



Universitetet  
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

## MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering:

Industriell økonomi

- Kontraktadministrasjon/  
BYGG

Vårsemesteret, 20.21.

Åpen /  Konfidensiell

Forfatter:

Joachim Snørteland Lien

Fagansvarlig: Kjell Tore Fosså

Veileder(e): Kjell Tore Fosså

Tittel på masteroppgaven:

Engelsk tittel:

Kostnadsbesparelse ved kontroll  
av temperaturgradient  
Cost savings by controlling the  
temperature gradient

Studiepoeng:

30

Emneord:

Betongteknologi  
Fastholding  
Temperaturgradient  
Autogent svinn  
Herdeiltak

Sidetall: 82.....

+ vedlegg/annet: 13.....

Stavanger, 14/06-21  
dato/år



# Kostnadsbesparelse ved kontroll av temperaturgradient

Joachim S. Lien

Masteroppgave

En masteroppgave levert ved  
Universitet i Stavanger 2021  
Det teknisk- naturvitenskapelige fakultet

## Sammendrag

Det å redusere temperaturgradienten i et betongtverrsnitt for å redusere rissindeksen kan i noen tilfeller være kostbart. Både når det kommer til kostnad og fremdrift. Det å da ha et verktøy som i tilbudsfasen beregner rissindeksen i tverrsnittet, kan være med på å redusere usikkerheten rundt prisingen av post 84.56 i prosesskode 2.

Når betong herder avgir den varme. Mengden sement, tverrsnittets tykkelse og temperaturen på fersk betong er noen av forholdene som bestemmer hvor stor varmetviklingen blir. Når det støpes mot et fundament/bunnplate vil den være kjøligere enn den herdende betongen, noe som vil skape temperaturforskjeller i betongtverrsnittet. Ved å støpe mot et fundament/bunnplate vil denne temperaturforskjellen også bidra til at den herdende betongen blir fastholdt når det trekker seg sammen etter å ha nådd maksimal temperatur.

Sammen med temperaturgradient og fastholding, er autogent svinn også en bidragsyter til økte spenninger i betongtverrsnittet. Det derfor i hovedsak disse spenningsfaktorene som blir omtalt i denne oppgaven.

For å redusere temperaturspenningene i betongen kan det gjøres tiltak. Noen av tiltakene er mer krevende og kostbare enn andre. Effekten av lavere temperatur på fersk betong, lavvarmebetong, varmekabler i tilstøttende konstruksjon og kjølerør er tiltakene som blir drøftet og simulert i denne oppgaven. Det er tatt utgangspunkt i tre ulike tverrsnitt fra *Utførelsesentreprise - Fv. 44 Bussvei Diagonalen - Gauselstasjon*.

Tverrsnittene som blir simulert har ulik tykkelse, samt ulik fundamentstørrelse. Resultatene viser at tykkelsen på veggen er avgjørende for mengden tiltakt som må til for å kontrollere temperaturgradienten. Det kommer også frem at størrelsen på fundamentet øker fastholdingen mellom ny og gammel betong. Denne fastholding øker spenningene i den herdende betongen, noe som øker rissindeksen.

Målet er at resultatene fra simuleringsarket i Excel skal være tilfredstillende nok til at det kan brukes som et verktøy for entreprenører i anbudsfasen. Både for å oppdage risiko, for å prise posten mer nøyaktig og for å spare tid sammenlignet med lite intuitive simuleringsprogram.

## Forord

Grunnen til at jeg har valgt å skrive en oppgave om herdetiltak for å unngå termisk induserte riss, er fordi jeg ser nytten av å ta med meg denne kunnskapen videre inn i arbeidslivet. I og med at det bare blir mer og mer krav til at betongen skal være rissfri, spesielt setter Statens vegvesen krav til at rissindeksne skal være under 0.75. Ved å ha kunnskap innenfor dette området vil jeg være mer forberedt på omfanget av postbeskrivelsen 84.56 i Prosesskode 2 [1], samt effekten de ulike herdetiltakene har på temperaturgradienten i ulike tverrsnitt.

Jeg ønsker å takke veileder Kjell Tore Fosså for gode diskusjoner i startfasen som hjalp meg å avgrense oppgaven, samt gode tilbakemeldinger i slutfasen. I tillegg ønsker jeg å takke Terje Kanstad ved NTNU for lisens til CrackTest COIN, samt Anja B.E Klausen for tilgang til utvidet materialbibliotek.

Til slutt vil jeg takke mine gode kollegaer Sondre Aspøy og Joakim Steira for gode diskusjoner og ideer rundt emnet.

# Innhold

<b>Sammendrag</b>	<b>i</b>
<b>Forord</b>	<b>ii</b>
<b>Figurer</b>	<b>vi</b>
<b>Tabeller</b>	<b>viii</b>
<b>1 Introduksjon</b>	<b>1</b>
<b>2 Teori</b>	<b>3</b>
2.1 Betongteori . . . . .	3
2.1.1 Betong . . . . .	3
2.1.1.1 Sement . . . . .	3
2.1.1.2 Pozzolaner . . . . .	5
2.1.1.3 Tilslag . . . . .	5
2.1.1.4 Tilsetningsstoffer . . . . .	6
2.2 Herdeteknologi . . . . .	7
2.2.1 Temperaturutvikling . . . . .	8
2.2.1.1 Adiabatisk varmeutvikling . . . . .	9
2.2.1.2 Hydratasjonshastigheten . . . . .	9
2.2.1.3 Modenhetsprinsippet . . . . .	10
2.2.1.4 Varmeutvikling . . . . .	10
2.2.2 Styrkeutvikling . . . . .	11
2.2.3 Varmetap . . . . .	12
2.2.3.1 Varmeledning . . . . .	12
2.2.3.2 Konveksjon . . . . .	13
2.2.3.3 Stråling . . . . .	14
2.2.3.4 Sammensatt varmetap . . . . .	14
2.3 Riss i betongen . . . . .	15
2.3.1 Plastisk svinriss . . . . .	15
2.3.2 Plastisk setning . . . . .	16
2.3.3 Autogent svinn . . . . .	16
2.3.4 Uttørkingssvinn . . . . .	17
2.3.5 Temperaturgradient . . . . .	19
2.3.5.1 Indre fastholding . . . . .	20
2.3.5.2 Ytre fastholding . . . . .	20
2.3.5.3 Betongspenninger . . . . .	21

---

2.3.5.4	Rissindeks	21
2.4	Herdetiltak	22
2.4.1	Senke fersk betongtemperatur	23
2.4.2	Lavvarmebetong	23
2.4.3	Varmekabler	24
2.4.4	Kjølerør	24
2.5	CrackTest COIN	25
<b>3</b>	<b>Metode</b>	<b>26</b>
3.1	Inngangsparametere	26
3.1.1	Betongtype	27
3.2	Temperatur	28
3.2.1	Betongtemperatur	28
3.2.2	Omgivelsestemperatur	28
3.3	Geometri	29
3.4	Oppsett av simuleringverktøy	29
3.4.1	Varmekabler i tilstøttende konstruksjon	29
3.4.1.1	Varmeutvikling i fundament	29
3.4.1.2	Varmetap i fundament	30
3.4.1.3	Temperaturutvikling i fundament	31
3.4.2	Aktiveringsenergi	33
3.4.3	Betongens modenhet	33
3.4.4	Varmeutvikling	34
3.4.5	Varmetap	35
3.4.6	Varmetap - Konveksjon og varmeledning	35
3.4.6.1	Transmisjonstill	36
3.4.6.2	Kalkulasjon av varmetap	38
3.4.6.3	Varmetap i to dimensjoner	38
3.4.7	Temperaturutvikling	40
3.4.7.1	Temperaturutvikling i senter	40
3.4.7.2	Temperaturutvikling i senter av vegg høyde/bredde mot forskaling og fundament	41
3.4.7.3	Temperaturutvikling for resten av tverrsnittet	42
3.4.8	Spenningsutvikling	43
3.4.8.1	E-modulus og Strekkfasthet	43
3.4.8.2	Termisk utvidelse	44
3.4.8.3	Autogent svinn	44
3.4.8.4	Fastholding	45
3.4.8.5	Relaxation/slipp	46
3.4.8.6	Sammensatt stress	46
3.4.9	Rissindeks	47
3.5	Oppsett av CrackTest COIN	47
3.5.1	Geometri og tid	48
3.5.2	Elementnett	48
3.5.3	Material- og randbetingelser	49
3.5.4	Temperatur- og spenningsberegninger	51

---

<b>4</b>	<b>Analyse</b>	<b>52</b>
4.1	Herdetiltakenes kostnad . . . . .	54
4.1.1	Lavvarme betong . . . . .	54
4.1.2	Lavere betongvarme . . . . .	54
4.1.3	Varmekabler . . . . .	55
4.1.4	Kjølerør . . . . .	55
4.2	Støttemur K35 . . . . .	56
4.2.1	Simulering i excel . . . . .	57
4.2.2	Simulering i Cracktest COIN . . . . .	58
4.2.3	Kostnad . . . . .	58
4.3	K2599 Kulvertvegger . . . . .	59
4.3.1	Simulering i excel . . . . .	60
4.3.2	Simulering i CrackTest COIN . . . . .	61
4.3.3	Kostnad . . . . .	62
4.4	K2599 Støttemur Vest . . . . .	63
4.4.1	Simulering i excel . . . . .	64
4.4.2	Simulering i CrackTest COIN . . . . .	65
4.4.3	Kostnader . . . . .	66
<b>5</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>68</b>
5.1	Sammenligning Excel vs CrackTest COIN . . . . .	68
5.1.1	Støttemur K35 . . . . .	68
5.1.2	Kulvert K2599 . . . . .	71
5.1.3	Støttemur K2599 . . . . .	74
<b>6</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>77</b>
6.1	Kostnad . . . . .	77
6.1.1	Simuleringsoppsett . . . . .	79
<b>A</b>	<b>Simuleringsresultat K2599 Støttemur</b>	<b>81</b>
A.1	Simuleringsresultat med inngangsparametere . . . . .	81
A.2	Kostnadsoverslag inkludert enhetspriser . . . . .	85
<b>B</b>	<b>K2599 Kulvert</b>	<b>86</b>
B.1	Simuleringsresultat med inngangsparametere . . . . .	86
B.2	Kostnadsoverslag med enhetspriser . . . . .	89
<b>C</b>	<b>Simuleringsresultat K35 Støttemur</b>	<b>90</b>
C.1	Simuleringsresultat med inngangsparametere . . . . .	90
C.2	Kostnadsoverslag inkludert enhetspriser . . . . .	93
	<b>Bibliografi</b>	<b>94</b>

# Figurer

2.1	Prinsippskisse over betongens faser og temperaturutvikling [2] . . . . .	8
2.2	Temperaturforskjell i betongtverrsnitt - a) Isothermal - e) Ingen isolasjon [3] . . . . .	13
2.3	Prinsippskisse over totalt kjemisk svinn mot ytre volumetrisk autogent svinn [2] . . . . .	17
2.4	Illustrasjon over temperaturens effekt på stress . . . . .	19
2.5	Illustrasjon over rotasjon om x- og y-aksen og translasjon om z-aksen . . .	21
2.6	Korrekt fremgangsmåte for rissberegning . . . . .	22
2.7	Krav til temperaturer iht. prosesskode 2 [2] . . . . .	23
3.1	Eksempel utregning for varmekabler i fundament . . . . .	33
3.2	Illustrasjon av varmeutvikling simulert i excel . . . . .	35
3.3	Forslag til enkel inndeling av kvadranter . . . . .	39
3.4	Varmetap i en kvadrant . . . . .	39
3.5	Illustrasjon over temperatur simulert i excel . . . . .	40
3.6	Illustrasjon over hvilke kvadranter som regnes ved bruk av formel 3.24 . .	41
3.7	Illustrasjon over hvilke kvadranter som regnes ved bruk av formel 3.25 . .	41
3.8	Illustrasjon over hvilke kvadranter som regnes ved bruk av formel 3.26 . .	42
3.9	Illustrasjon over hvilke kvadranter som regnes ved bruk av formel 3.27 . .	42
3.10	Illustrasjon av fastholdinggrad i en vegg [2] . . . . .	45
3.11	Prinsippskisse for beregning av betongspenninger [2] . . . . .	46
3.12	Excel-arkets utseende . . . . .	47
3.13	Oppsett CrackTest COIN - Geometri og tid . . . . .	48
3.14	Oppsett CrackTest COIN - Elementnett . . . . .	49
3.15	Oppsett CrackTest COIN - Betongtype . . . . .	50
3.16	Oppsett CrackTest COIN - Randbetingelser . . . . .	50
4.1	Tverrsnitt Støttemur K35 . . . . .	56
4.2	Excel: Simuleringsresultat Støttemur K35 . . . . .	57
4.3	Cracktest COIN: Simuleringsresultat Støttemur K35 . . . . .	58
4.4	Tverrsnitt betongkulvert K2599 . . . . .	60
4.5	Excel: Simuleringsresultat Kulvert K2599 . . . . .	60
4.6	Simuleringsresultat kulvertvegger K2599 . . . . .	61
4.7	Største støttemurtverrsnitt K2599 . . . . .	63
4.8	Minste støttemurtverrsnitt K2599 . . . . .	64
4.9	Excel: Simuleringsresultat Støttemur Vest K2599 . . . . .	64
4.10	Simuleringsresultat støttemur K2599 - Største tverrsnitt . . . . .	65
4.11	Simuleringsresultat støttemur K2599 - Minste tverrsnitt . . . . .	66



---

5.1	Støttemur K35: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Anlegg FA . .	69
5.2	Støttemur K35: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Anlegg FA + 15 grader . . . . .	69
5.3	Støttemur K35: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Anlegg FA + Varmekabler . . . . .	70
5.4	Støttemur K35: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Anlegg FA + 16 % FA (Lavvarme) . . . . .	71
5.5	Kulvert K2599: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Anlegg FA . .	72
5.6	Kulvert K2599: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Anlegg FA + 15 grader . . . . .	72
5.7	Kulvert K2599: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Anlegg FA + varmekabler . . . . .	73
5.8	Kulvert K2599: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Anlegg FA + 16 % FA (Lavvarme) . . . . .	73
5.9	Støttemur K2599: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Lavvarme .	74
5.10	Støttemur K2599: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Lavvarme + 15 grader . . . . .	75
5.11	Støttemur K2599: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Lavvarme + varmekabler . . . . .	75
5.12	Støttemur K2599: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Lavvarme + varmekabler + 15 grader . . . . .	76
A.1	Simuleringsresultat for K2599 Støttemur - Lavvarmebetong . . . . .	81
A.2	Simuleringsresultat for K2599 Støttemur - Lavvarmebetong + 15°C . . . .	82
A.3	Simuleringsresultat for K2599 Støttemur - Lavvarmebetong + Varmekab- ler i fundament . . . . .	82
A.4	Simuleringsresultat for K2599 Støttemur - Lavvarmebetong + 15°C + varmekabler . . . . .	83
A.5	Simuleringsresultat for K2599 Støttemur - Lavvarmebetong + 15°C + varmekabler + Kjølerør cc400 . . . . .	83
A.6	Simuleringsresultat for K2599 Støttemur - Lavvarmebetong + 15°C + varmekabler + Kjølerør cc200 . . . . .	84
A.7	Kostnadsoverslag - Støttemur K2599 . . . . .	85
B.1	Simuleringsresultat for K2599 Kulvert - Ingen tiltak . . . . .	86
B.2	Simuleringsresultat for K2599 Kulvert - 15 °C . . . . .	87
B.3	Simuleringsresultat for K2599 Kulvert - Lavvarmebetong . . . . .	87
B.4	Simuleringsresultat for K2599 Kulvert - Lavvarmebetong . . . . .	88
B.5	Kostnadsoverslag - Kulvert K2599 . . . . .	89
C.1	Simuleringsresultat for K35 Støttemur - Ingen tiltak . . . . .	90
C.2	Simuleringsresultat for K35 Støttemur - 15 °C . . . . .	91
C.3	Simuleringsresultat for K35 Støttemur - Lavvarmebetong . . . . .	91
C.4	Simuleringsresultat for K35 Støttemur - Varmekabler . . . . .	92
C.5	Kostnadsoverslag - Støttemur K35 . . . . .	93

# Tabeller

2.1	Mineraler i sement [4]	4
2.2	Liste over tilsetningsstoff med egenskaper [4]	7
2.3	Varmekonveksjonsmotstand for Vind [5]	14
3.1	Inngangsvariabler for anlegg FA	27
3.2	Inngangsvariabler for anlegg FA + 16% FA [6]	27
3.3	Normal- og gjennomsnittstemperatur for Stavanger [7]	28
3.4	Varmeledningsevne for noen materialer [5]	35
3.5	Varmekonveksjonsmotstand for ulike vindstyrker (faststoff til luft) [5]	36
3.6	Varmeledningsevne for betong [5]	36
3.7	Varmeledningsmotstand for 15mm og 22mm forskalingsfiner [5]	37
3.8	Fysiske verdier for Anlegg FA og Anlegg FA + 16% FA [6]	43
4.1	Fastholdingsgrad for stripefundament og bunnplate	53
4.2	Kostnadsoversikt K35 Støttemur	59
4.3	Oversikt over kostnadene for herdetiltak for kulvert K2599	62
4.4	Kostnadsoversikt for Støttemur vest K2599	67
4.5	Kostnad for støttemur K2599	67
6.1	Kostnadssammenligning mellom Excel og Cracktest COIN for Støttemur K35	78
6.2	Kostnadssammenligning mellom Excel og Cracktest COIN for Kulvert K2599	78
6.3	Kostnadssammenligning mellom Excel og Cracktest COIN for Støttemur K2599	79

# Kapittel 1

## Introduksjon

Det har lenge vært kjent at spenningene i betongen under herdeprosessen bidrar til riss i betongen. Riss som kommer av temperaturgradient mellom senter og overflaten er ofte riss som lukkesetter hvert som temperaturen kommer i likevekt med omgivelsene. Riss på grunn av fastholding av tidligere støpeavsnitt er derimot en større fare for betongen. Disse rissene har en tendens til å forbli åpne, slik at vann, salter og ellers farlige stoffer kan trenge inn i betongen og skade den.

Det å unngå slike riss kan i noen tilfeller kreve herdetiltak for å redusere temperaturgradient i støpeavsnittet. Det å bestemme mengden herdetiltak for å kontrollere temperaturgradienten når en jobb skal prises i anbudsfasen kan derfor være svært tidkrevende og innviklet. Essensen i oppgaven er at det skal produseres et regneark i excel som enkelt kan gi rissindeksen ved plote inn et par enkle parametere. Disse resultatene skal så sammenlignes med Cracktest Coin som er et  $2\frac{1}{2}$  dimensjonalt simuleringsprogram som kan gi rissindeks for hvilket som helst punkt i tverrsnittet. For å se på kostnadene og risikoen dette medfører skal jeg simulere noen av tverrsnittene i *prosjektet Fv44- Bussvei Diagonalen - Gauselstasjon* som lå ute til prising våren 2020.

Prosesskode 2 har postgrunnlag for en rekke elementer når det kommer til simulering, herdetiltak og rissutbedring. I noen tilfeller ber de entreprenørene prise lm med varmekabler og kjølerør ferdig montert. Innfesting av temperaturfølere og logging av temperaturen inngår i egen post. Post 84.56 i prosesskode 2 gir entreprenørene alt ansvar når det kommer til riss. Denne posten prises som en rundsum, før eksakte støpedatoer er satt og helt uvitende om værforholdene ved støpetidspunktet. I denne oppgaven simuleres rissindeksen i 3 ulike tverrsnitt for å gi et innblikk i hvordan post 84.56 kan prises, og for å se hvor stor risiko som ligger i excel-simuleringene.

Målsettingen med denne oppgaven er å undersøke hvor stor risiko og kostnad post 84.56 i prosesskode 2 videreforder over på entreprenørene. Oppgavens hensikt blir derfor å synliggjør effekten herdetiltak har på temperaturgradienten i et støpeavsnitt. Dette med tilhørende kostnad. Målet er å lage et simuleringsark i excel som kan brukes i en anbudsfasen for å beregne kostnadene som oppstår, uten å bruke mye tid på å simulere alle mulige forutsetninger. Det er derfor viktig å kartlegge hvor nøyaktig dette excel-arket beregner rissindeksen sammenlignet med Cracktest COIN, og hvor mye koster tiltakene som må til for å senke temperaturgradienten.

# Kapittel 2

## Teori

### 2.1 Betongteori

#### 2.1.1 Betong

Betong har lenge vært et av de viktigste byggematerialene i verden. Betong kan brukes i bærende konstruksjoner som dammer, kaier, broer, bygninger og oljeplattformer. Det er også mulig å prefabrikkere betongelementer som vegger, dekker, søyler og bjelker som fraktes til anleggsområdet og monteres ferdig støpt.

