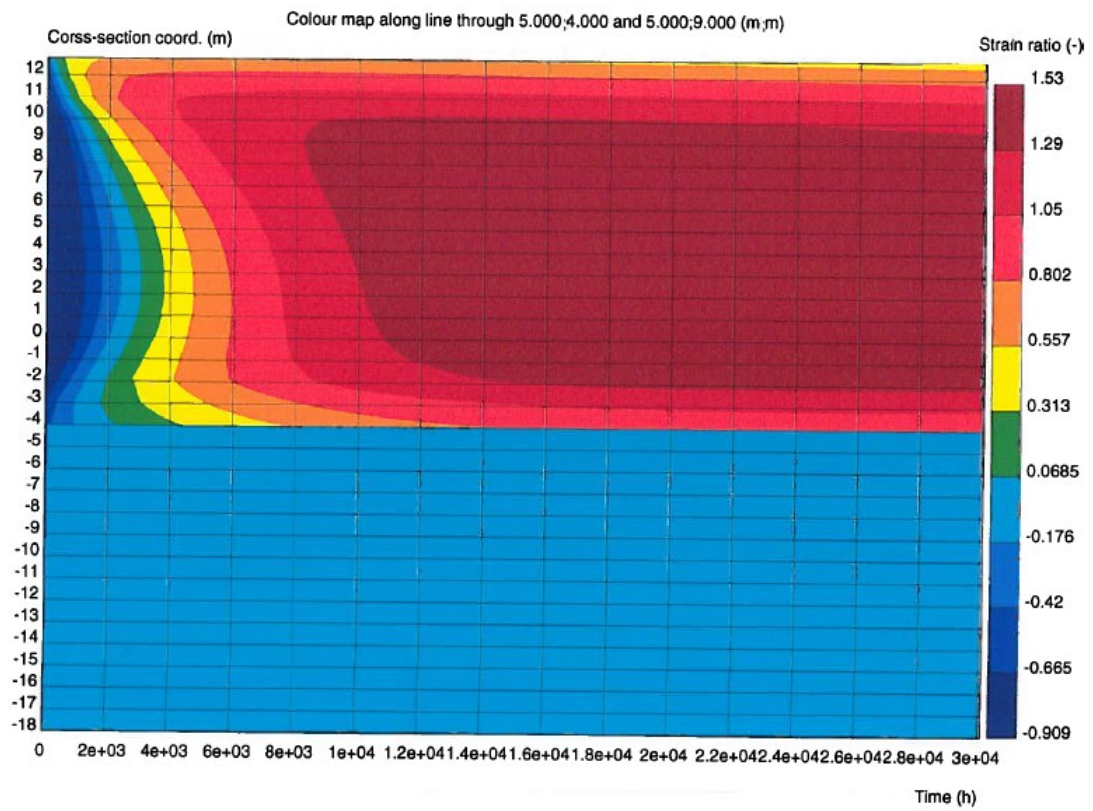
### 7.2 Temp max block2

### 7.3 TempMaxColor



## 8 Plane-Surface Computation Results

### 8.1 Strain max color



### 8.2 Strain pkt