Betong består i hovedsak av sement, tilslag, vann og tilsetningsstoffer. Det er spesielt tilsetningsstoffer som har utviklet seg de siste tiårene, både tilsetningsstoffer i selve sementen, men også stoffer som tilsettes betongen. Et resultat av dette er at det i dag finnes betonger med ulike egenskaper, som vanlig betong, selvkomprimerende betong, lett betong, tung betong, sprøytebetong etc.

##### 2.1.1.1 Sement

Sement består hovedsakelig av Portland clinker. Portland clinker inneholder i hovedsak kalkstein, men også bauxite, kvarts og gips eller andre avfallstoffer. [4]

Portland sement inneholder ulike mineraler med mengder som angitt i tabell 2.1.

CaO	60-67%
SiO <sub>2</sub>	17-24%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4-7%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5-5%
MgO	1-5%
SO <sub>3</sub>	0,5-3,5%
K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O	0,2-1,5%

TABELL 2.1: Mineraler i sement [4]

Portland clinker kan deles inn i fire hoveddeler, der hver del har en innvirkning på varme- og fasthetsutvikling. Disse delene blir kalt alite, belite, aluminate og ferrite.

**Alite** er ansvarlig for betongens avbindingstidspunkt, noe som vil si at alite bidrar til tidlig fasthet. Alite bidrar også til betongens fasthet på lang sikt. Alite genererer rundt 500kJ/kg i løpet av herdeforløpet. Portland clinker består av 50-70% alite. Det vil si at størst del av klinkeren består av alite. [4]

**Belite** er lite reaktivt og bidrar derfor lite til tidlig fasthet. Til gjengjeld er belite den delen som produserer mest C-S-H. Belite bidrar også til den langvarige betongstyrken. Sammenlignet med alite, bidrar belite i mye mindre grad til temperaturutviklingen og total varmeutvikling ligger rundt 260kJ/kg. Vanligvis ligger mengden belite på 15-30% i en vanlig portland klinker. [4]

**Aluminate** er høy-reaktiv med vann. For å begrense reaksjonshastigheten til aluminate, blir det tilsatt noen få prosent kalsium sulfat. Dette bidrar til at betongen ikke setter seg for tidlig. Når aluminate og vann reagerer vil det produseres kalsium sulfoaluminate hydrater. Reaksjonen vil avgi store mengder varme, opp mot 870 kJ/kg. Det er mulig å redusere mengden aluminate i sementen ved å bytte deler av Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> med Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i rå materialet. Portland clinker består av 5-10% aluminate, mens i portland klinker som er sulfat resistent, kan mengden aluminate være under 5%. [4]

**Ferrite** reagerer på kan på mange måter minne om reaksjonen til aluminate. Til gjengjeld generer ferrite markant mindre varme. Total varmeutvikling ligger på 420kJ/kg. Av total mengde portland clinker består 5-15% av ferrite. [4]

Sementkornenes finhet/størrelse (blaine) er også en faktor som avgjør hvor stor varmeutviklingen blir. Portland sement har et spesifikk overflateareal fra 0.001 til 0.1 mm, med et gjennomsnitt på 0.02mm. Et høyt overflateareal gjør sementen mer reaktiv mot vann. Dette er egenskaper som fremskynder hydrasjonsprosessen inkludert varmeutviklingen. Det bidrar også til økte fysiske egenskaper i betongens tidligfase. [4]

I Norge bruker vi stortsett disse sementtypene:

- Norcem Standardsement
- Norcem Standardsement FA
- Norcem Industrisement
- Norcem Anleggsement
- Norcem Anleggsement FA

#### **2.1.1.2 Pozzolaner**

Pozzolaner er aktive mineraler som byttes ut med deler av sementen. Pozzolaner kan både blandes inn i sementen og i betongen. De vanligste pozzolanene er flygeaske og silikastøv, men slagg er også brukt i noen tilfeller. Det å bytte ut deler av portlandklinkeren har både økonomiske og miljøvennlige aspekter. [4]

##### **Flygeaske**

Flygeaske gir ofte bedre flyteegenskaper i fersk betong når tilsatt i betongen og ikke direkte kvernet i sementen. Som for eksempel Standardsement FA og anleggsement FA. Lave temperaturer har en retarderende effekt på betonger med tilsatt FA, og motsatt vil høye temperaturer gi akselererende effekt på betongens fysiske egenskaper. Ved å erstatte noe av sementen med FA, utsettes noe av varmetviklingen. Dette fører til at maksimal temperatur er lavere for en betong med flygeaske enn en uten. [4]

##### **Silika støv**

Tilsatt silika støv opp mot 10% påvirker verken avbinding eller temperaturutvikling nevneverdig. Pozzolanet bidrar på sin side til større varmetvikling, men på grunn av en tregere reaksjon vil det ikke påvirke temperaturen negativt. Pozzolaner er på sin side mer omfintlig for temperaturer. Lav temperatur utsetter utviklingen av fysiske egenskaper, og høyere temperaturer akselerer utviklingen av de fysiske egenskapene. [4]

#### **2.1.1.3 Tilslag**

Tilslag er i hovedsak sand og grus. Totalt består en typisk betong av 65-75% sand og grus. Tilslag deles ofte inn i ulike fraksjoner fordelt på størrelse for å få en jevn fordeling. [4]

Fraksjonen som vi ofte omtaler som sand er fraksjonen som går fra 0-8mm. Grus omtales ofte for fraksjonene 8-16mm eller 8-22mm.

### **Sand - 0-8mm**

Sand er det fineste tilslaget som blir tilsatt, der størrelsen på partiklene varierer mellom 0-8mm. I en betongblanding er det viktig at tilslagets størrelse har en fordeling som skaper minst mulig hulrom som må fylles av sement. Sand vil derfor i stor grad fylle hulrommet som grusen skaper. Sand har også mulighet til å holde på fuktighet, og det er derfor viktig å ikke ha veldig tørr sand, fordi sanden vil kunne trekke til seg vann som blir tilsatt betongen, noe som kan ødelegge betongen. [4]

### **Grus - 8-16mm**

Tilslaget som omtales som grus er som sagt fordelt innenfor 8-16mm. Dette tilslaget kan enten være naturlige masser, eller utsprengte masser. Naturlige masser har stort sett en mer rund/oval form, og utsprengte masser er litt mer kantete. Ved å bruke et grustilslag som inneholder både naturlige og utsprengte masser, skapes det mindre hulrom og mindre volum må fylles av sand og sement. Det er også viktig at grustilslaget er jevnt fordelt. [4]

#### **2.1.1.4 Tilsetningsstoffer**

Tilsetningsstoffer er kjemiske blandinger som tilsettes fersk betong for å gjøre den bedre. Det er gjort store fremskritt på utviklingen av nye tilsetningsstoff de siste tiårene. Det er i mange tilfeller ikke mulig å tilsette tilsetningsstoff for å gjøre en betong med dårlig mix-design bedre. Effekten er også i stor grad avhengig av ulike tilsetninger. Som for eksempel[4]

- Mengden tilsetningsstoff
- Type tilsetningsstoff
- Mengde sement, tilslag og andre tilsetningsstoffer
- Konsistens
- Tidspunkt for tilsetting av tilsetningsstoff
- Temperatur

Ulike tilsetningsstoff er listet opp i tabell 2.2. Dette er ikke en uttømmende liste, men tabellen inneholder de mest brukte i Norge.



Navn	Egenskaper
Plastiserende / Super Plastiserende	Tilsetningsstoff som uten å berøre konsistensen tillater å redusere vannmengden. Eller som uten å berøre vannmengden forbedrer slump- og utbredelsesmålet
Svinnreducerende	Tilsetningsstoff som hindrer vanntap
Luftinntrengende	Tilsetningsstoff som tillater en kontrollert mengde med jevnt fordelte luftbobler og lar disse bli innkapslet i betongen under miksing og i herdet betong.
Setnings Akselerator	Tilsetningsstoff som reduserer tiden fra plastisk til fast betong.
Fasthets akselerator	Tilsetningsstoff som øker hastigheten på utvikling av fysiske egenskaper i tidligfase, uten å berøre avbindingstidspunktet.
Retarder	Tilsetningsstoff som øker tiden fra plastisk til fast betong.

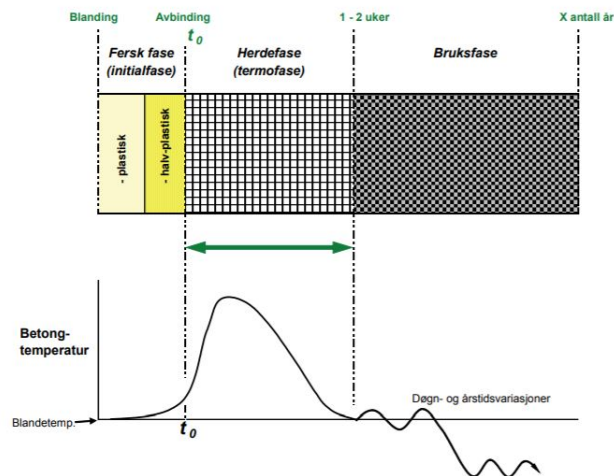
TABELL 2.2: Liste over tilsetningsstoff med egenskaper [4]

## 2.2 Herdeteknologi

Betongens syklus deles ofte inn i tre faser.

- Fersk fase
- Herdefase
- Bruksfase

Fersk fase, også kalt plastisk fase, er frem til betongen begynner å sette seg. Det vil si betongens tilstand under blanding, transport og utstøping. Etter hvert som betongens hydrasjonsprosess øker, mister betongen all konsistens. Dette kommer av at det eksisterer svake bindinger mellom partiklene, samt at det dannes kjemiske bindinger i sementen. Betongen er i dette tidsrommet i den halv-plastiske fasen. Det som kjenner denne fasen er at betongen har tiksotropiske egenskaper. Det vil si at betongen er fast, men at små vibrasjoner kan gjøre betongen mer flytende. [2]



FIGUR 2.1: Prinsippskisse over betongens faser og temperaturutvikling [2]

Etter en tid  $t_0$  begynner betongen å utvikle mekaniske egenskaper. Dette er typisk tidspunktet for betongens avbinding og starten på herdefasen. Det som styrer hydrasjonsprosessen og tidspunktet for avbinding,  $t_0$ , er betongens temperatur, bindemiddel og tilsetningsstoffer. En betong med mye flygeaske vil bruke lenger tid på avbinding enn en standard betong.  $t_0$  er vanligvis et sted mellom 6-12 timer. Herdefasen er i starten preget av varmeutvikling, fordi den eksoterme hydrasjonsreaksjonen avgir store mengder varme inntil sementen er ferdig å reagere. For mindre konstruksjoner oppnås ofte maksimal temperatur mellom 18-24t. For større konstruksjoner, for eksempel store dam-konstruksjoner kan maksimal temperatur ventes et sted mellom 1-2 dager. [2]

Etter hvert som varmeutviklingen avtar er varmetapet til omgivelsene størst. Dette fører til nedkjøling i konstruksjonen. Der størrelsen og omgivelsestemperaturen bestemmer hvor fort konstruksjonen kommer i likevekt med omgivelsene. [2]

Bruksfasen kjennetegnes ved at konstruksjonen er i bruk og at temperaturen i konstruksjonen er i likevekt med omgivelsene. [2]

### 2.2.1 Temperaturutvikling

Den kjemiske reaksjonen som skjer mellom sement og vann er som sagt tidligere en eksoterm reaksjon som avgir varme. Graden av varmeutvikling er avhengig av fordelingen av alite, belite, aluminat og ferrite. En standard portland sement utvikler 400-500 kJ/kg ved fullstendig hydratasjon. En betong vil som regel aldri være fullstendig hydratisert. Graden av hydratasjon avhenger av klinkersammensetningen, finheten til sementkorna og w/b-forholdet. [4]

### 2.2.1.1 Adiabatisk varmeutvikling

Ved adiabatisk forhold vil temperaturstigningen følge formel 2.1. Med adiabatisk menes det at det ikke skjer noen form for varmeutveksling mellom betong og omgivelsene. [4]

$$\Delta\theta = \frac{Q_{\infty} \cdot C}{\rho \cdot c_b} \quad (2.1)$$

Hvor:

$\Delta\theta$ : temperatursstigning ( $^{\circ}\text{C}$ )

$Q_{\infty}$ : Mengde varmeutvikling pr kg sement ( $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ )

$C$ : Mengde sement ( $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ )

$c_b$ : Betongens varmekapasitet ( $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}}$ )

$\rho_r$ : Betongens densitet ( $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ )

### 2.2.1.2 Hydratasjonshastigheten

Hydratasjonshastigheten er svært avhengig av betongens temperatur i fersk fase, der en betong på  $20^{\circ}\text{C}$  reagerer raskere enn en på  $10^{\circ}\text{C}$ . Arrheniuslikningen beskriver forholdet mellom temperatur og kjemisk aktivitet som en termisk aktivert prosess.  $H(\theta)$  gir graden av hydratasjon ved en gitt temperatur  $\theta$ , sammenlignet med en referansetemperatur på  $20^{\circ}\text{C}$ . [4]

$$H(\theta) = \exp \frac{E(\theta)}{R} \cdot \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{273 + \theta} \right) \quad (2.2)$$

Hvor:

$E(\theta)$ : Aktiveringsenergi ( $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ )

$\theta$ : Betongtemperaturen ( $^{\circ}\text{C}$ )

$R$ : Gasskonstanten ( $8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$ )

Aktiveringenergien omtalt i 2.2 er best forklart med Freiesleben- Hansen og Pedersen's modell 2.3 og 2.4. Der temperaturer over  $20^{\circ}\text{C}$  er konstant lik A og temperaturer under  $20^{\circ}\text{C}$  er lineært stigende med synkende temperatur. [4]

For  $\theta \leq 20^\circ C$

$$E(\theta) = A + B \cdot (20 - \theta) \quad (2.3)$$

For  $\theta > 20^\circ C$

$$E(\theta) = A \quad (2.4)$$

A og B vil være ulik fra betongresept til betongresept og vil være avhengig av sementtype, pozzolaninnhold og delvis av w/b-forholdet. Vanligvis er  $A=20-40 \frac{kJ}{mol}$  og  $B=1.0-1.5 \frac{kJ}{mol}$ . [4]

### 2.2.1.3 Modenhetsprinsippet

Ved å bruke hydratasjonshastigheten er det mulig å beregne hydratiseringens fremgang for ulike temperaturer. Dette gjøres ved å beregne betongens ekvivalente alder ved  $20^\circ C$ , som er den herdetiden ved  $20^\circ C$  som er nødvendig for oppnå samme grad av hydratasjon som observert. Denne virtuelle alder, også kalt modenhet, er kalkulert ved tidsintegralet av hydratasjonsfunksjonen fra  $t_0$  til  $t$ , se formel 2.5 under. [4]

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

Vanligvis har vi ikke muligheten til å beregne temperaturutviklingen som en matematiskfunksjon. Ofte er det logget en temperaturhistorikk ønskes prosessert. Det er derfor ofte mer aktuelt å bruke en metode som deler historikken inn i inkrement, formel 2.6. [4]

$$M = \sum_{i=1}^{i=n} H(\theta_i) \cdot \Delta t_i \quad (2.6)$$

Modenheten,  $M$ , er beregnet ved å dele en temperaturhistorikk inn i  $n$  antall tidsintervall med lengde  $\Delta t_i$ . For hvert tidsintervall blir  $\theta_i$  beregnet, før hydratasjonsgraden blir kalkulert i  $H(\theta_i)$ . Den økte betongmodenheten,  $\Delta M_i$  i tidsintervallet  $\Delta t_i$  er fastsatt ved å ta produktet av  $H(\theta_i) \cdot \Delta t_i$ . Den totale modenheten er bestemt ved å ta summen av  $\Delta M_i$  for alle tidsintervall, se formel 2.6. [4]

### 2.2.1.4 Varmeutvikling

Når modenheten ved et spesifikt tidspunktet er kalkulert er det mulig å beregne varmeutviklingen i betongen ved det samme tidspunktet. I formel 2.7 brukes modenheten for

å finne varmeutvikling,  $Q_M$ . Formel 2.7 er introdusert av Freisleben-Hansen, og er ofte kalt den danske modellen.[4]

$$Q_M = Q_\infty \cdot \exp\left(-\left(\frac{\tau}{M}\right)^\alpha\right) \quad (2.7)$$

Hvor:

$Q_\infty$ : Total varmeutvikling ( $\frac{kJ}{kg}$ )

$\tau_e$ : Retardasjons parameter (h)

$\alpha$ : Kurvatur parameter

Parameterene over varierer alt etter mengden av sement, FA, tilslag etc. Ved å utføre et semi-adiabatisk forsøk kan parameterne bestemmes ved å bruke Smeplass sitt herdekasse-simuleringsark. [4]

CrackTest COIN som er en videreutvikling av det svenske programmet ConTest PRO er produsert i Sverige. I Sverige bruker de en annen tilnærming til beregninger av varmeutvikling.

$$Q(t_e) = W_\infty \cdot \exp[-\lambda_1 \cdot \ln(1 + \frac{t_e}{t_1})]^{\kappa_1} \quad (2.8)$$

$Q(t_e)$ : Varmeutvikling avhengig av modenhetstiden ( $\frac{kJ}{kg}$ )

$W_\infty$ : Total varmeutvikling ( $\frac{kJ}{kg}$ )

$t_e$ : Ekvivalent modenhetstid

$\lambda_1, t_1$  and  $\kappa_1$ : Kurve tilpasnings parametere

### 2.2.2 Styrkeutvikling

Trykkfasthet kan beregnes på samme måte som varmeutviklingen i betongen. [4]

$$f_c(M) = f_{c\infty} \cdot \exp\left(-\left(\frac{\tau_e}{M}\right)^\alpha\right) \quad (2.9)$$

Det er derimot funnet ut at fremgangsmåten gitt i formel 2.10, 2.11 og 2.12 blir mer nøyaktig. Denne formelen tar hensyn til modenhet ved ekvivalent tid, samt avbindingstidspunktet. Ved å bruke ekvivalent tid er det mulig å beregne trykkfasthet,

strekfasthet og e-modul ved et gitt tidspunkt. Dette innebærer at det er gjort testing for å bestemme 28-dagers karakteristisk trykkfasthet, strekkfasthet og e-modulus, samt parameterene  $s$ ,  $n_t$  og  $n_E$ . [8]

### Trykkfasthet

$$f_c = f_{c28} \cdot \left( \exp\left(s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_{eq} - t_0}}\right)\right)\right) \quad (2.10)$$

### Strekfasthet

$$f_t = f_{t28} \cdot \left( \exp\left(s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_{eq} - t_0}}\right)\right)\right)^{n_t} \quad (2.11)$$

### E-modulus

$$E_c = E_{c28} \cdot \left( \exp\left(s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_{eq} - t_0}}\right)\right)\right)^{n_E} \quad (2.12)$$

## 2.2.3 Varmetap

Varme vil alltid forflytte seg i et material ved temperaturdifferanse. I en herdene betongkonstruksjon er det ønskelig å begrense varmetapet, for å unngå for stor temperaturdifferanse i tverrsnittet.

De vanligste formene for varmetransport er:

- Varmedledning
- konveksjon
- Stråling

### 2.2.3.1 Varmedledning

Varmedledningsmotstanden er en konstant størrelse for hvert enkelt material. Varmedledningsmotstanden avhenger av materialets tykkelse, og av materialsammensetningen.

[5]

Varmeledningens motstanden beskrives som:

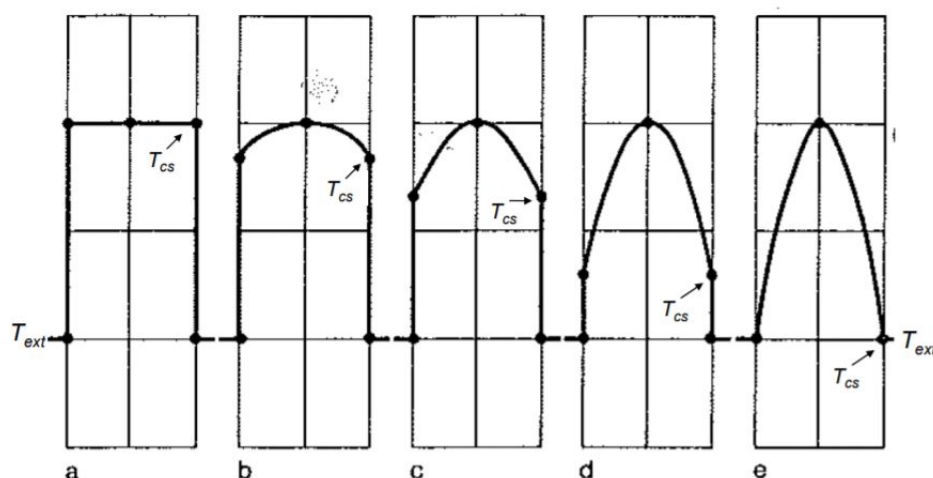
$$m = \frac{d}{\lambda} \quad (2.13)$$

Hvor

$d$ : Materialets tykkelse (m)

$\lambda$ : Materialets varmeledningsevne ( $\frac{W}{mK}$ )

Konstruksjonens totale varmeledningens motstand settes sammen av hvert materials varmeledningsevne. Varmeledningsevne varierer med porøsiteten og fuktigheten i materialet. Stålforskaling vil isolere dårlig sammenlignet med finèr av tre. [5]



FIGUR 2.2: Temperaturforskjell i betongtverrsnitt - a) Isothermal - e) Ingen isolasjon [3]

### 2.2.3.2 Konveksjon

Konveksjon beskrives som varm luft som blir skiftet ut med kald luft, noe som i dette tilfellet kjøler ned betongoverflaten. Dette vil i noen tilfeller være kritisk for temperaturgradienten i herdende betong. Betongen utvikler varme som fraktes ut til forskalingen. På andre siden av forskalingen vil det strømme til kald luft, som vil frakte bort varmen og skape temperaturgradient i tverrsnittet. Konveksjon vil i stor grad avhenge av temperatur og vindforholdene på stedet. [5]

Konveksjonen vil være størst med stor temperaturredifferanse mellom omgivelsene og betongoverflatene. Den vil i tillegg øke med større overflateareal. Motsatt vil konveksjonen avta med tiltak som skaper større varmekonveksjonsmotstand. [5]

Varmekonveksjons motstand bestemmes av hvor fort varmetapet i overflaten kan skje.

$$m_k = \frac{1}{a_k} \quad (2.14)$$

Hvor

$m_k$ : Varmekonveksjons motstand ( $\frac{m^2 \cdot h \cdot ^\circ C}{kJ}$ )

$a_k$ : Varmeovergangstallet ( $\frac{kJ}{m^2 \cdot h \cdot ^\circ C}$ )

Overgangstallet avhenger av hvilke materialer konveksjonen skjer mellom. Konveksjonen vil være vesentlig større fra fast stoff til vann enn fast stoff til luft. [5]

Vindhastigheten bidrar til økt konveksjon som illustrert i tabellen 2.3.

Faststoff til luft	
Vindhastighet (m/s)	$m_k$ ( $\frac{m^2 h ^\circ C}{kJ}$ )
0	0.05
2	0.021
5	0.011
10	0.006
20	0.0004

TABELL 2.3: Varmekonveksjonsmotstand for Vind [5]

### 2.2.3.3 Stråling

Overføringen av energi mellom et varmt legeme gjennom et medium, ofte luft, til et kaldere legeme, kalles varmestråling. Energien som treffer flaten kan absorberes, reflekteres og transmitteres. Absorpsjonstallet  $a$ , beskriver hvor godt et legeme absorberer varme. I vertikale flater kan ofte denne formen for varmetap neglisjeres fordi det ikke har store utildekkede flater. Store gulv/dekke-flater er desto mer utsatt for varmetap grunnet stråling.[5]

### 2.2.3.4 Sammensatt varmetap

Det totale varmetapet fra en konstruksjon avhenger av konstruksjonsmaterialet og geometrien. Forholdet mellom varmekapasiteten til konstruksjon og dens totale overflate avgjør hvor stor avkjøling som oppstår.



Transmisjonstallet bestemmes av:

$$K = \frac{1}{m} = \frac{1}{m_f + m_i + m_k} \quad (2.15)$$

Hvor

$m_f$ : Forskalingens motstandstall

$m_i$ : Isolasjonens motstandstall

$m_k$ : Konvektivt motstandstall hentet fra tabell 2.3

Dette innebærer at varmetap fra fordamping og stråling neglisjeres i dette tilfellet. [5]

## 2.3 Riss i betongen

### 2.3.1 Plastisk svinriss

Plastisk svinn oppstår hvis fordampningshastigheten ved en betongoverflate er større enn betongens evne til å frakte fuktighet til overflaten. Dette vil føre til at betongen trekker seg sammen etter hvert som betongoverflaten tørker ut. Spenningene ved plastisk svinn kommer av at det dannes vannmenisker ved overflaten som skaper undertrykk i porevannet og kontraksjonskrefter mellom partiklene. Den gjennomsnittlige avstanden mellom partiklene vil da være mindre og betongen trekker seg sammen. [2]

Plastisk svinn oppstår oftest ved lavere V/C-tall og mye finsats i betongen. Disse parametrene vil i første omgang hindre vanntransporten til overflaten, noe som gjør at overflaten tørker ut. Sammentreknings kreftene gir ikke nødvendigvis riss, men plastisk svinriss er ofte en konsekvens. [2]

Betongens evne til å transportere fuktighet til overflaten er derfor den største pådriveren ved plastisk svinn. Evnen til fuktighetstransport avhenger av blant annet:

- Betong- og lufttemperatur
- Relativ fuktighet
- Vindhastighet

Plastisk svinnriss oppstår historisk sett alltid på varme dager, støpt med varm betong, lav luftfuktighet og mye vind. Så sant det ikke blir utført tiltak for å forsinke fuktighetstapet, med for eksempel tildekking med plast eller herdemembran. Det er i stor grad vind som avgjør hvor stor uttørkingen av overflaten blir. Fordamping ved overflaten kan i tillegg kjøle ned betongen og gi termisk sammentrekning. [2]

### 2.3.2 Plastisk setning

Plastisk setning observeres ved at faste partikler synker og presser vannet til overflaten, slik at betongen skiller seg. Det er betongsammensetningen som bestemmer hvor stor setning som kan observeres. [2]

Setning oppstår ofte når:

- Densitetforskjellene mellom vann og de faste partiklene gjør at vannet blir presset oppover og partiklene synker. Når vann samles ved overflaten, kalles dette for bleeding.
- Ved ustabil betong mtp luft, vil luftbobler kunne unnslippe om de får fri oppdrift til overflaten
- Plastisk svinn vil kunne bidra til setning ved fordamping fra overflaten.
- Autogent svinn vil alltid bidra til setning
- Forskaling og tidligere støpeavsnitt vil kunne bidra til vannsug og skape setning.

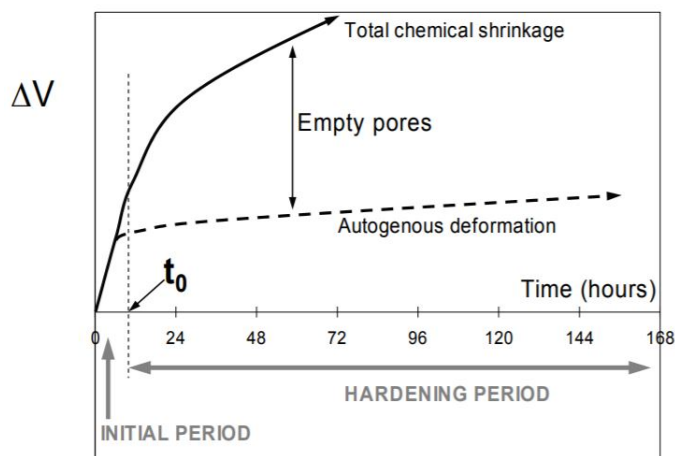
Hvis betongen blir behandlet uniformt, altså behandlet likt over hele overflaten vil setningen skje uten hindring. Differansesetning vil oppstå hvis setning blir hindret lokalt. Dette vil kunne skape riss.[2]

### 2.3.3 Autogent svinn

Kjemisk svinn er svinn som oppstår naturlig i alle betonger fordi reaksjonsproduktet tar mindre plass enn reaktantene. Dette svinnet er resultatet av betongenshydratasjonsprosess. Kjemisk svinn starter i det vann blir blandet med sementen, og vil pågå til sementen er ferdig å reagere. Kjemisk svinn avhenger av mengden sement, og ligger normal rundt  $0,06 \text{ cm}^3$  per gram av mengden sement som reagerer. [2]

Ved volumtap inni betongen vil det skapes porer i bindemiddelet. Disse porene er ofte å se i sammenheng med faststoffets gel og kapillærporestruktur, og kalles kjemisk svinnporer.

Det indre svinnet vil også føre til et ytre svinn. Det er det ytre svinnet som omtales som autogent svinn. [2]



FIGUR 2.3: Prinsippskisse over totalt kjemisk svinn mot ytre volumetrisk autogent svinn [2]

Vannmetningsgraden i porestrukturen som dannes under kjemisk svinn vil variere ved at hydratasjonsprosessen bruker fukten til å reagere. Denne nedgangen i vannmetning omtales også som selvuttørking. Betongsammensetninger med lave  $v/c$ -tall vil ofte ha større tap av relativ fuktighet i porestrukturen. Tapet vil ofte være fra 100 % i fersk fase til 80% etter noen uker. [2]

Når porene tørker ut vil det oppstå vannmenisker og kapillært undertrykk som vil flyttes over til faststoffet. Denne overføringen av trykk resulterer i ytre kontraksjoner, også kalt autogent svinn. [2]

### 2.3.4 Uttørkingssvinn

Uttørkingssvinn er et resultat av kapillære spenninger og undertrykk i porevannet. Store eksponerte flater som for eksempel gulv og dekker er mest utsatt for uttørkingssvinn på grunn av jevn tilførsel av luft som gjør at overflaten tørker ut. Denne typen svinn kan minne om plastisk svinn. Forskjellen er at uttørkingssvinnet oppstår når betongen er stiv. Selve uttørkingen oppstår ved betongoverflaten, og jobber seg innover i tverrsnittet med tiden. Overflaten er da utsatt for strekkspenninger som kan føre til svinnriss. [2]

Ved tynne tverrsnitt, som for eksempel påstøp vil ensidig uttørking føre til at kanten ønsker å krumme oppover. Dette kalles kantreis og vil i noen tilfeller føre til at betongen river seg løs fra isolasjon o.l underlag. Det er størst fare for kantreis i tidlig fase. Etterhvert som uttørkingen beveger seg inn i tverrsnittet vil sammentrekningen bli mer

uniform, og graden av krumning vil avta. Større gulvverrsnitt vil motvirke en del av kantroisningen. [2]

For å øke støpeligheten ved en gulvstøp blir det ofte bestilt betong som er redusert. Det vil si at det blir brukt mer sement og sand for å erstatte en del av steinmengden. Denne erstatningen gjør betongen mer utsatt for uttørkingssvinn. Andre faktorer som påvirker graden av svinn er mengde vann i betongblandingen, mengden og graderingen av tilslag og luftfuktigheten i omgivelsene rundt eller ved utstøpingen. [2]

Betongoverflater blir som oftest utsatt for både uttørking, men også for fukt. En del av uttørkingen er reversibel ved tilførsel av fukt, mens resten av svinnet er permanent, altså irreversibelt. Betongen vil utvikle riss ved for høy grad av uttørking, der det kun er 40-70 % som er reversibelt. Oppfukting vil føre til svelling i betongoverflaten. Det er verdt å merke seg at en lang periode med uttørking kan kompenseres for ved en liten regnbyge, der det er den første uttørkingen som skaper det irreversible svinnet i betongen. [2]

For betongvegger vil overflaten først bli utsatt for uttørkingssvinn når veggen avforskales. Det vil derfor være ønskelig å beholde forskalingen på så lenge som mulig. I det veggen avforskales vil svinnet være størst, før den avtar etter en stund. Graden av uttørkingssvinnriss er avhengig av betongsammensetning, men kan i noen tilfeller komme opp i  $300-1000 \cdot 10^{-6}$ . [2]

Selve rissene kan følge et ganske tilfeldig mønster, mens i andre tilfeller kan det følge samme mønster som armeringen. Andre grunner til svinnriss er i forbindelse med staghull, variasjon i tverrsnittstykkelse, samt svakheter i konstruksjonen. [2]

Graden av svinn kan bestemmes ut fra følgende formel:

$$\epsilon_b = \epsilon_p \cdot (1 - V_t)^n \quad (2.16)$$

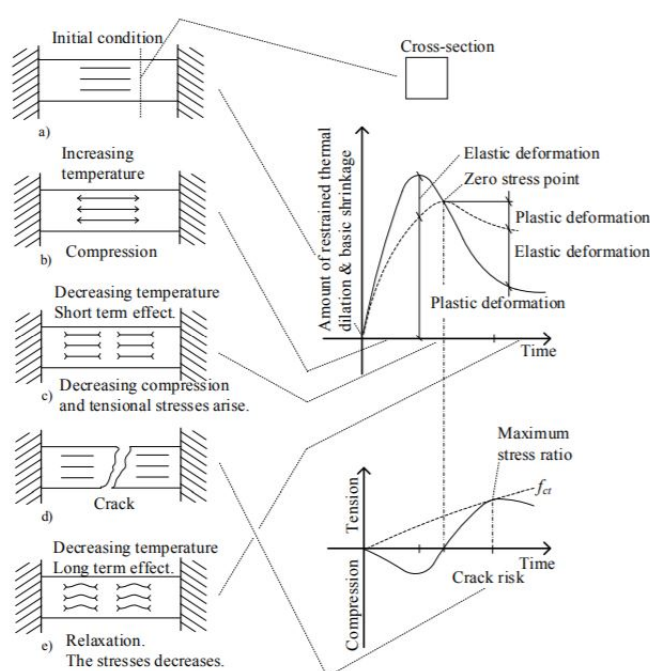
Hvor

- $\epsilon_p$ : Mengde svinn i ren sement
- $V_t$ : Tilslaget volum i blandingen

n er bestemt ved forsøk, men ligger ofte rundt 1.2-1.7. At n er større en 1 betyr at evnen tilslaget i betongen har til å redusere svinn er større en dens volum. Tilslaget er stivere enn sementen, og når det da blir dannet heftspenninger mellom tilslaget og betongen, vil dette jobbe mot at deformasjoner i sementet skjer. Dette kommer av at sementen blir fastholdt. [2]

### 2.3.5 Temperaturgradient

Når sementen reagerer med vann vil hydratiseringsprosessen i betongen starte. Kjemiske forbindelser i sementen reagerer med vann. Disse reaksjonene utvikler varme. Når det blir støpt ute på norske byggeplasser blir det ikke støpt med adiabatisk forutsetninger. Det vil derfor være varmetap fordelt utover i tverrsnittet. Altså at temperaturen er høyest i senter av konstruksjonen, og at varmetapet blir større lenger ut mot randen av tverrsnittet. Denne forskjellen i temperatur kalles temperaturgradient. Betong utvider seg med konstanten  $\alpha$ .  $\alpha$  varierer utover i herdeforløpet, og avhenger av ingrediensene i betongblandingen. [2]



FIGUR 2.4: Illustrasjon over temperaturens effekt på stress

Spenningsene i betongen følger da formel

$$\epsilon_T = \Delta T \cdot \alpha_T \quad (2.17)$$

Hvor

- $\epsilon_T$ : Spenninger forårsaket av temperaturgradient
- $\Delta T$ : Temperaturdifferansen mellom  $T_{senter}$  og  $T_{rand}$
- $\alpha_T$ : Temperaturens utvidelseskoeffisient i betong. Ofte satt til  $10 \cdot 10^{-6}$

### 2.3.5.1 Indre fastholding

Indre fastholding oppstår når det er ulik temperatur i støpetverrsnittet. Temperaturforskjellen kommer av varmekonveksjon ut mot randen. På den måten vil temperaturen være høyest i senter av tverrsnittet, og lavest i ytterkant av tverrsnittet mot flater som er eksponert for omgivelsestemperaturen og andre ytre forutsetninger.

Når temperaturen stiger vil spenningene øke i takt med temperaturforskjellen i tverrsnittet. Dette vil føre til strekkrefter i midten, som holdes igjen av trykkrefter i ytterkant. Det vil derfor være en fordel å beholde forskalingen på lenger, for å unngå sjokk-nedkjøling av eksponerte flater for å skape enda større temperaturgradient.

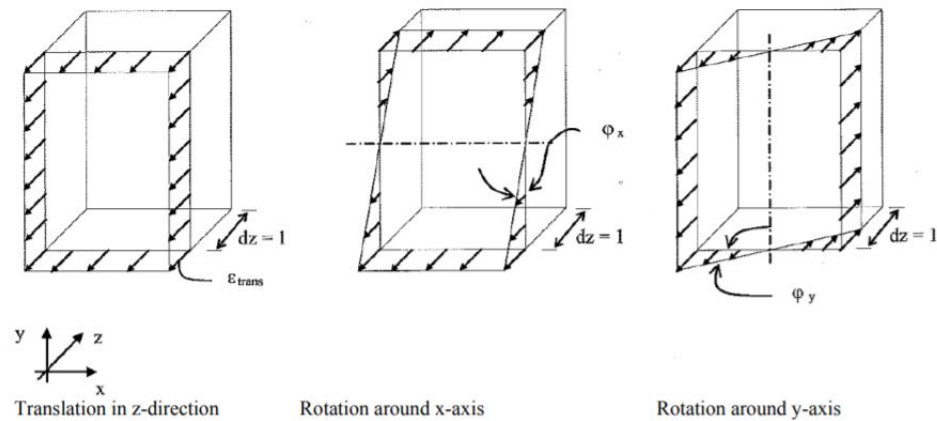
Fordelen med indre fastholdingsriss er at de har en tendens til å lukke seg når temperaturforskjellen utjevner seg. Det vil derfor ikke være veldig stor fare for at armering og betongen tar skade av ytre påkjenninger.

### 2.3.5.2 Ytre fastholding

Ytre fastholding er spenninger som oppstår når det støpes mot en fast konstruksjon. For eksempel at det støpes en vegg på et fundament som er ferdig herdet. Det vil derfor oppstå fastholdingsspenninger i nedre del av veggen. Fastholdingspenningene henger i sammen med temperaturutviklingen. Når betongen utvider seg grunnet varmetutvikling har ikke betongen utviklet noen fysiske egenskaper. Når da betongen har nådd maksimaltemperatur og varmetapet er større enn varmetilførselen vil betongen trekke seg sammen. Forskjellen er at betongen har utviklet fysiske egenskaper på dette tidspunktet, noe som gjør at stivheten og fastholdingen øker. Større e-modulus og fastholding fra konstruksjonen det støpes mot gjør at det vil oppstå langsgående stress i betongen. Størst spenning vil ofte ikke oppstå før det er gått 1-2 uker. Om spenningene som oppstår er større enn oppnådd strekkfasthet, vil dette kunne føre til vertikale gjennomgående riss. Det er vanlig at dette skjer i nærheten av støpeskjøten, der hvor kombinasjonen av temperaturgradient, fastholding og andre svinn spiller størst rolle.

Betongens fastholdingsgrad avhenger av punktene på listen under.

- L/H-forholdet - Økt Lengde/Høyde-forhold gir høyere fastholdingsgrad over et større område
- Betongens e-modulus og tverrsnittsareal (Største bidragsyter)
- Slipp ved enden av støpeskjøten
- Stivheten og fleksibiliteten i grunnen.



FIGUR 2.5: Illustrasjon over rotasjon om x- og y-aksen og translasjon om z-aksen

Fastholdingsgraden er også avhengig av mulighetene betongtverrsnittet har for rotasjon om x- og y-aksen, i tillegg til translasjon om z-aksen, se figur 2.5

Utregningene av å faktisk fastholding er komplisert og krever FEM-analyse.

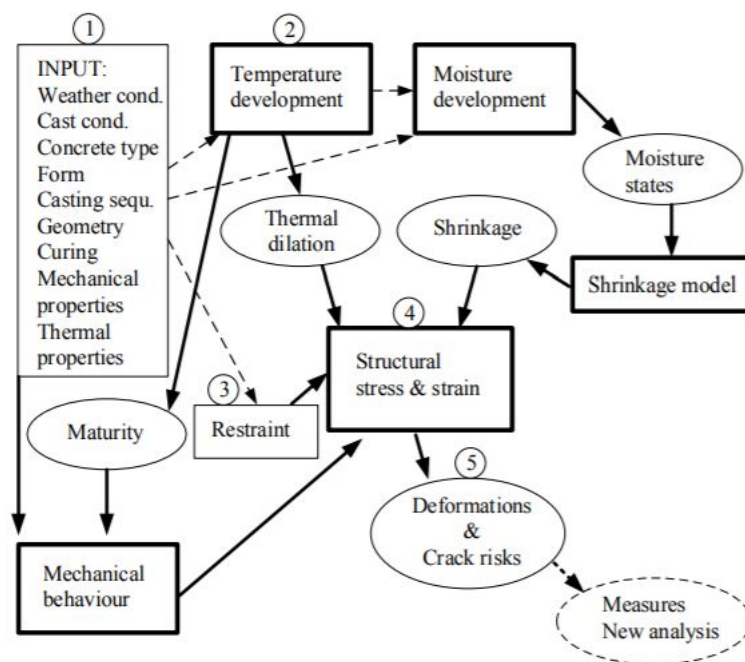
Størrelsen på betongtverrsnittet er avgjørende for fastholdingsgraden. Et veldig lite tverrsnitt på et stivt fundament vil kunne ha en fastholdingsgrad opp mot 100%. I realiteten er fastholdingsgraden oftest et sted mellom 0-100%. Der 0% vil si at betongen står fritt til å deformere, og 100% vil si at tverrsnittet er hindret å deformere.

### 2.3.5.3 Betongspenninger

Som omtalt tidligere er opptredende spenninger avhengig av volumendringer, fastholdingsgraden, stivheten (E-modulus) og kryp. Det å beregne dette nøyaktig krever FEM-analyse. Av volumendringer er det i hovedsak temperatur utvidelse og autogent svinn som er de største pådriverene i tidligfase, men uttørkingssvinn kan også i noen tilfeller være en pådriver.

### 2.3.5.4 Rissindeks

Rissindeks er forholdet mellom opptredene strekkspenninger og oppnådd strekkfasthet ved et gitt tidspunkt. Rissindeks følger formel 2.18.



FIGUR 2.6: Korrekt fremgangsmåte for rissberegning

$$C_i(t) = \frac{\sigma(t)}{f_t(t)} \quad (2.18)$$

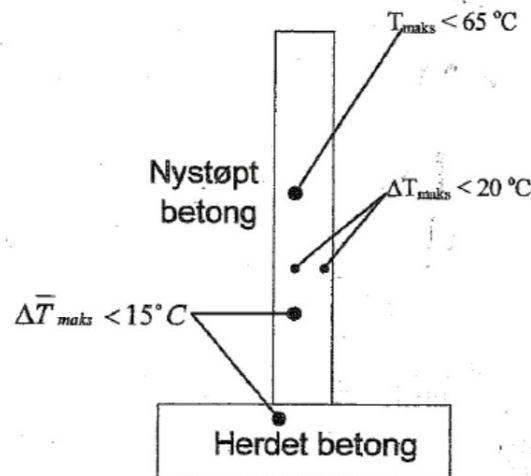
Rissindeks på 1 eller mer vil si at riss i betongen vil forekomme. Statens Vegvesen på sin side har satt en grense på 0.75 for å ta hensyn til kompleksiteten i utregningene. Rissindeksen er ofte størst i løpet av betongens nedkjølingsfase.

## 2.4 Herdetiltak

Herdetiltak er tiltak som gjøres for å unngå at

- Herdetemperatur overstiger 65 °C
- Temperaturgradient i tverrsnittet > 20 °C
- Temperaturgradient > 15 °C mot eksisterende støpeavsnitt





FIGUR 2.7: Krav til temperaturer iht. prosesskode 2 [2]

### 2.4.1 Senke fersk betongtemperatur

Ved å senke temperaturen på fersk betongen fra 20°C til 15 °C forsinkes hydratiseringsprosessen. Det vil si at hydratasjonshastigheten går tregere for en betong med temperatur under 20°C enn for en med temperatur over 20°C. Dette fører til at betongen utvikler varme saktere i starten, noe som vil forskyve og redusere maksimal oppnådd temperatur.

Dette tiltaket vil være mest effektivt ved slanke tverrsnitt, samt når omgivelsestemperaturene er lave. På sommerhalvåret vil dette tiltaket gi liten effekt grunnet hurtig oppvarming fra omgivelsene og varmere ingredienser.

Det vil så klart være mulig å kjøle ned betongen ved bruk av isbiter på sommerhalvåret, men det krever mye ressurser i tidligfase for å beregne vann/is-forholdet, samt effekten av tiltaket.

Lavere maksimal temperatur vil føre til at rissindeksen synker, grunnet mindre temperaturgradient som gir mindre spenninger i tverrsnittet.

### 2.4.2 Lavvarmebetong

Lavvarmebetong er betong som er tilsatt mer flygeaske (FA). I dag er det mulig å få tak i sement med tilsatt FA. Norcem Standard FA og Norcem Anlegg FA inneholder begge rundt 16% FA. Ved å tilsette opp mot 15-25% ekstra FA vil dette være med på å forskyve og senke maksimal temperatur. Dette kommer av at vi erstatter en del av sementinnholdet i betongen. Normal klinker sement vil produsere varme hurtigere enn betonger med FA. Flygeaske på sin side vil reagere med produktet fra vann-sement

reaksjonen, og vil derfor ha en tregere reaksjon, som gjør at varmeutviklingen blir fordelt over tid. Dette gir lavere maksimal temperatur i tverrsnittet.

Lavvarmebetong vil gi lavere maksimal temperatur, noe som igjen vil gi mindre spenninger grunnet mindre utvidelse og mindre temperaturgradient. Dette tiltaket kan i noen tilfeller vær nok i seg selv, men vil være enda mer effektivt i kombinasjon med de andre tiltakene beskrevet.

### 2.4.3 Varmekabler

Varmekabler kan være aktuelt å montere i tilstøttende konstruksjon. Det vil si at om du skal støpe en vegg på et fundament, så vil det være aktuelt å montere og støpe inn varmekabler i fundament. Senteravstand og antall lag med varmekabler vil variere med størrelsen på tverrsnittet. Dette krever at varmekablene blir skrudd på 3-4 dager før støp, slik at fundamentet blir tilstrekkelig oppvarmet. Varmekablene står påskrudd i 1-2 dager etter støp, avhengig av når maksimal temperatur er oppnådd.

Når fundamentet blir tilført varme fra varmekablene vil fundamentet utvide seg. Når det da etter et par dager blir støpt på fundamentet vil temperaturdifferansen mellom vegg og fundament være mindre. Dette vil føre til at fastholdingen fra fundamentet blir mindre fordi fersk betong og herdet betong beveger seg i samme retning. Når betongen utvider seg grunnet hydrasjonsprosessen, altså grunnet temperaturøkning, gjør fundamentet det samme. Når betongen har nådd maksimal temperatur vil temperaturen synke og betongen vil trekke seg sammen. Det samme vil fundamentet gjøre når du skrur av varmekablene. Mindre fastholding fører til lavere rissindeks og kan i mange tilfeller være et av de beste tiltakene mot fastholdingsriss.

### 2.4.4 Kjølerør

Hensikten med kjølerør er å redusere temperaturøkningen i herdefasen. Det pumpes kaldt vann eller kjølevæske inn i rør som festes i armeringen. Senteravstand og antall lag med kjølerør vil avhenge av tykkelsen på veggen som skal støpes, omgivelsestemperaturen, samt graden av nedkjøling som ønskes. Ved å senke maksimal temperaturen i betongen, senkes graden av utvidelse i forhold til fundament og omgivelsene. Det må antas en del ekstra arbeid med tanke på at rørene skal monteres, testes før støp og tilslutt rengjøres og fylles med flytende mørtel.

## 2.5 CrackTest COIN

CrackTest COIN er et analyseprogram utviklet for å simulere herdende betong. Utgangspunktet til CrackTest COIN kommer fra Contest PRO som er produsert av Jan Erik Jonasson, og fornersket gjennom COIN-prosjektet i Norge. [9]

CrackTest COIN er et program som simulerer herdeteknologien i et betongtverrsnitt  $2\frac{1}{2}$  dimensjonalt. I utgangspunktet tegnes tverrsnittet i to dimensjoner, men fordi det finnes mulighet for å legge inn fastholding i planet, altså translasjon om z-aksen, sies det at programmet lar deg simulere  $2\frac{1}{2}$  dimensjonalt. Dette kommer i tillegg til at det er mulig å velge fastholding om x- og y-aksen. [9]

Brukeren av CrackTest COIN velger selv betingelsene for herdeforløpet, før programmet beregner temperaturforløpet og temperaturfordelingen i betongtverrsnittet. Betongens egenskapsutvikling beregnes ut i fra modenhetsprinsippet. Ved neste simulering er det mulig å simulere spenningene som oppstår i betongkonstruksjonen grunnet termisk dilatasjon og autogent svinn, samt spenningene som oppstår grunnet fastholding. [9]

Programmet i seg selv har ulike bruksområder, men er spesielt nyttig ved simulering for å unngå gjennomgående riss i betongen. Noen av bruksområdene er [9]:

- å simulere temperaturforløp, samt strekk- og trykkfastheten i den herdende betongen
- å simulere ulike værscenarier for å optimalisere herdetiltak
- å simulere effekten fastholding har på spenningsutviklingen
- å simulere rissindeksen basert på oppnådd strekkfasthet og spenninger i betongen

# Kapittel 3

## Metode

For at det skal være rimeligere og mindre tidkrevende å analysere hvert tverrsnitt som skal støpes har jeg laget et excelark. Dette excelarket skal simulere herdetemperaturen i betongen ved bruk av forskjellige herdetiltak, samt regne ut rissindeksen. Denne tilnærmingen vil aldri bli like nøyaktig som Cracktest COIN eller lignende simuleringsprogram, men vil være god nok i en tilbudsfase. For mest nøyaktig resultat settes regnearket opp til å simulere i 2D.

### 3.1 Inngangsparametere

For at simuleringarket skal ha den funksjonen det er tiltenkt er det viktig at det er mulig å endre på noen av inngangsparameterne.

Dette er parametere som:

- Betongtype
- Betongtemperatur
- Omgivelsestemperatur
- Forskalingstype og tykkelse
- Vegghøyde og tykkelse
- Varmekabelens effekt og varighet

### 3.1.1 Betongtype

Oppsettet i excelarket er lagt opp til bruk av to ulike betonger som er testet i COIN-prosjektet. Det er en resept med anlegg FA og en med anlegg FA + 16% FA (Lavvarmebetong). Disse betongene har ulik mengde flygeaske, noe som styrer herdetemperaturen.

De ulike betongene har ulike variabler, som spiller inn på simulert varmeutvikling. De ulike betongne vil i realiteten ha ulik densitet, ulik mengde flygeaske og ulik mengde sement. Dette excelarket vil bruke standard variabler utarbeidet i COIN-prosjektet. Det skal små tiltak til for å kunne legge til flere betongresepter i utregningen.

Betongtype	Anlegg FA
Betongensvarmekapasitet	1,01 $\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$
Densitet	2385 $\frac{kg}{m^3}$
Sement + silika	384 $\frac{kg}{m^3}$
$\tau$	16,75 $\frac{kJ}{kg}$
$\alpha$	1,02 $\frac{kJ}{kg}$
$Q_\infty$	278 $\frac{kJ}{kg}$
A	31,487
B	0,197

TABELL 3.1: Inngangsvariabler for anlegg FA

Betongtype	Anlegg FA + 16 % FA
Varmeledningsevne	1,01 $\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$
Densitet	2377 $\frac{kg}{m^3}$
Sement + silika	378 $\frac{kg}{m^3}$
$\tau$	33,57 $\frac{kJ}{kg}$
$\alpha$	0,75 $\frac{kJ}{kg}$
$Q_\infty$	250 $\frac{kJ}{kg}$
A	37,023
B	0

TABELL 3.2: Inngangsvariabler for anlegg FA + 16% FA [6]

## 3.2 Temperatur

### 3.2.1 Betongtemperatur

Temperaturen for fersk betong kan ha stor effekt på maksimal herdetemperatur. Det er derfor viktig at det er mulig å endre temperaturen, for å sjekke om det mulig å få rissindeksen innenfor toleransen .

### 3.2.2 Omgivelsestemperatur

Temperaturen rundt støpeforma er en av faktorene som bestemmer hvor mye varmetap som oppstår mellom betongen og omgivelsene. Ved prising av et tilbud kan normaltemperaturer i løpet av et år hentes på yr.no, samt gjennomsnittstemperaturen for de siste 13 månedene. Det kan derfor være lurt å justere inngangsparameteren for ulike måneder for å skape et bilde av hvilke tiltak som må til i både verste og beste fall for hvert tverrsnitt. Ved å bruke disse temperaturene vil du simulere rissindeks for det som er forventet, uten noen form for sikkerhet for at disse temperaturene faktisk forekommer.

For Stavanger kan disse inngangsvariablene brukes som omgivelsestemperatur.

Måned	Normal	Gjennomsnitt
Januar 2021	2,5	-0,1
Februar 2021	1,8	1
Mars 2021	3,6	4,8
April 2020	6,8	7,1
Mai 2020	10,3	8,8
Juni 2020	13	16,3
Juli 2020	15,4	13,4
August 2020	15,5	16,5
September 2020	12,7	12,7
Oktober 2020	8,7	10,1
November 2020	5,6	7,8
Desember 2020	3,2	5,6

TABELL 3.3: Normal- og gjennomsnittstemperatur for Stavanger [7]

### 3.3 Geometri

Størrelsen på tverrsnittet som skal støpes er avgjørende for herdetemperaturen. Jo bredere tverrsnittet er, jo mindre er varmetapet i midten. Dette fører til at temperaturen i senter av tverrsnittet blir større sammenlignet med temperaturen i en tynnere vegg. Temperaturgradienten mot omgivelsene og mot fundamentet blir derfor større.

Bredden vil være spesielt viktig å ta med seg som inngangsparameter. Dette fordi den er avgjørende for hvor mye varme som går tapt i tverrsnittet. Høyden som inngangsparameter spiller også en rolle i hvor stor temperaturutviklingen er, men ikke i samme grad som bredden. Høyden kan derimot spille en større rolle i størrelsen på fastholding mot herdet betongkonstruksjon.

### 3.4 Oppsett av simuleringverktøy

Det å simulere i to dimensjoner er ganske omfattende og det er mange celler som må linkes sammen. Det kan derfor være lurt å dele inn i forskjellige excelfiler, og ikke bare dele inn i ark/faner i en excelfil. Lages alt i en fil vil den bli meget stor, og det vil være problem med å åpne og kjøre den.

#### 3.4.1 Varmekabler i tilstøttende konstruksjon

Et av herdetiltakene som kan gjøres for å senke rissindeksen er å støpe inn varmekabler i fundamentet som starter 4 døgn (96t) før veggen skal støpes. Varmekabler til denne bruken har ofte en effekt på 40 W/m. Det bør derfor legges inn et ark som beregner temperaturutviklingen i fundamentet i 96 timer [10]. Simulering av temperaturutvikling kan forenkles og gjøres i en dimensjon.

##### 3.4.1.1 Varmeutvikling i fundament

Kablene monteres i senter av fundamentet med ønsket senteravstand. Det vil derfor kun være kilde til varmetilførsel i senterkvadranten. Effekt oppgis ofte i W/m, men i regnearket er det enheten kJ/hm som blir brukt.

$$1 \frac{W}{m} = 1 \frac{J}{ms} = 3,6 \frac{kJ}{mh} \quad (3.1)$$

Denne konstanten på  $3,6 \frac{kJ}{mh}$  multipliseres derfor med effekten, for å få riktig enhet.

Det vil si at en effekt på  $40\text{W/m} = 144\text{ kJ/mh}$

For å regne ut effekten i nederste kvadrant:

$$Effekt_{kvadrant} = \frac{Effekt}{Senteravstand} \cdot B_{vegg} \quad (3.2)$$

Det vil si at på denne forenklete måten vil senterkvadranten få fordelt effekten som varmekablene tilfører rett under veggen. Det legges til en if-funksjon. Slik at hvis effekten er null, blir det ikke tilført noe energi. Varmetilførselen er konstant i 96timer, det er derfor viktig å legge til varmeutviklingen tilført i forrige tidsintervall.

### 3.4.1.2 Varmetap i fundament

For å forenkle kalkulasjonen vil det som sagt simuleres en dimensjonalt. Varmetapet blir da beregnet fra senter i retning mot veggen som skal støpes. Det vil derfor ikke bli tatt hensyn til varmetap ut mot sidene, og heller ikke varmetap på utsiden av der veggen kommer.

Fundamenthøyden blir delt i 16 kvadranter i høyden. Noe som vil gi kvadranter på 6,25 cm høyde ved et 1m høyt fundament.

Transmisjonstallet i fundamentet vil da bli [5]

$$K_{fundament} = \frac{1}{\frac{Høyde_{kvadrant}}{\lambda_{herdetbetong}}} \quad (3.3)$$

Ved randen, altså ved betong/forskalingsoverflaten vil transmisjonstallet være [4]:

$$K_{Fundamentoverflate} = \frac{1}{Konveksjonsmotstand} \quad (3.4)$$

Varmetapet vil da bli utregnet etter følgende formel [11]

$$Q_{tap} = K_{fundament} \cdot (\theta_n - \theta_{n-1}) \cdot tidsintervall + Q_{tap(t-1)} \quad (3.5)$$

Hvor

$Q_{tap}$ : Totalt varmetap i kvadranten

$K_{fundament}$ : Transmisjonstallet til herdet betong



$\theta_n$ : Temperatur i kvadranten

$\theta_{n-1}$ : Temperatur i kvadranten over

Tidsintervall: Intervallet som tiden er inndelt i

$Q_{tap(t-1)}$ : Totalt varmetap i forrige tidsintervall

For varmetap mot omgivelsene er det omgivelsestemperaturen og vindstyrke som er avgjørende

$$Q_{tap,luft} = K_{fundamentoverflate} \cdot (\theta_n - \theta_{luft}) \cdot tidsintervall + Q_{tap(t-1)} \quad (3.6)$$

Hvor

$Q_{tap,luft}$ : Totalt varmetap i kvadranten

$K_{fundamentoverflate}$ : Transmisjonstallet til luft

$\theta_n$ : Temperatur i kvadranten

$\theta_{luft}$ : Omgivelsestemperaturen

Tidsintervall: Intervallet som tiden er inndelt i

$Q_{tap(t-1)}$ : Totalt varmetap i forrige tidsintervall

### 3.4.1.3 Temperaturutvikling i fundament

Formelen for temperaturutvikling vil være ulik for senter av tverrsnittet og resten. Dette vil være fordi vi bare simulerer/beregner i en retning og at det derfor ikke vil bli tilført noe varme fra nabokvadrantene i senter.

Temperaturutviklingen i senter følger følgende formel [11]:

$$\theta_{fundament} = \theta_{luft} + \frac{Q_{utv,varmekabler} - Q_{tap,fundament}}{C_P \cdot \rho \cdot H\text{øyde}_{kvadrant}} \quad (3.7)$$

Hvor

$\theta_{fundament}$ : Fundamentets temperatur ved tid t

$\theta_{luft}$ : Fundamentestemperatur ved t=0

$Q_{utv,varmekabler}$ : Total varmeutvikling ved tid t

$Q_{tap,fundament}$ : Totalt varmetap ved tid t

$C_P$ : Betongens varmekapasitet

$\rho$ : Betongens densitet

$Høyde_{kvadrant}$ : Kvadrantinndeling

Temperaturutvikling i resten av kvadrantene følger følgende formel [11]

$$\theta_{fundament} = \theta_{luft} + \frac{Q_{utv,varmekabler} - Q_{tap,fundament} + Q_{tap,fundament(n-1)}}{C_P \cdot \rho \cdot Høyde_{kvadrant}} \quad (3.8)$$

Hvor

$\theta_{fundament}$ : Fundamentets temperatur ved tid t

$\theta_{luft}$ : Fundamentets temperatur ved t=0

$Q_{utv,varmekabler}$ : Total varmeutvikling ved tid t

$Q_{tap,fundament}$ : Totalt varmetap ved tid t

$Q_{tap,fundament(n-1)}$ : Totalt varmetap tilført fra nabokvadrant ved tid t

$C_P$ : Betongens varmekapasitet

$\rho$ : Betongens densitet

$Høyde_{kvadrant}$ : Kvadrantinndeling

Det vil i dette regnearket bli brukt samme varmekonduktivitet og densitet for både fersk og herdet betong.

Temperaturen som blir brukt i videre beregninger i regnearket er minimumssnittstemperaturen som er oppnådd etter fire døgn i fundamentet. Det er denne temperaturen veggstøpen kommer i kontakt med. Om effekten settes til null vil fundamentet ha samme temperatur som omgivelsene, selv om det ikke alltid er tilfellet. Som en forenkling brukes fundamentets temperatur i hele forløpet. Dette selv om varmetapet vil føre til at temperaturen i fundamentet kommer i likevekt med omgivelsestemperaturen.

<b>Varmeutvikling</b>											
Tid/høyde	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Senter	16,2	32,4	48,6	64,8	81	97,2	113,4	129,6	145,8	162	

<b>Varmetap</b>											
Tid/høyde	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	
0	0	0	0	0	0	6E-05	0,00037	0,001311	0,003488	0,007755	
0,05	0	0	0	0	0,001513	0,007887	0,024074	0,056191	0,111046	0,195725	
0,1	0	0	0	0,015389	0,067867	0,180386	0,374495	0,669098	1,080026	1,620044	
0,15	0	0	0,156545	0,564624	1,278851	2,327506	3,721843	5,462278	7,542475	9,952057	
Senter	0	1,592489	4,464378	8,379521	13,15754	18,65888	24,77421	31,4168	38,51701	46,01826	

<b>Temperaturutvikling</b>											
Tid/høyde	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	
0	2	2	2	2	2	2,000013	2,000065	2,000197	2,000457	2,000896	
0,05	2	2	2	2	2,000128	2,000553	2,001437	2,002919	2,005106	2,008072	
0,1	2	2	2	2,001304	2,004575	2,010088	2,017887	2,027886	2,03993	2,053836	
0,15	2	2	2,013266	2,035887	2,065103	2,098957	2,136051	2,17538	2,216218	2,258038	
Senter	2	2,134957	2,256647	2,367679	2,47002	2,565173	2,654299	2,738311	2,817931	2,893738	

FIGUR 3.1: Eksempel utregning for varmekabler i fundament

### 3.4.2 Aktiveringsenergi

Den kjemiske reaksjonen i betongen er eksoterm, og avhengig av temperaturen i betongen. Aktiveringsenergien vil derfor være avhengig av temperaturutviklingen i betongen. [4]

I Freiesleben-Hansen og Pedersens- modell er aktiveringsenergien gitt som:

For  $\theta \leq 20^\circ C$

$$E = A + B \cdot (20 - \theta) \quad (3.9)$$

For  $\theta > 20^\circ C$

$$E = A \quad (3.10)$$

Der A og B er avhengig av betongresepten. Verdiene for ANL Fa og ANL FA + 16 % FA er oppgitt i tabell 3.1 og 3.2. Temperaturen  $\theta$  er tatt ut fra simuleringen i forrige tidsintervall, altså  $\theta_{t-1}$

### 3.4.3 Betongens modenhet

Betongens modenhet er avhengig av aktiveringsenergien over, samt temperaturen i betongen.

Modenheten tar for seg graden av hydratasjon ved temperaturen i forrige tidsintervall.

$$H(\theta) = e^{\frac{E(\theta)}{R} \cdot \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{273 + \theta_{t-1}} \right)} \quad (3.11)$$

Der R er gasskonstanten lik  $0,008314 \frac{kJ}{mol \cdot K}$

For å simulere modenhet i betongen må det multipliseres med tidintervallet, samt legges til modenheten ved forrige tidsintervall [4]

$$M = \sum_{i=1}^{i=n} H(\theta_i) \cdot \Delta t_i \quad (3.12)$$

### 3.4.4 Varmeutvikling

Betongen sin varmeutvikling er avhengig av både betongen sin modenhet og dens fysiske egenskaper.

$$Q(M) = Q_{\infty} \cdot e^{-(\frac{\tau e}{M})^{\alpha}} \cdot Q_{\infty} \cdot C \quad (3.13)$$

Hvor

M: Betongens modenhet

$\tau$ : oppgitt i tabell 3.1 og 3.2

$\alpha$ : oppgitt i tabell 3.1 og 3.2

C: oppgitt i tabell 3.1 og 3.2

$Q_{\infty}$ : oppgitt i tabell 3.1 og 3.2

Denne formelen bruker kalkulert modenhet for å regne ut varmeutviklingen.

Tid	21									
Senter	0,196875	0,16875	0,140625	0,1125	0,084375	0,05625	0,028125	Forskaling		
2,416667	1623,179541	1615,806	1600,935	1578,314	1547,553	1508,107	1459,261	1400,111	1329,546	
2,333333	1623,179541	1615,806	1600,935	1578,314	1547,553	1508,107	1459,261	1400,111	1329,546	
2,25	1623,179541	1615,806	1600,935	1578,314	1547,553	1508,107	1459,261	1400,111	1329,546	
2,166667	1623,179541	1615,806	1600,935	1578,314	1547,553	1508,107	1459,261	1400,111	1329,546	
2,083333	1623,179541	1615,806	1600,935	1578,314	1547,553	1508,107	1459,261	1400,111	1329,546	
2	1623,179538	1615,806	1600,935	1578,314	1547,553	1508,107	1459,261	1400,111	1329,546	
1,916667	1623,179533	1615,806	1600,935	1578,314	1547,553	1508,107	1459,261	1400,111	1329,546	
1,833333	1623,179515	1615,806	1600,935	1578,314	1547,553	1508,107	1459,261	1400,111	1329,546	
1,75	1623,179456	1615,806	1600,934	1578,314	1547,553	1508,107	1459,261	1400,111	1329,546	
1,666667	1623,179273	1615,805	1600,934	1578,314	1547,553	1508,107	1459,261	1400,111	1329,546	
1,583333	1623,178727	1615,805	1600,934	1578,313	1547,552	1508,106	1459,26	1400,11	1329,546	
1,5	1623,177158	1615,803	1600,932	1578,312	1547,551	1508,105	1459,259	1400,109	1329,545	
1,416667	1623,172816	1615,799	1600,928	1578,307	1547,546	1508,101	1459,255	1400,105	1329,541	
1,333333	1623,161257	1615,788	1600,917	1578,296	1547,536	1508,09	1459,245	1400,096	1329,532	
1,25	1623,131694	1615,758	1600,887	1578,268	1547,508	1508,063	1459,219	1400,071	1329,509	
1,166667	1623,059082	1615,686	1600,816	1578,197	1547,439	1507,997	1459,155	1400,011	1329,452	
1,083333	1622,887948	1615,516	1600,648	1578,032	1547,277	1507,84	1459,005	1399,868	1329,318	
1	1622,501119	1615,131	1600,267	1577,658	1546,912	1507,486	1458,664	1399,544	1329,015	
0,916667	1621,663594	1614,298	1599,443	1576,847	1546,12	1506,718	1457,927	1398,843	1328,357	
0,833333	1619,926206	1612,57	1597,793	1575,166	1544,477	1505,125	1456,896	1397,388	1326,991	
0,75	1616,475598	1609,137	1594,337	1571,826	1541,214	1501,961	1453,354	1394,494	1324,274	
0,666667	1609,913022	1602,609	1587,878	1565,473	1535,006	1495,34	1447,565	1388,986	1319,098	
0,583333	1597,952215	1590,711	1576,107	1553,895	1523,692	1484,965	1437,011	1378,94	1309,65	
0,5	1577,025557	1569,895	1555,515	1533,644	1503,905	1465,773	1418,553	1361,362	1293,105	
0,416667	1541,773551	1534,833	1520,838	1499,551	1470,604	1433,48	1387,496	1331,777	1265,223	
0,333333	1484,345868	1477,727	1464,378	1444,067	1416,432	1380,966	1336,991	1283,628	1219,683	
0,25	1393,302179	1387,206	1374,902	1356,157	1330,611	1297,745	1256,832	1206,918	1146,941	
0,166667	1250,666688	1245,34	1234,572	1218,132	1195,662	1166,671	1130,524	1086,429	1033,445	
0,083333	1025,637824	1021,615	1013,48	1001,054	984,0549	962,0884	934,6287	901,0018	860,3737	
Fundame	683,9995234	682,1457	678,3941	672,6525	664,772	654,5307	641,6087	625,5456	605,675	

FIGUR 3.2: Illustrasjon av varmetvikling simulert i excel

### 3.4.5 Varmetap

I simuleringens ark vil det kun bli tatt hensyn til konveksjon og varmeledning. Stråling vil ikke være særlig fremtredende i vegg.

### 3.4.6 Varmetap - Konveksjon og varmeledning

I denne simuleringen er det varmetapet som skjer fra senter av betongen ut mot betongoverflaten/forskalingen som er i fokus.

For å kunne regne varmetap må man vite varmeledningsevne ( $\frac{kJ}{mh^{\circ}C}$ ) i de ulike materialene. Dette vil naturligvis være forskjellig fra materiale til materiale, men i denne simuleringen vil det bli brukt generelle verdier.

Material	Varmeledningsevne
Stål	209
Fersk betong	8,4
Herdet betong	5,9
Lett betong	2,9
Fuktig treverk	0,67
Isolasjonsmateriale	0,15

TABELL 3.4: Varmeledningsevne for noen materialer [5]

Varmeledningsevnen til materialene listet opp i tabell 3.4 er avhenging av tykkelsen på materialet. Når det simuleres i regnearket vil det være naturlig å dele betongtverrsnittet opp i flere kvadranter/tykkelser, slik at simuleringene blir mer nøyaktig.

### 3.4.6.1 Transmisjonstall

Varmetapet i betongen er avhengig av materialets evne til å lede varme, samt konveksjonen til omgivelsene. Det vil si graden av konveksjon vil være større med økende vindstyrke. I simuleringsarket vil det være mulig å velge fem vindstyrker. Varmekonveksjonsmotstand for tilhørende vindstyrker er oppgitt i tabell 3.5.

Vindstyrke (m/s)	Varmekonveksjonsmotstand
0	0,05
2	0,021
5	0,011
10	0,006
20	0,0004

TABELL 3.5: Varmekonveksjonsmotstand for ulike vindstyrker (faststoff til luft) [5]

Materialets varmeledning avhenger av varmeledningensmotstanden ( $\lambda$ ) og materialets tykkelse ( $d$ ).

$$m = \frac{d}{\lambda} \quad (3.14)$$

Det vil i teorien si at tykkere materiale har større varmeledningensmotstand. I simuleringsarket vil støpeavsnittet deles inn i mindre kvadranter for å simulere temperaturen ved ulike punkter i tverrsnittet. Varmeledningsevnen til betong vil avhenge om den er i fersk eller herdet fase. Betongen vil i tillegg ha ulik varmeledningsevne ettersom ulike betongresepter gir ulik mengde tilslag, sement, tilsetningstoffer etc. I simuleringsarket vil det bli lagt inn to standard varmeledningsevner, se tabell 3.6

Material	Varmledningsevne
Fersk betong	8,4
Herdet betong	5,9

TABELL 3.6: Varmeledningsevne for betong [5]

Der varmeledningsevne for selve støpeavsnittet vil bruke varmeledningsevne til fersk betong, og fundamentet/bunnplaten det støpes mot vil benytte seg av varmeledningsevnen til herdet betong.

Varmeledning mellom støpeavsnitt og omgivelsene vil ofte være beskyttet av forskaling de første 3-7 dagene. Det vil derfor være naturlig å simulere med forskaling. Forskaling vil fungere som et isolerende lag, som hindrer fri konveksjon fra betongoverflaten. I

simuleringarket vil det være mulig å velge antall dager med forskaling, samt tykkelsen på forskalingsfinèren som blir brukt. Dette arket gir muligheten til å velge forskalingsfinèr med tykkelse 15 og 22mm, se tabell 3.5 for varmeledningsmotstanden.[5]

Material	Varmledningsmotstand
Finèr 15mm	0,022
Finèr 22mm	0,033

TABELL 3.7: Varmeledningsmotstand for 15mm og 22mm forskalingsfinèr [5]

Det vil ikke bli simulert varmetap forårsaket av fordamping og stråling, fordi det er veggstøp som simuleres og at de største overflatene derfor er tildekket.

Transmisjonstallet for en gitt konstruksjon er som følger

$$K = \frac{1}{m} = \frac{1}{m_f + m_k} \quad (3.15)$$

Det vil si at transmisjonstallet for støpeavsnittet vil avhenge av om betongen er fersk eller herdet, samt hvor stor inndelingen av kvadrantene er.

For en 1m bred og 6m høy vegg vil bredden bli delt i 16 deler og høyden inn i 60 deler. Det vertikale transmisjonstallet for fersk betong vil derfor være

$$K_{\text{vertikal}} = \frac{1}{\frac{0,05}{8,4}} = 168 \quad (3.16)$$

Transmisjonen horisontalt vil være mindre fordi lengden av kvadranten i denne retningen er større.

$$K_{\text{horisontalt}} = \frac{1}{\frac{0,1}{8,4}} = 84 \quad (3.17)$$

Det vil si at varmemotstanden blir større ved økende tykkelse, noe som gjenspeiles ved at transmisjonen horisontalt er større enn vertikalt.

For transmisjon gjennom forskaling må det i tillegg legges til konvektivt motstandstall ( $m_k$ ) for å ta hensyn til graden av konveksjon på utsiden av forskalingen. [5]

For 15mm forskalingsfinèr med 2 m/s i vindstyrke vil transmisjonstallet bli:

$$K_{15\text{mmforskaling}} = \frac{1}{0,022 + 0,021} = 23,3 \quad (3.18)$$

Ved økning i vindstyrken vil  $m_k$  synke og transmisjonen av varme gjennom forskalingen vil øke.

### 3.4.6.2 Kalkulasjon av varmetap

Varmetapet i hver kvadrant er avhengig av transmisjontallet, temperaturen i kvadranten, temperaturen i nabokvadranten og tidsintervallet. Varmetapet kalkulert i forrige intervall må i tillegg legges til.

Varmetap i kvadrantene med fersk betong regnes ut med formelen under:

$$Q_{tap} = K \cdot (\theta_i + \theta_{i+1}) \cdot tidsintervall + Q_{tap,t-1} \quad (3.19)$$

Ved simulering av varmetap gjennom forskaling byttes  $\theta_{i-1}$  ut med  $\theta_{luft}$ , slik at formelen blir seende slik ut:

$$Q_{tap} = K \cdot (\theta_i + \theta_{Luft}) \cdot tidsintervall + Q_{tap-1} \quad (3.20)$$

Det samme må gjøres for varmetap mot fundamentet. Temperaturen i fundamentet blir antatt å være samme som lufttemperaturen, så sant det ikke er varmekabler i fundamentet.

$$Q_{tap} = K \cdot (\theta_i + \theta_{Fundament}) \cdot tidsintervall + Q_{tap,t-1} \quad (3.21)$$

Det vil si at varmetapet vil være størst ved randen av tverrsnittet, og jobbe seg inn mot kjernen etter en stund.

### 3.4.6.3 Varmetap i to dimensjoner

Ved varmetap i to dimensjoner med to ulike transmisjonstall vil det være lettest å dele inn i to faner. En fane for vertikalt varmetap, altså tap mot forskalingen/overflaten og en fane for horisontalt varmetap mot fundamentet.

Hvis vi kaller senter av tverrsnittet for  $Q_{i,j}$ , vil resten av kvadrantene få navn som  $Q_{i+n,j+n}$ . Lignende vil temperaturene i tverrsnittet bli omtalt.



Tid	n-1				
	Senter høyde	0,3	0,2	0,1	Forskaling
Senter bredde	$Q_{i,j}$	$Q_{i+1,j}$	$Q_{i+2,j}$	$Q_{i+3,j}$	$Q_{i+4,j}$
0,9	$Q_{i,j+1}$	$Q_{i+1,j+1}$	$Q_{i+2,j+1}$	$Q_{i+3,j+1}$	$Q_{i+4,j+1}$
0,8	$Q_{i,j+2}$	$Q_{i+1,j+2}$	$Q_{i+2,j+2}$	$Q_{i+3,j+2}$	$Q_{i+4,j+2}$
0,7	$Q_{i,j+3}$	$Q_{i+1,j+3}$	$Q_{i+2,j+3}$	$Q_{i+3,j+3}$	$Q_{i+4,j+3}$
0,6	$Q_{i,j+4}$	$Q_{i+1,j+4}$	$Q_{i+2,j+4}$	$Q_{i+3,j+4}$	$Q_{i+4,j+4}$
0,5	$Q_{i,j+5}$	$Q_{i+1,j+5}$	$Q_{i+2,j+5}$	$Q_{i+3,j+5}$	$Q_{i+4,j+5}$
0,4	$Q_{i,j+6}$	$Q_{i+1,j+6}$	$Q_{i+2,j+6}$	$Q_{i+3,j+6}$	$Q_{i+4,j+6}$
0,3	$Q_{i,j+7}$	$Q_{i+1,j+7}$	$Q_{i+2,j+7}$	$Q_{i+3,j+7}$	$Q_{i+4,j+7}$
0,2	$Q_{i,j+8}$	$Q_{i+1,j+8}$	$Q_{i+2,j+8}$	$Q_{i+3,j+8}$	$Q_{i+4,j+8}$
0,1	$Q_{i,j+9}$	$Q_{i+1,j+9}$	$Q_{i+2,j+9}$	$Q_{i+3,j+9}$	$Q_{i+4,j+9}$
Fundament	$Q_{i,j+10}$	$Q_{i+1,j+10}$	$Q_{i+2,j+10}$	$Q_{i+3,j+10}$	$Q_{i+4,j+10}$

Tid	n				
	Senter høyde	0,3	0,2	0,1	Forskaling
Senter bredde	$Q_{i,j}$	$Q_{i+1,j}$	$Q_{i+2,j}$	$Q_{i+3,j}$	$Q_{i+4,j}$
0,9	$Q_{i,j+1}$	$Q_{i+1,j+1}$	$Q_{i+2,j+1}$	$Q_{i+3,j+1}$	$Q_{i+4,j+1}$
0,8	$Q_{i,j+2}$	$Q_{i+1,j+2}$	$Q_{i+2,j+2}$	$Q_{i+3,j+2}$	$Q_{i+4,j+2}$
0,7	$Q_{i,j+3}$	$Q_{i+1,j+3}$	$Q_{i+2,j+3}$	$Q_{i+3,j+3}$	$Q_{i+4,j+3}$
0,6	$Q_{i,j+4}$	$Q_{i+1,j+4}$	$Q_{i+2,j+4}$	$Q_{i+3,j+4}$	$Q_{i+4,j+4}$
0,5	$Q_{i,j+5}$	$Q_{i+1,j+5}$	$Q_{i+2,j+5}$	$Q_{i+3,j+5}$	$Q_{i+4,j+5}$
0,4	$Q_{i,j+6}$	$Q_{i+1,j+6}$	$Q_{i+2,j+6}$	$Q_{i+3,j+6}$	$Q_{i+4,j+6}$
0,3	$Q_{i,j+7}$	$Q_{i+1,j+7}$	$Q_{i+2,j+7}$	$Q_{i+3,j+7}$	$Q_{i+4,j+7}$
0,2	$Q_{i,j+8}$	$Q_{i+1,j+8}$	$Q_{i+2,j+8}$	$Q_{i+3,j+8}$	$Q_{i+4,j+8}$
0,1	$Q_{i,j+9}$	$Q_{i+1,j+9}$	$Q_{i+2,j+9}$	$Q_{i+3,j+9}$	$Q_{i+4,j+9}$
Fundament	$Q_{i,j+10}$	$Q_{i+1,j+10}$	$Q_{i+2,j+10}$	$Q_{i+3,j+10}$	$Q_{i+4,j+10}$

FIGUR 3.3: Forslag til enkel inndeling av kvadranter

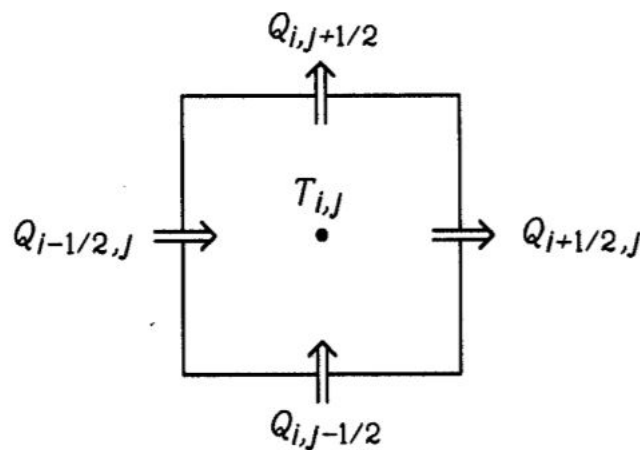
Vertikalt varmetap:

$$Q_{\text{Vertikaltap}} = K_{\text{vertikalt}} \cdot (\theta_{i,j} - \theta_{i+1,j}) \cdot \text{tidsintervall} + Q_{i,j,-1} \quad (3.22)$$

Horisontalt varmetap:

$$Q_{\text{Horisontaltap}} = K_{\text{vertikalt}} \cdot (\theta_{i,j} - \theta_{i,j+1}) \cdot \text{tidsintervall} + Q_{i,j,-1} \quad (3.23)$$

Det vil da være vertikalt varmetap som inkluderer varmetapet mot luft, og horisontalt varmetap som tar hensyn til varmetap mot fundamentet.



FIGUR 3.4: Varmetap i en kvadrant

### 3.4.7 Temperaturutvikling

Temperaturutviklingen i en dimensjon er forholdsvis mindre komplisert å sette opp enn i to dimensjoner. I to dimensjoner må man tenke på at varmetapet i nabokvadrantene tilfører varme til omliggende kvadranter i mer enn en retning. [5]

Tid	21								
	Senter	0,197	0,169	0,141	0,113	0,084	0,056	0,028	Forskaling
Senter	31,583	31,371	30,945	30,305	29,449	28,374	27,077	25,555	23,805
2,42	31,583	31,371	30,945	30,305	29,449	28,374	27,077	25,555	23,805
2,33	31,583	31,371	30,945	30,305	29,449	28,374	27,077	25,555	23,805
2,25	31,583	31,371	30,945	30,305	29,449	28,374	27,077	25,555	23,805
2,17	31,583	31,371	30,945	30,305	29,449	28,374	27,077	25,555	23,805
2,08	31,583	31,371	30,945	30,305	29,449	28,374	27,077	25,555	23,805
2,00	31,583	31,371	30,945	30,305	29,449	28,374	27,077	25,555	23,805
1,92	31,583	31,371	30,945	30,305	29,449	28,374	27,077	25,555	23,805
1,83	31,583	31,371	30,945	30,305	29,449	28,374	27,077	25,555	23,805
1,75	31,583	31,371	30,945	30,305	29,449	28,374	27,077	25,555	23,805
1,67	31,583	31,371	30,945	30,305	29,449	28,374	27,077	25,555	23,805
1,58	31,583	31,370	30,945	30,305	29,449	28,374	27,077	25,555	23,805
1,50	31,583	31,370	30,945	30,305	29,449	28,373	27,076	25,555	23,805
1,42	31,582	31,369	30,944	30,304	29,448	28,373	27,076	25,554	23,804
1,33	31,580	31,368	30,942	30,302	29,446	28,371	27,074	25,553	23,803
1,25	31,576	31,363	30,938	30,298	29,442	28,367	27,071	25,549	23,800
1,17	31,566	31,354	30,929	30,289	29,433	28,359	27,063	25,542	23,793
1,08	31,546	31,334	30,909	30,270	29,415	28,341	27,046	25,526	23,778
1,00	31,504	31,293	30,868	30,230	29,376	28,304	27,011	25,493	23,748
0,92	31,424	31,213	30,790	30,154	29,302	28,233	26,944	25,430	23,690
0,83	31,277	31,067	30,646	30,013	29,166	28,103	26,820	25,314	23,582
0,75	31,018	30,810	30,393	29,766	28,928	27,874	26,603	25,110	23,394
0,67	30,587	30,382	29,972	29,355	28,529	27,492	26,240	24,771	23,080
0,58	29,901	29,702	29,302	28,701	27,896	26,885	25,664	24,230	22,580
0,50	28,861	28,670	28,286	27,708	26,935	25,963	24,789	23,410	21,822
0,42	27,350	27,170	26,809	26,266	25,539	24,624	23,518	22,218	20,720
0,33	25,239	25,075	24,746	24,250	23,587	22,751	21,741	20,551	19,179
0,25	22,383	22,240	21,954	21,523	20,945	20,217	19,334	18,294	17,091
0,17	18,617	18,503	18,273	17,926	17,460	16,872	16,158	15,314	14,334
0,08	13,751	13,671	13,513	13,272	12,949	12,541	12,043	11,451	10,760
Fundament	7,575	7,539	7,467	7,358	7,211	7,025	6,796	6,521	6,196

FIGUR 3.5: Illustrasjon over temperatur simulert i excel

Temperaturutviklingen bruker varmeutviklingen til betongen i samme intervall og varmetapet i forrige intervall. På denne måten vil det ikke være noen sirkelreferanser som gjør at iterasjonsfunksjonen i excel behøver å være på.

#### 3.4.7.1 Temperaturutvikling i senter

Senter i tverrsnittet vil være det punktet som alltid har høyest temperatur og som har minst varmetap fordi det er isolert av flere betongkvadranter.

$$\theta = \theta_{Fersk\beta etong} + \frac{Q_{utv} - Q_{tap,vertiktalt}}{Q_{\infty} \cdot \rho \cdot kvadrantbredde} + \frac{-Q_{tap,horisontalt}}{Q_{\infty} \cdot \rho \cdot kvadrant\hoyde} \quad (3.24)$$

Hvor

$\theta_{fersk\beta etong}$ : Temperaturen til fersk betong

$Q_{utv}$ : Betongens egen eksoterme varmeutvikling

$Q_{tap}$ : Varmetap i henholdsvis horisontal eller vertikal retning

$Q_{\infty}$ : Betongens varmekonduktivitet

$\rho$ : Betonges densitet

Tid	n	Senter høyde				
		0,3	0,2	0,1	Forskaling	
Senter bredde		$Q_{i,j}$	$Q_{i+1,j}$	$Q_{i+2,j}$	$Q_{i+3,j}$	$Q_{i+4,j}$
0,9		$Q_{i,j+1}$	$Q_{i+1,j+1}$	$Q_{i+2,j+1}$	$Q_{i+3,j+1}$	$Q_{i+4,j+1}$
0,8		$Q_{i,j+2}$	$Q_{i+1,j+2}$	$Q_{i+2,j+2}$	$Q_{i+3,j+2}$	$Q_{i+4,j+2}$
0,7		$Q_{i,j+3}$	$Q_{i+1,j+3}$	$Q_{i+2,j+3}$	$Q_{i+3,j+3}$	$Q_{i+4,j+3}$
0,6		$Q_{i,j+4}$	$Q_{i+1,j+4}$	$Q_{i+2,j+4}$	$Q_{i+3,j+4}$	$Q_{i+4,j+4}$
0,5		$Q_{i,j+5}$	$Q_{i+1,j+5}$	$Q_{i+2,j+5}$	$Q_{i+3,j+5}$	$Q_{i+4,j+5}$
0,4		$Q_{i,j+6}$	$Q_{i+1,j+6}$	$Q_{i+2,j+6}$	$Q_{i+3,j+6}$	$Q_{i+4,j+6}$
0,3		$Q_{i,j+7}$	$Q_{i+1,j+7}$	$Q_{i+2,j+7}$	$Q_{i+3,j+7}$	$Q_{i+4,j+7}$
0,2		$Q_{i,j+8}$	$Q_{i+1,j+8}$	$Q_{i+2,j+8}$	$Q_{i+3,j+8}$	$Q_{i+4,j+8}$
0,1		$Q_{i,j+9}$	$Q_{i+1,j+9}$	$Q_{i+2,j+9}$	$Q_{i+3,j+9}$	$Q_{i+4,j+9}$
Fundament		$Q_{i,j+10}$	$Q_{i+1,j+10}$	$Q_{i+2,j+10}$	$Q_{i+3,j+10}$	$Q_{i+4,j+10}$

FIGUR 3.6: Illustrasjon over hvilke kvadranter som regnes ved bruk av formel 3.24

### 3.4.7.2 Temperaturutvikling i senter av vegghøyde/bredde mot forskaling og fundament

Varmeutviklingen senter av vegghøyde mot forskaling følger følgende formel:

$$\theta = \theta_{Ferskbetong} + \frac{Q_{utv} - Q_{tap,vertikalt}(i+n,j) + Q_{tap,vertikalt}(i+n,j)}{Q_{\infty} \cdot \rho \cdot kvadrantbredde} \quad (3.25)$$

$$+ \frac{-Q_{tap,horisontalt}}{Q_{\infty} \cdot \rho \cdot kvadrantthøyde}$$

Tid	n	Senter høyde				
		0,3	0,2	0,1	Forskaling	
Senter bredde		$Q_{i,j}$	$Q_{i+1,j}$	$Q_{i+2,j}$	$Q_{i+3,j}$	$Q_{i+4,j}$
0,9		$Q_{i,j+1}$	$Q_{i+1,j+1}$	$Q_{i+2,j+1}$	$Q_{i+3,j+1}$	$Q_{i+4,j+1}$
0,8		$Q_{i,j+2}$	$Q_{i+1,j+2}$	$Q_{i+2,j+2}$	$Q_{i+3,j+2}$	$Q_{i+4,j+2}$
0,7		$Q_{i,j+3}$	$Q_{i+1,j+3}$	$Q_{i+2,j+3}$	$Q_{i+3,j+3}$	$Q_{i+4,j+3}$
0,6		$Q_{i,j+4}$	$Q_{i+1,j+4}$	$Q_{i+2,j+4}$	$Q_{i+3,j+4}$	$Q_{i+4,j+4}$
0,5		$Q_{i,j+5}$	$Q_{i+1,j+5}$	$Q_{i+2,j+5}$	$Q_{i+3,j+5}$	$Q_{i+4,j+5}$
0,4		$Q_{i,j+6}$	$Q_{i+1,j+6}$	$Q_{i+2,j+6}$	$Q_{i+3,j+6}$	$Q_{i+4,j+6}$
0,3		$Q_{i,j+7}$	$Q_{i+1,j+7}$	$Q_{i+2,j+7}$	$Q_{i+3,j+7}$	$Q_{i+4,j+7}$
0,2		$Q_{i,j+8}$	$Q_{i+1,j+8}$	$Q_{i+2,j+8}$	$Q_{i+3,j+8}$	$Q_{i+4,j+8}$
0,1		$Q_{i,j+9}$	$Q_{i+1,j+9}$	$Q_{i+2,j+9}$	$Q_{i+3,j+9}$	$Q_{i+4,j+9}$
Fundament		$Q_{i,j+10}$	$Q_{i+1,j+10}$	$Q_{i+2,j+10}$	$Q_{i+3,j+10}$	$Q_{i+4,j+10}$

FIGUR 3.7: Illustrasjon over hvilke kvadranter som regnes ved bruk av formel 3.25

Varmetapet i senter av veggbredden mot fundamentet bruker følgende formel

$$\theta = \theta_{Fersk_betong} + \frac{Q_{utv} - Q_{tap,vertiktalt}(i,j+n)}{Q_{\infty} \cdot \rho \cdot kvadrantbredde} + \frac{-Q_{tap,horisontalt}(i,j+n) + Q_{tap,horisontalt}(i,j)}{Q_{\infty} \cdot \rho \cdot kvadrantthoyde} \quad (3.26)$$

Tid	n	Senter høyde				
		0,3	0,2	0,1	Forskaling	
Senter bredde	$Q_{i,j}$	$Q_{i+1,j}$	$Q_{i+2,j}$	$Q_{i+3,j}$	$Q_{i+4,j}$	
0,9	$Q_{i,j+1}$	$Q_{i+1,j+1}$	$Q_{i+2,j+1}$	$Q_{i+3,j+1}$	$Q_{i+4,j+1}$	
0,8	$Q_{i,j+2}$	$Q_{i+1,j+2}$	$Q_{i+2,j+2}$	$Q_{i+3,j+2}$	$Q_{i+4,j+2}$	
0,7	$Q_{i,j+3}$	$Q_{i+1,j+3}$	$Q_{i+2,j+3}$	$Q_{i+3,j+3}$	$Q_{i+4,j+3}$	
0,6	$Q_{i,j+4}$	$Q_{i+1,j+4}$	$Q_{i+2,j+4}$	$Q_{i+3,j+4}$	$Q_{i+4,j+4}$	
0,5	$Q_{i,j+5}$	$Q_{i+1,j+5}$	$Q_{i+2,j+5}$	$Q_{i+3,j+5}$	$Q_{i+4,j+5}$	
0,4	$Q_{i,j+6}$	$Q_{i+1,j+6}$	$Q_{i+2,j+6}$	$Q_{i+3,j+6}$	$Q_{i+4,j+6}$	
0,3	$Q_{i,j+7}$	$Q_{i+1,j+7}$	$Q_{i+2,j+7}$	$Q_{i+3,j+7}$	$Q_{i+4,j+7}$	
0,2	$Q_{i,j+8}$	$Q_{i+1,j+8}$	$Q_{i+2,j+8}$	$Q_{i+3,j+8}$	$Q_{i+4,j+8}$	
0,1	$Q_{i,j+9}$	$Q_{i+1,j+9}$	$Q_{i+2,j+9}$	$Q_{i+3,j+9}$	$Q_{i+4,j+9}$	
Fundament	$Q_{i,j+10}$	$Q_{i+1,j+10}$	$Q_{i+2,j+10}$	$Q_{i+3,j+10}$	$Q_{i+4,j+10}$	

FIGUR 3.8: Illustrasjon over hvilke kvadranter som regnes ved bruk av formel 3.26

### 3.4.7.3 Temperaturutvikling for resten av tverrsnittet

Temperaturutviklingen i resten av tverrsnittet mottar og videre distribuerer varmetap i to retninger.

$$\theta = \theta_{Fersk_betong} + \frac{Q_{utv} - Q_{tap,vertiktalt}(i+n,j+n) + Q_{tap,vertiktalt}(i+(n-1),j+(n-1))}{Q_{\infty} \cdot \rho \cdot kvadrantbredde} + \frac{-Q_{tap,horisontalt}(i+n,j+n) + Q_{tap,horisontalt}(i+(n-1),j+(n-1))}{Q_{\infty} \cdot \rho \cdot kvadrantthoyde} \quad (3.27)$$

Tid	n	Senter høyde				
		0,3	0,2	0,1	Forskaling	
Senter bredde	$Q_{i,j}$	$Q_{i+1,j}$	$Q_{i+2,j}$	$Q_{i+3,j}$	$Q_{i+4,j}$	
0,9	$Q_{i,j+1}$	$Q_{i+1,j+1}$	$Q_{i+2,j+1}$	$Q_{i+3,j+1}$	$Q_{i+4,j+1}$	
0,8	$Q_{i,j+2}$	$Q_{i+1,j+2}$	$Q_{i+2,j+2}$	$Q_{i+3,j+2}$	$Q_{i+4,j+2}$	
0,7	$Q_{i,j+3}$	$Q_{i+1,j+3}$	$Q_{i+2,j+3}$	$Q_{i+3,j+3}$	$Q_{i+4,j+3}$	
0,6	$Q_{i,j+4}$	$Q_{i+1,j+4}$	$Q_{i+2,j+4}$	$Q_{i+3,j+4}$	$Q_{i+4,j+4}$	
0,5	$Q_{i,j+5}$	$Q_{i+1,j+5}$	$Q_{i+2,j+5}$	$Q_{i+3,j+5}$	$Q_{i+4,j+5}$	
0,4	$Q_{i,j+6}$	$Q_{i+1,j+6}$	$Q_{i+2,j+6}$	$Q_{i+3,j+6}$	$Q_{i+4,j+6}$	
0,3	$Q_{i,j+7}$	$Q_{i+1,j+7}$	$Q_{i+2,j+7}$	$Q_{i+3,j+7}$	$Q_{i+4,j+7}$	
0,2	$Q_{i,j+8}$	$Q_{i+1,j+8}$	$Q_{i+2,j+8}$	$Q_{i+3,j+8}$	$Q_{i+4,j+8}$	
0,1	$Q_{i,j+9}$	$Q_{i+1,j+9}$	$Q_{i+2,j+9}$	$Q_{i+3,j+9}$	$Q_{i+4,j+9}$	
Fundament	$Q_{i,j+10}$	$Q_{i+1,j+10}$	$Q_{i+2,j+10}$	$Q_{i+3,j+10}$	$Q_{i+4,j+10}$	

FIGUR 3.9: Illustrasjon over hvilke kvadranter som regnes ved bruk av formel 3.27

### 3.4.8 Spenningsutvikling

Simuleringen av spenningsutvikling i dette arket vil kun ta hensyn til termisk induserte spenninger og autogent svinn. Arket tar ikke for seg uttørkingssvinn fordi det først skjer når veggen blir avforskalt. Ved varmere temperaturer kunne det vært aktuelt å simulere uttørkingssvinn fra avforskaling, men for å forenkle utregningene blir det utelatt. [12]

#### 3.4.8.1 E-modulus og Strekkfasthet

For å regne ut rissindeksen til et spesifikt tverrsnitt må vi vite dens strekkfasthet og E-modul. Begge disse fysiske egenskapene blir bestemt av 28 dagers karakteristisk E-modulus og strekkfasthet, samt tidspunkt for avbinding og modenheten for tidspunktet man ønsker å regne ut.

For de to betongreseptene dette regnearket er kompatibelt med, vil verdiene være som følgende:

	<b>Anlegg FA</b>	<b>Anlegg FA + 16% FA</b>
$t_0$ (t)	8,8	12
$s$	0,2	0,356
$f_{t28}$ (MPa)	3,55	3,05
$n_t$	0,589	0,486
$E_{c28}$ (GPa)	30,4316	29,922
$n_E$	0,348	0,252

TABELL 3.8: Fysiske verdier for Anlegg FA og Anlegg FA + 16% FA [6]

E-modulus kan regnes ut med følgende formel [8].

$$E(t) = E_{c28} \cdot \left( \exp\left(s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_{eq} - t_0}}\right)\right)\right)^{n_E} \quad (3.28)$$

Strekkfasthet på et bestemt tidspunkt blir bestemt med følgende formel [8]

$$E(t) = f_{t28} \cdot \left( \exp\left(s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_{eq} - t_0}}\right)\right)\right)^{n_t} \quad (3.29)$$

Der både  $t_{eq}$  og  $t_0$  må regnes om til dager.

Ved bruk av modenheten i herdeprosessen vil man kunne regne ut både strekkfastheten og E-modulen ved ulike betongerecepter og temperaturer.

Graden av fysisk styrke vil variere i tverrsnittet, ettersom modenheten i senter vil være større enn modenheten ved betongoverflaten.

### 3.4.8.2 Termisk utvidelse

Spenningsene som oppstår i tverrsnittet grunnet temperaturgradient er en av de enklere operasjonene i dette regnearket. Regnearket bruker en forenklet måte å regne temperaturutvidelse på. Maksimal temperatur i herdeprosessen er allerede kalkulert i kapittel 3.4.7, og det samme er temperaturene mot fundamentet. Ved utregning av termiske spenninger brukes maksimal oppnådd temperatur i tverrsnittet, samt temperaturen i fundamentet. På denne måten blir rissindeksen redusert om det simuleres med varmekabler i fundamentet.

$$\epsilon_t = \alpha \cdot (\theta_{max} - \theta_{rand}) \quad (3.30)$$

Hvor

$\epsilon_t$ : Spenninger grunnet temperaturgradient

$\alpha_t$ : Betong utvidelseskoeffisient

$\theta_{max}$ : Maksimal temperatur oppnådd i tverrsnittet

$\theta_{fundament}$ : Fundamenttemperatur tilsvarende omgivelsestemperaturen v/ fundament uten varmekabler.

Ved denne forenklete måten å simulere spenninger på vil det ikke oppstå temperaturspenninger i betongen før den har nådd maksimal temperatur. Den vil heller ikke ta hensyn til at temperaturgradienten synker. Spenningen vil derfor være konstant for hele perioden frem til likevekt.

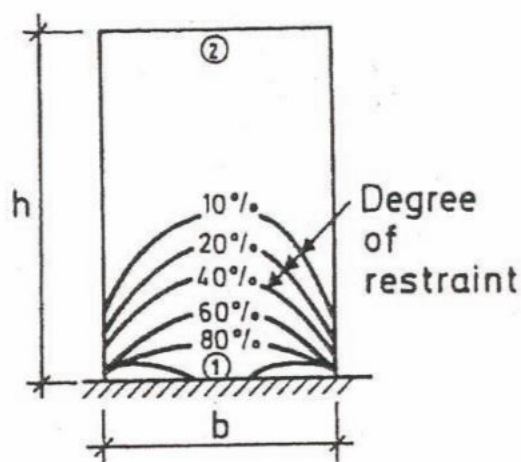
### 3.4.8.3 Autogent svinn

Det autogene svinnet er avhengig av herdeprosessen. Det vil si at autogent svinn tar modenhetsprinsippet inn i sin beregning. Slik at varmen fra herdeprosessen gir betongen høyere modenhet tidligere.

$$\epsilon_{as} = (1 - \exp(-0.2 \cdot \sqrt{t_{eq}})) \cdot 2.5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \quad (3.31)$$

### 3.4.8.4 Fastholding

Det å beregne eksakt fastholdingsgrad for et støpeavsnitt er ganske komplekst og krever FEM-simuleringer. I stedet for å bruke mye tid på disse simuleringene bruker excel-arket en forenklet formel.



FIGUR 3.10: Illustrasjon av fastholdinggrad i en vegg [2]

Den forenklete formelen tar for seg forholdet mellom tverrsnittsarealet til ny og gammel betong, samt forholdet mellom e-modulen til samme tverrsnitt [12].

$$Fastholding = \frac{1}{1 + \left(\frac{A_n}{A_o} \cdot \frac{E_n}{E_o}\right)} \quad (3.32)$$

- $A_n$ : Tverrsnittsareal fersk betong
- $A_o$ : Tverrsnittsareal herdet betong
- $E_n$ : E-modul til fersk betong
- $E_o$ : E-modul til herdet betong

E-modulen til veggens som støpes vil være stigende med tiden, ettersom de fysiske egenskapene til betongen øker med tiden. Fastholding vil derfor være økende inntil e-modulen stabiliserer seg.

I tilfeller der forholdet mellom tverrsnittsareal er høyt, brukes formelen med en liten modifikasjon for å ta hensyn til ekstra stor kontaktflate mellom fundament og vegg.

$$Fastholding = \frac{1}{1 + \left(\frac{A_n}{2 \cdot A_o} \cdot \frac{E_n}{E_o}\right)} \quad (3.33)$$



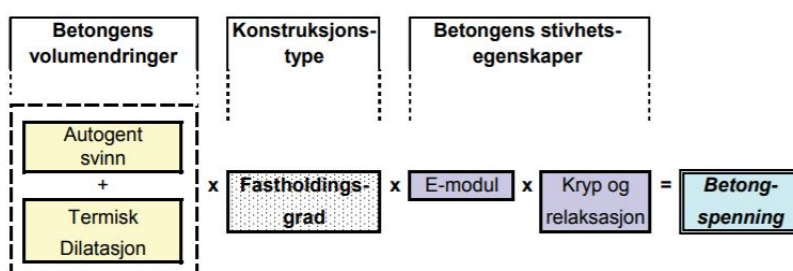
Ved å multiplisere tverrsnittarealet av konstruksjonen det støpes mot med to, skaper det et mer nøyaktig bilde av den aktuelle fastholdingen i konstruksjonen.

### 3.4.8.5 Relaxation/slipp

Graden av slipp i betongens støpeskjøt er avhenging av blant annet temperatur, friksjon og størrelsen på belastningen. Det vil si at mindre veggverrsnitt vil ha større grad av slipp. En av forklaringene på dette kan være at temperaturutviklingen er mindre og kontaktflaten mot tilstøtende konstruksjon er mindre, altså at det er mindre friksjon. Denne verdien settes i hovedsak til 0.65, men denne verdien varierer med tverrsnittet. 0.65 er forenklet sagt en veggtykkelse opp fra fundamentet. [12]

### 3.4.8.6 Sammensatt stress

Når e-modulus, temperatur og autogene spenninger, fastholding og slipp er regnet ut hver for seg kan det totale stresset i betongtverrsnittet beregnes. Det kan gjøres på følgende måte:

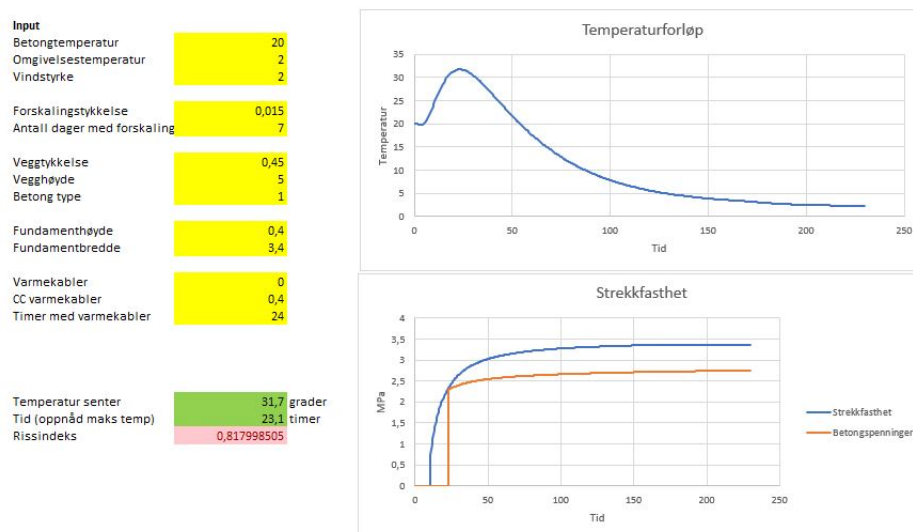


FIGUR 3.11: Prinsippkisse for beregning av betongspenninger [2]

$$\sigma(t) = (\epsilon_t + \epsilon_{as}) \cdot E(t) \cdot fastholding(t) \cdot slipp \quad (3.34)$$

Ved å regne betongspenningen med intervall på 0.5t frem til simuleringslutt på 230 timer, vil man se at grafen er stigende. Ved tid 230t har grafen stortsett stabilisert seg, slik at rissindeksen kan leses av grafen. Måten utregningene er satt sammen på gjør at grafen kun stabiliserer seg ved maks indeks, i stedet for å synke.





FIGUR 3.12: Excel-arkets utseende

### 3.4.9 Rissindeks

Rissindeksen er forholdet mellom spenningene og oppnådd strekkfasthet i betongkonstruksjonen [12].

$$Rissindeks = \frac{\sigma_t(t)}{f_t(t)} \quad (3.35)$$

Rissindeksen beregnes fra betongen har nådd maksimaltemperatur og videre til tid 230t. Rissindeksen vil være stigende i og med at spenningene øker og strekkfastheten stabiliserer seg og utvikler mest fasthet i starten.

Til slutt kan det være smart å legge opp til at tre celler i excelarket gir informasjon om maksimal temperatur og tidspunktet den er oppnådd, samt maksimal rissindeks.

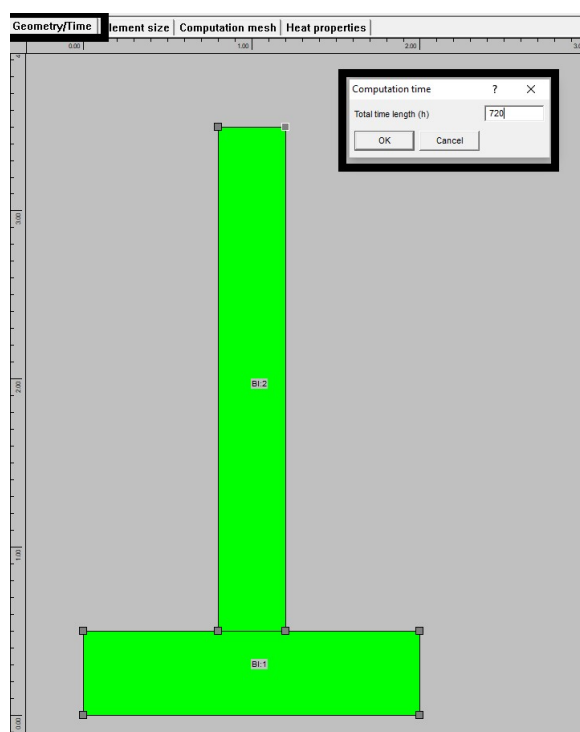
Om ønskelig kan det også være lurt å lage to ulike grafer for å få et visuelt uttrykk slik at det er mulig å oppdage feil i utregningene. Der den ene grafen viser temperaturforløpet i senter og den andre viser forløpet til strekkfasthet og spenningene i betongen.

## 3.5 Oppsett av CrackTest COIN

Det å gjøre klar til en simulering i CrackTest COIN kan være litt lite intuitivt første gang, men programmet er satt sammen ganske enkelt slik at det er mulig å få kontroll på fremgangsmåten.

### 3.5.1 Geometri og tid

Først av alt må geometrien til de ulike konstruksjonene som skal simuleres tegnes. Geometrien tegnes grovt med øyemål, før punktene bli korrigerert til korrekt plassering ved hjelp av koordinatene i knutepunktene. Når konstruksjonen er ferdig tegnet, må simuleringstiden endres. Simuleringstiden ligger normalt inne med 120t, men for å finne maksimal rissindeks settes denne til 720t (30dager). Dette kommer av at rissindeksen ofte er størst etter 1-2 uker, når betongtverrsnittet er ferdig avkjølt. Om det derimot er temperaturforløpet i konstruksjonen som er av interesse kan simuleringstiden forbli på 120 timer. Ved økende tidsintervall øker også tiden det tar å gjennomføre en simulering. [9]

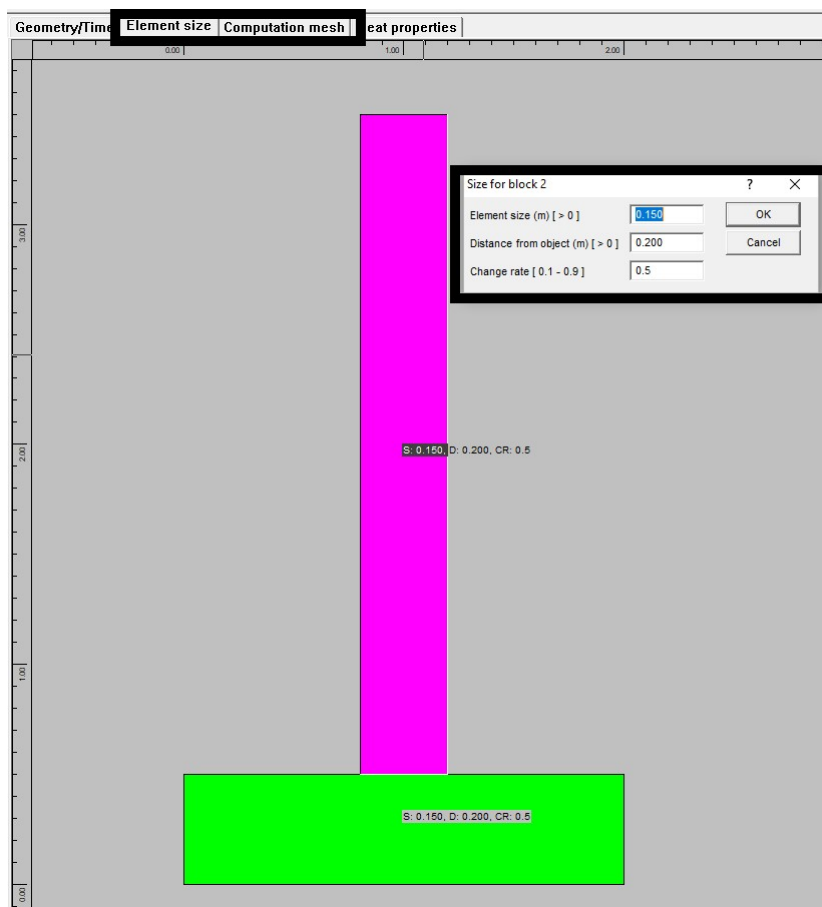


FIGUR 3.13: Oppsett CrackTest COIN - Geometri og tid

### 3.5.2 Elementnett

Når geometri og simuleringstid er valgt er det videre til neste fane i programmet. I og med at programmet er et FEM-basert analyseprogram, må elementnettet tilpasses den enkelte simulering. For fint elementnett vil gjøre simuleringene svært ressurs- og tidkrevende, mens for grovt elementnett vil redusere nøyaktigheten på simuleringene. For en standard konstruksjon vil det i mange tilfeller være unødvendig å endre på standardinnstillingene. Ved kjølerør og varmekabler, blir elementnettet rundt disse enhetene

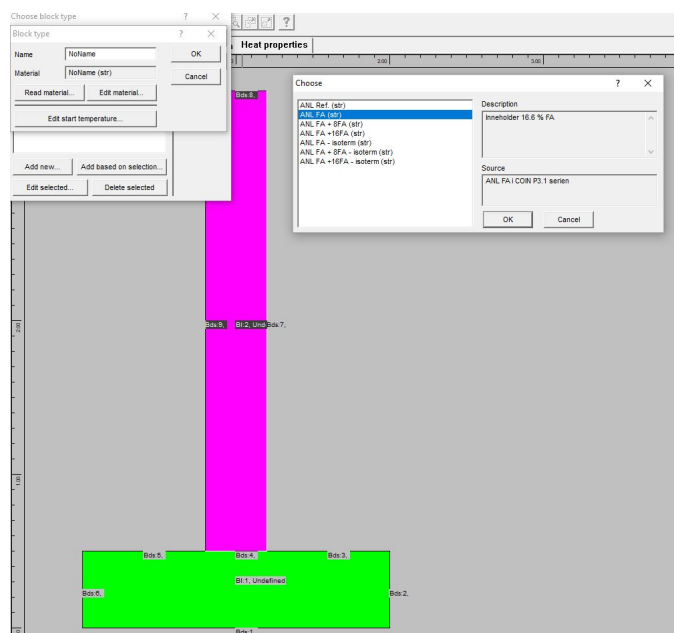
veldig fint og ressurskrevende. Det bør derfor tas en vurdering på om det skal gjøres litt grovere. Når instillingen for elementnettet er korrigert, kan elementnettet tegnes. [9]



FIGUR 3.14: Oppsett CrackTest COIN - Elementnett

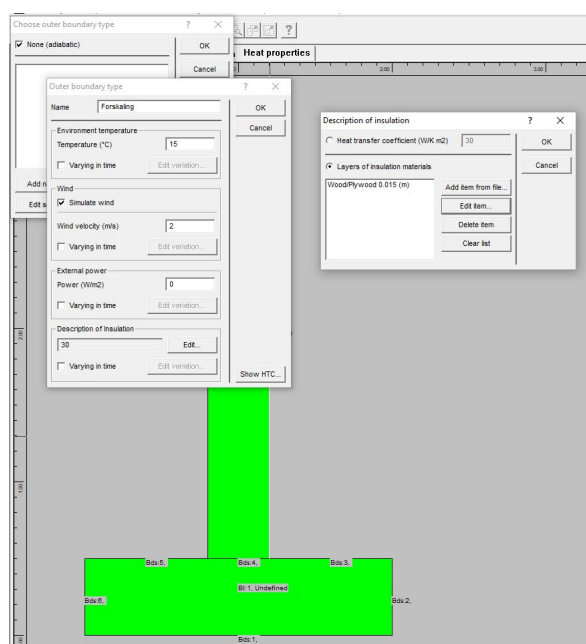
### 3.5.3 Material- og randbetingelser

I neste fane er det elementmaterialer og randbetingelser som skal bestemmes. Det er her inngangsparametere for vær, herdetiltak og betongsammensetning legges inn. Først av alt må betongmaterialet velges ut fra et materialbibliotek. Det biblioteket som er standard i Cracktest COIN er ikke veldig utfyllende, men det er mulig å få tilgang til materialdata fra COIN-prosjektet. Materialeegenskapene, samt starttemperatur kan endres. Materialeegenskapene er avhengig av betongen som skal brukes, og varierer utover i simuleringstiden som er valgt. Det er også mulig å velge ferdig herdet betong, der materialeegenskapene er konstant. [9]



FIGUR 3.15: Oppsett CrackTest COIN - Betongtype

Varmetapet en konstruksjon har er avhengig av randbetingelsene som velges. Det finnes et materialbibliotek med forskalingsfiner, isolasjon, stål etc som det kan velges fritt fra. Det er mulig å variere randbetingelsene ved ulike tidsintervall. Det kan for eksempel bestemmes at en vegg skal ha 15mm forskalingsfiner på i syv dager, før den blir fjernet og veggen er fullt eksponert for vær og vind. Temperatur og vindstyrke kan legges inn, enten som en konstant eller som varierende med tiden. Det er også mulig å legge inn transmisjonstall om det er en allerede kjent verdi. [9]



FIGUR 3.16: Oppsett CrackTest COIN - Randbetingelser

### 3.5.4 Temperatur- og spenningsberegninger

Når material- og randbetingelser er tilpasset den aktuelle støpe-etappen, beregnes temperatur og spenninger. For å aktivere spenningsberegninger må det velges mellom *Plane surface*- eller *Line surface-analyse*. Som standard bør *Plane surface-analyse* velges, fordi *Line surface-analyse* er noe forenklet og er avhengig av symmetri. Deretter må fastholdingsgraden, samt statiske betingelser velges. [9]

Når temperatur- og spenningsberegningene er ferdig simulert kan det genereres kurver og/eller fargekart for alt fra temperaturforløp og modenhet til spenninger og strekkfasthet. Det ligger også inne muligheter for at programmet kan hente ut minimums, gjennomsnittlig og maksimums verdier i tverrsnittet, i tillegg er det mulig å hente ut informasjon for spesifikke koordinater.

## Kapittel 4

# Analyse

I dette kapitlet skal jeg analysere nøyaktigheten av simulering av rissindeks utført i excel, sammenlignet med CrackTest COIN. Det skal gjøres ved å sammenligne hvilke tilfeller det vil være nødvendig å bruke herdetiltak for å redusere rissindeksen. I Statens vegvesens prosesskode 2 post 84.56 *Beregning og styring av herdetemperatur og rissrisiko* legges det opp til at entreprenørene skal ta hele risikoen for riss. Posten ”omfatter simuleringsberegninger av herdetemperatur og risiko for opprissing for kartlegging av nødvendige tiltak, gjennomføring av tiltakene, samt kontroll og styring av utførelsen i samsvar med beregningsresultatene slik at risikoen for opprissing er redusert som forutsatt.” [1]

I post 84.56 c) står det: ”Beregningene baseres på representative herdeteknologiske parametere for tilsvarende betong som benyttes i prosjektet. Dersom prosess 84.57 er spesifisert, utføres beregningene med de herdeteknologiske parameterne som er fastlagt for betongen benyttet i prosjektet. Simuleringsberegningene utføres ved bruk av anerkjent 2D eller 3D herdeteknologiprogram. Forholdet mellom største opptredende strekkspenning og betongens enaksiale strekkfasthet skal ikke på noe tidspunkt overstige 0,75. Beregningene vil kunne vise andre tillatte temperaturdifferanser enn angitt i prosess 84.55. Materialparametere og beregningsforutsetninger inkludert alternative utførelsestiltak, forelegges byggherren før beregninger utføres. Beregningsresultater og plan for tiltak forelegges byggherren før støp.” [1]

Denne posten prises som rundsum. Det vil si at entreprenørene må prise inn herdetiltak før de i det hele tatt vet hvordan herdeforholdene under de ulike støpene vil være. Det vil derfor kunne få en stor økonomisk konsekvens både å prise 84.56 for lavt, men også for høyt. Prises posten for lavt og entreprenøren vinner anbudet vil posten potensielt føre til økonomisk tap. Prises derimot posten for høyt vil det kunne medføre at en entreprenør ikke vinner anbudet.

Det å prise en post som dette vil på mange måte være komplekst og tidkrevende. Denne oppgaven skal derfor simulere noen av tverrsnittene i *Utførelsesentreprise - Fv. 44 Bussvei Diagonalen - Gauselstasjon* [13] som benyttet post 84.56 fra prosesskode 2 [1] for å se hvilke herdetiltak som må til for å holde rissindeksen under 0.75 og kostnadene det måtte medføre. Kostnadene som oppstår ved bruk av simuleringsarket skal sammenlignes med kostnadene som forekommer ved bruk av Cracktest COIN.

Det antas i hele oppgaven at inngangsparameteren for omgivelsestemperaturen varierer mellom -6 til 30 °C.

Betongtverrsnittene fra prosjektet Fv. 44 Bussvei Diagonalen - Gauselstasjon som skal simuleres i regnearket og Cracktest COIN er veggene i kulvert K2599, samt to ulike støttemurer. Den ene støttemuren tilhører K2599 og den andre tilhører K35. [13]

Det er satt en rekke forutsetninger og konstanter for å forenkle antall simuleringer. Vindstyrke og forskalingstykkelsen er satt til henholdsvis 2m/s og 15mm. I realiteten vil vindstyrken ofte overstige 2m/s på Vestlandet, men en styrke på 2m/s er representativt for disse simuleringene. Forskalingstykkelse på 15mm er en helt standard forskalingstykkelse. I realiteten vil tykkelsen være markant større om det er krav til bordforskaltflater, noe som ofte er et krav ved synlig overflater på kulverter og støttemurer. Tykkelsen vil føre til bedre isolering og gi en jevnere nedkjøling, hvert fall på den siden med bordforskaling. Antall dager med forskaling etter støp styrer også temperaturgradientene og derfor også rissindeksen. Det vil i disse tilfellene simuleres med forskaling i syv dager. På denne måten får betongen en tregere nedkjøling.

Det er satt som forutsetning at fundamentet er støpt flere etapper foran veggen, samt at det støpes mot herdet vegg. Typisk 2. støpetappen av en vegg. For simuleringene i Cracktest COIN vil det bli brukt følgende fastholdingsgrad om x- og y-akse og translasjon om z-akse.

<b>Fundamenttype</b>	<b>Rotasjon x-akse</b>	<b>Rotasjon y-akse</b>	<b>Translasjon z-akse</b>
Vegg på stripe	0.25		0.25
Vegg på bunnplate	0.25	0.25	0.25

TABELL 4.1: Fastholdingsgrad for stripefundament og bunnplate

Verdiene for stripefundament forutsetter symmetri, noe som ikke er tilfellet for simuleringene utført i denne oppgaven. Simuleringen i Cracktest COIN vil derfor simuleres med fastholding på 25% i alle retninger. I excel vil fastholdingen bli bestemt med egen formel.

Varmekabler installeres i senter av tverrsnittene c/c 400mm med en effekt på 40W/m. De startes 4 døgn før støp og står på i 1 døgn etter støp. Væsken i kjølerørene startes i det støpen starter og kjøler betongen i 3 døgn etter støp. Det legges opp til at temperaturen i kjølerørene er 7 °C i simuleringene, det forutsetter jevnt godt trykk i rørene.

## 4.1 Herdetiltakenes kostnad

### 4.1.1 Lavvarme betong

Kost-nytt ved bruk av lavvarmebetong i store betongtverrsnitt er stor. Det vil si at effekten økt mengde flygeaske i betongen har på temperaturen er verdt den ekstra kostnaden det medfører i noen tilfeller. Kostnaden vil typisk ligge på 0-300 kr/m<sup>3</sup> [10]. Kostnaden vil ofte være lavere i byen med blandeverk som har kapasitet til å oppbevare ekstra FA og dyrere ved betongblandeverk med mindre oppbevaringskapasitet. I storbyen vil ekstra FA i noen tilfeller ikke medføre ekstra kostnad fordi sement er dyrere enn FA, og FA erstatter deler av sementinnholdet. Før entreprenøren leverer inn sitt tilbud vil de ofte forhøre seg med betongblandeverk angående pris for vanlig betong, men også lavvarmebetong, slik at entreprenørene vet hva lavvarmebetong koster før de leverer inn pristilbudet. På store vei-prosjekt vil ofte betongeleveransene være store når det støpes, noe som gjør at betongleverandøren kan gi redusert pris.

### 4.1.2 Lavere betongvarme

Det å bestille betong med temperatur lavere enn 20°C senker maksimumstemperaturen i betongtverrsnittet, noe som senker spenningene i betongen. Dette tiltaket er i stor grad gratis, da det i hovedsak kun blir tilsatt kaldere vann. Dette tiltaket vil være mest effektiv på vinteren med temperatur rundt 0°C [10]. På sommeren når temperaturen øker og ligger over 20°C vil tilslaget og resten av ingrediensene i betongen være varmere. Masseforholdet og tettheten vil derfor ikke bli styrt i særlig grad av kaldere vann.

Dersom målet er å senke fersk betongtemperaturen er det også mulig å tilsette is i betongen som en del av vanninnholdet. Dette vil kreve en del prøving for å komme frem til riktig blandingsforhold av tilsatt vann/is. Dette er også avhengig av at noen klarer å levere store mengder isbiter. Dette tiltaket er ressurskrevende, og sjeldent brukt i Norge. Det er derfor ikke en del av herdetiltakene i denne analysen.



### 4.1.3 Varmekabler

Varmekabler som støpes inn i tverrsnittet det skal støpes mot er avhengig av god planlegging. Det finnes stor sannsynlighet for at det blir støpt inn varmekabler som ikke er nødvendig når for eksempel veggen skal støpes mot fundamentet. Det er umulig å legge inn varmekabler i etterkant.

Herdekabel på 40W/m selges i ulike lengder. Antallet varmekabler avhenger av senteravstanden, og størrelsen på fundamentet. Ved store tverrsnitt vil det være aktuelt å støpe inn varmekabler langs både topp og bunnarmeringen, mens i mindre tverrsnitt vil det være nok å montere varmekabler i senter av tverrsnittet. En 35m en-ledet herdekabel koster 57kr/m (ordinær pris), men entreprenører med innkjøpsavtaler kan fort få samme kabel for 21kr/m (rabattert pris). Et fundament på 0.8x2m (hxb) og senter avstand på 0,4m vil det koste 105kr/m + forbruksmateriell og tidsforbruk ved montering.

Tidsforbruket ved montering er en usikkerhetsfaktor. Denne analysen vil derfor anta at det i beste fall tar 0,05t/m og i verste fall tar 0,15t/m. Timesatsen for en fagarbeider settes til 450 kr/t inkludert feriepenge og avgifter. Kostnaden på innfestnings materialet som brukes avhenger av innkjøpsprisen til entreprenørene. I denne analysen settes denne kostnaden til 5kr/m for god avtale og 15kr/m uten avtale. Dette kommer av varmekabelen festes i senter av fundamentet uten noen naturlige festepunkter.

### 4.1.4 Kjølerør

Innstøping av kjølerør og leie av kjølesystem vil ofte være siste utvei, fordi det er det dyreste av tiltakene nevnt over. Det å feste stålrør, både lengder og bender kan være tidkrevende. I tillegg vil leiekostnadene på kjølesystemet være større enn innkjøp av for eksempel varmekabler. Etter at betongen er nedkjølt må rørene blåses tørre, og deretter fylles med mørtel. Kostnaden vil ofte ligge mellom 300-1000kr/m<sup>3</sup> [10]. Det er kritisk å vite at dette herdetiltaket er nødvendig allerede før tilbudet blir levert, hvis ikke er faren stor for å tape penger på denne posten.

Innkjøp av stålrør avhenger av kvaliteten og dimensjonen. I denne analysen legges det opp til bruk av hydraulikk rør for å være sikker på at rør og bender tåler trykket. Innkjøp med avtale koster 50kr/m rør inkludert bend og innkjøp uten avtale koster 270 kr/m rør inkludert bend.

Tidsforbruket ved montering av kjølerør er en usikkerhetsfaktor. Denne analysen vil derfor anta at det i beste fall tar 0,05t/m og i verste fall tar 0,15t/m. Timesatsen for en fagarbeider settes til 450 kr/t inkludert feriepenge og avgifter. Kostnaden på innfestnings materialet som brukes avhenger av innkjøpsprisen til entreprenørene. I denne

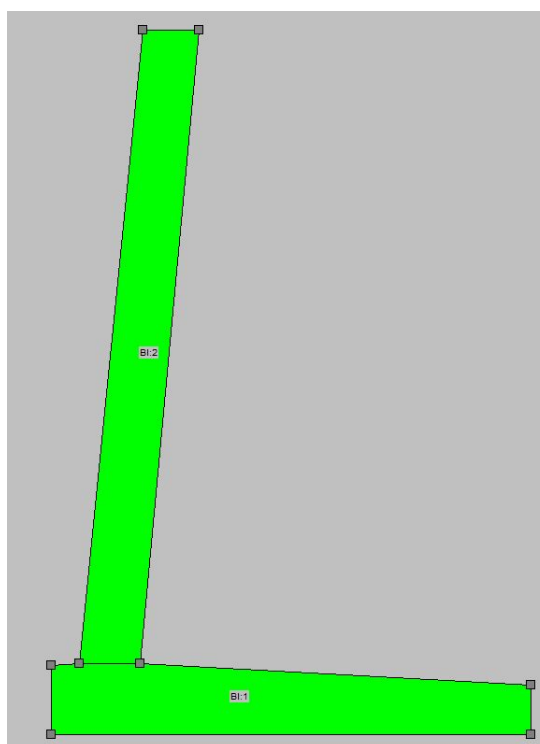
analysen settes denne kostnaden til 5kr/m for god avtale og 15kr/m uten avtale. Dette kommer av varmekabelen festes i senter av fundamentet uten noen naturlige festepunkter.

Kostnaden ved leie av kjøleanlegg varierer med leieperioden og anleggets effekt. Beste pris for leie av kjøleanlegg settes derfor til 40 000kr/mnd. For litt dårligere vilkår settes leie kostnaden til 50 000kr/mnd.

## 4.2 Støttemur K35

Denne støttemuren er kurvet og har samme tverrsnitttykkelse over hele lengden. Det som varierer er høyden. I denne oppgaven simuleres tverrsnittets største høyde.

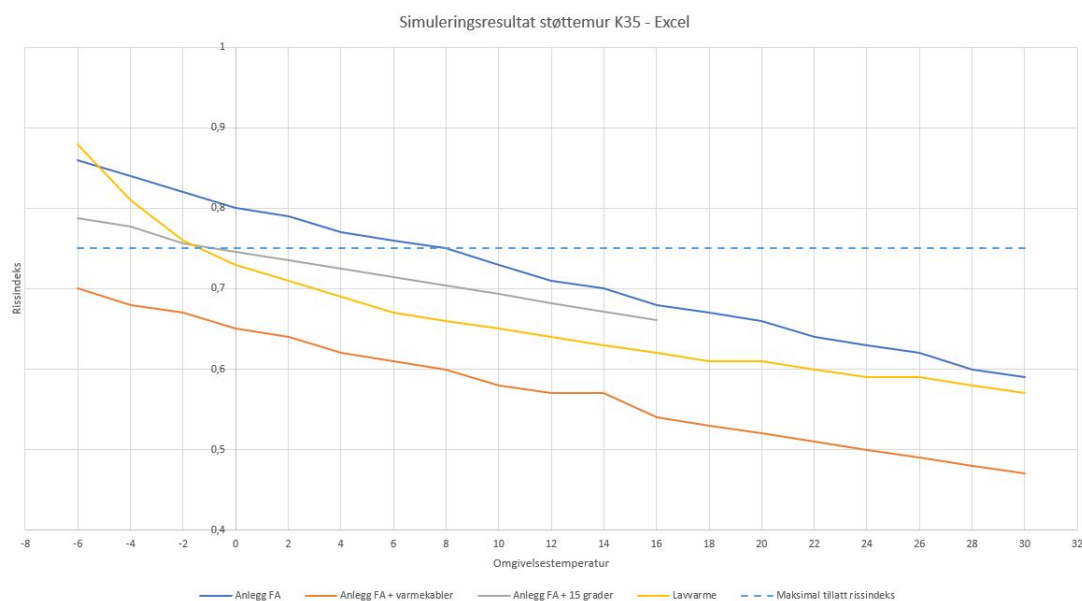
Fundamentet er 3,4m bredt med varierende høyde. Største høyde er 0.5m og minste høyde er 0.35m. Veggens skråningsvinkel er 80 grader og tykkelse og høyde på henholdsvis 0.430m og 4.5m, som illustrert i figur 4.1. Total lengde på støttemuren inkludert kurver er på rundt 435m. [13]



FIGUR 4.1: Tverrsnitt Støttemur K35

### 4.2.1 Simulering i excel

Simuleringene i beregningsarket i excel går ut ifra inngangsparameterene omtalt over og i appendix C. Det er ikke mulig å simulere fundamenter med ulik høyde, det blir derfor valgt en mellomhøyde på 0.4m.



FIGUR 4.2: Excel: Simuleringsresultat Støttemur K35

Som figur 4.2 illustrerer skal det forholdsvis lite tiltak til for å holde rissindeksen under 0.75 ved temperaturer over 0°C. Ved å kun og bruke standard anlegg FA vil rissindeksen være over toleransene frem til omgivelsestemperaturen når 8 °C. Dette byr i teorien ikke på problem, fordi det i vinterhalvåret er lett å få tak i betong med temperatur under 20°C. For som kurven til ANL FA + betongtemperatur på 15 °C viser så er rissindeksen innenfor grensene når omgivelsestemperaturen er større enn -1 °C. Det vil derfor ved de fleste tilfeller i lavlandet på Vestlandet være mulig å støpe disse tverrsnittene uten noe ekstra tiltak for å begrense temperaturgradienten.

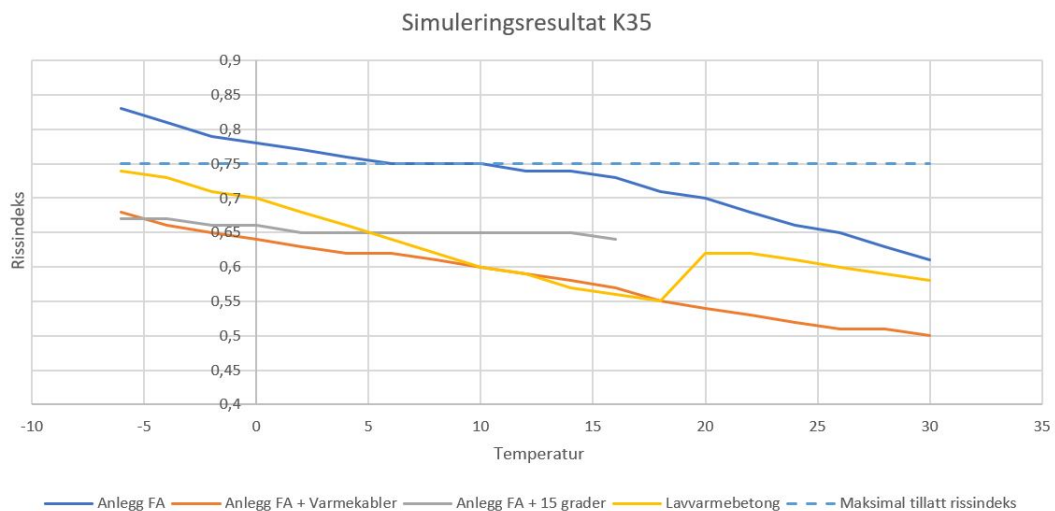
Grafene i figur 4.2 viser i tillegg at beregningene for lavvarmebetong holder seg under rissindeksen ved -1°C, akkurat som vanlig anlegg FA + 15°C betongtemperatur. Eneste forskjellen er at temperaturen i lavvarmebetongen er lavere, slik at rissindeksen generelt er lavere enn anlegg FA + 15°C for økende omgivelsestemperaturer.

Ved bruk av varmekabler holder rissindeksen seg under 0.75 for alle temperaturer fra -6 til 30 °C. Om temperaturene er under -6°C, er det fortsatt å anta at rissindeksen vil være under 0.75.

### 4.2.2 Simulering i Cracktest COIN

Det er som beskrevet over simulert det største veggverrsnittet i K35 under ulike forhold. Simuleringene er gjort fra -6 til 30 °C. Ved kjøligere temperaturer er det en fare for at betongen fryser før den når 5 MPa, så det er viktig å ha et forhold til dette om en ønsker å senke temperaturen på fersk betong.

Simuleringen er grafisk fremstilt i figur 4.3. Grafen viser at det skal forholdsvis lite tiltak til for å holde seg innenfor maks rissindeks på 0.75.



FIGUR 4.3: Cracktest COIN: Simuleringsresultat Støttemur K35

Det å støpe med anlegg FA uten noen ekstra tiltak er det eneste som overstiger grensen på 0.75. Dette er frem til omgivelsestemperaturen er over 10 °C. Det vil derfor ikke føre til problem i og med at betongen ofte leveres rundt 15 °C på vinteren. Ved betongtemperatur på 15°C, holder rissindeksen seg mellom 0.65 og 0.7. 15°C betongtemperatur er kun simulert opp til 15-16 °C, fordi det kan være vanskelig å oppnå en fersk betong på 15 °C om omgivelsestemperaturen er høyere, da må man potensielt tilsette isbiter. Man kan se at kurven for lavvarmebetong får et kraftig hopp rundt 18 °C. Dette kan forklares med at uttørkning fra betongoverflaten og autogent svinn øker med stigende temperatur. Lavvarmebetong og varmekabler gir også hver for seg gode resultater, men vil i dette tilfellet være unødvendig fordi rissindeksen kan holdes innenfor grensene med enklere og billigere tiltak.

### 4.2.3 Kostnad

Det vil i de aller fleste tilfellene ikke være nødvendig med fordyrende herdetiltak. Det vil selvfølgelig være mulig å støpe inn varmekabler i fundamentet, men det vil være ganske

dyrt for 435m støttemur, se tabell 4.2.

Beregning av kostnader for K35 er ganske enkelt om en har klart for seg fremdriften, altså at entreprenører er klar over hva som skal støpes når. Om store deler av støttemuren skal støpes på vinteren, må det tas i betraktning at det kan bli kaldere enn  $-6^{\circ}\text{C}$ . Det er ikke veldig mange dager i året, men det er en risiko å ta. Ved kaldere vær, vil en ofte ønske å bestille varmere betong for å holde betongen over frysepunktet lengst mulig, noe som igjen vil føre til høyere rissindeks. Det må derfor tas en avgjørelse på om det skal støpes inn varmekabler i fundamentet for å ta kontroll over risikoen som finnes i vinterhalvåret.

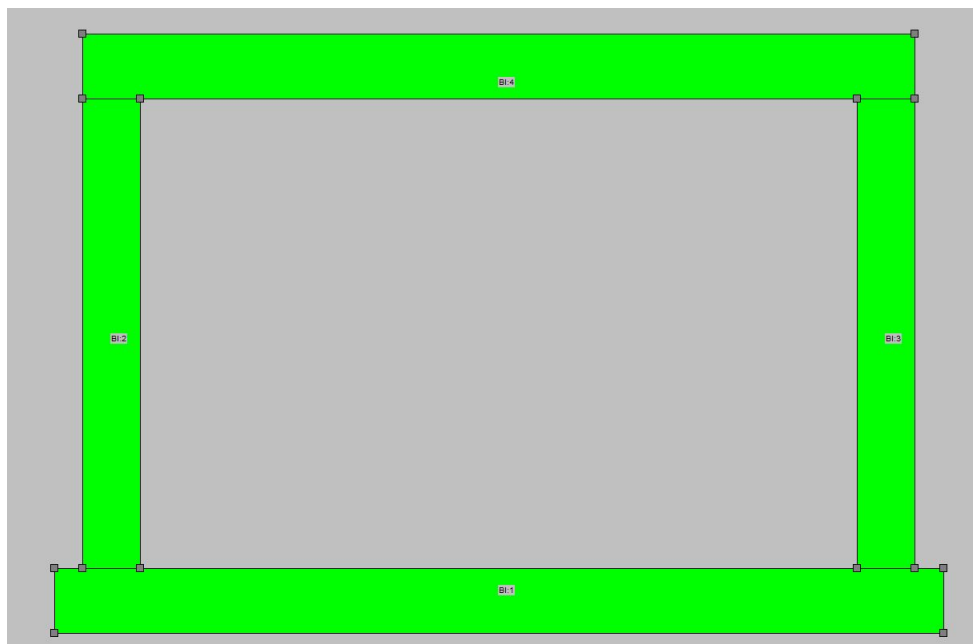
Tiltak	Sesong	Effekt	Lavest kostnad	Høyest kostnad
Senke temperaturen på fersk betong	Vinter	God	0	0
Lavvarmebetong	Sommer/vinter	God	0	195 600kr
Varmekabler	Sommer/vinter	God	174 217,50kr	487 417,50kr

TABELL 4.2: Kostnadsoversikt K35 Støttemur

Mange av disse tiltakene vil i mange tilfeller være unødvendig fordi du kan oppnå akseptabel rissindeks med billigere tiltak. Når man priser jobben vil man uansett forespør pris for lavvarmebetong. Det vil si at ved å legge inn ekstrakostnaden lavvarmebetong gir i post 84.56, kan en del av risikoen fjernes. Det kan eventuelt legges til halvparten av denne kostnaden, fordi Anlegg FA uten noen tiltak fungerer godt nok for temperaturer over  $10^{\circ}\text{C}$ .

### 4.3 K2599 Kulvertvegger

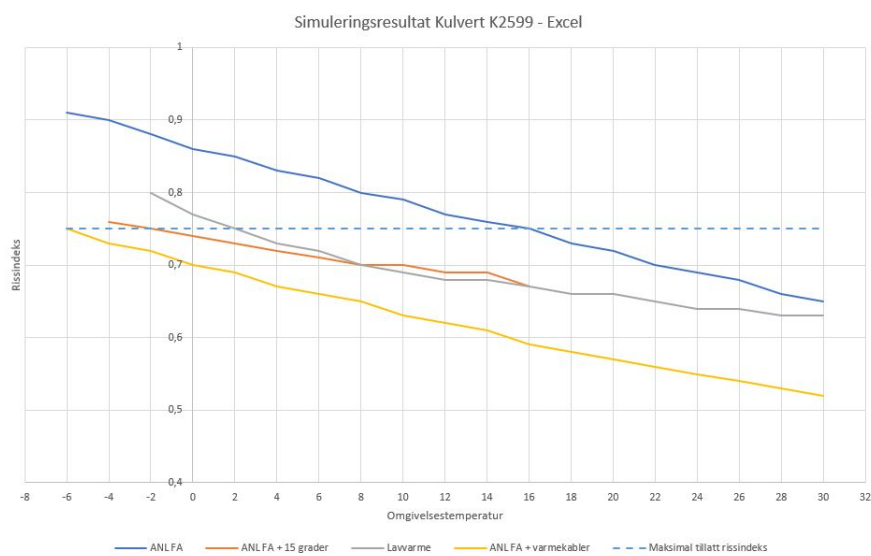
Geometrien til kulvert K2599 vil bli analysert for å få frem effekten større bunnplate har på rissindeksen. Geometrien på bunnplaten er  $0.450 \times 6.2\text{m}$  (hxb). Geometrien på veggene er  $3.275 \times 0.4$  (hxb). Geometrien er fremstilt i figur 4.4. Lengden på både veggene og bunnplata er 29.5m. [13]



FIGUR 4.4: Tverrsnitt betongkulvert K2599

### 4.3.1 Simulering i excel

Veggene i kulvert K2599 har bortimot samme mål som veggene i støttemur K35. Forskjellen er at størrelsen på fundamentet gjør at rissindeksen blir større for kulverten. Ved mindre forhold mellom tverrsnittarealene, vil fastholdingen øke og gi økt rissindeks.



FIGUR 4.5: Excel: Simuleringsresultat Kulvert K2599

Som grafene i figur 4.5 viser, vil det være nødvendig med herdetiltak inntil temperaturen er nær 16 °C. Det er derfor å anta at det kun vil være mulig noen måneder på sommerhalvåret.

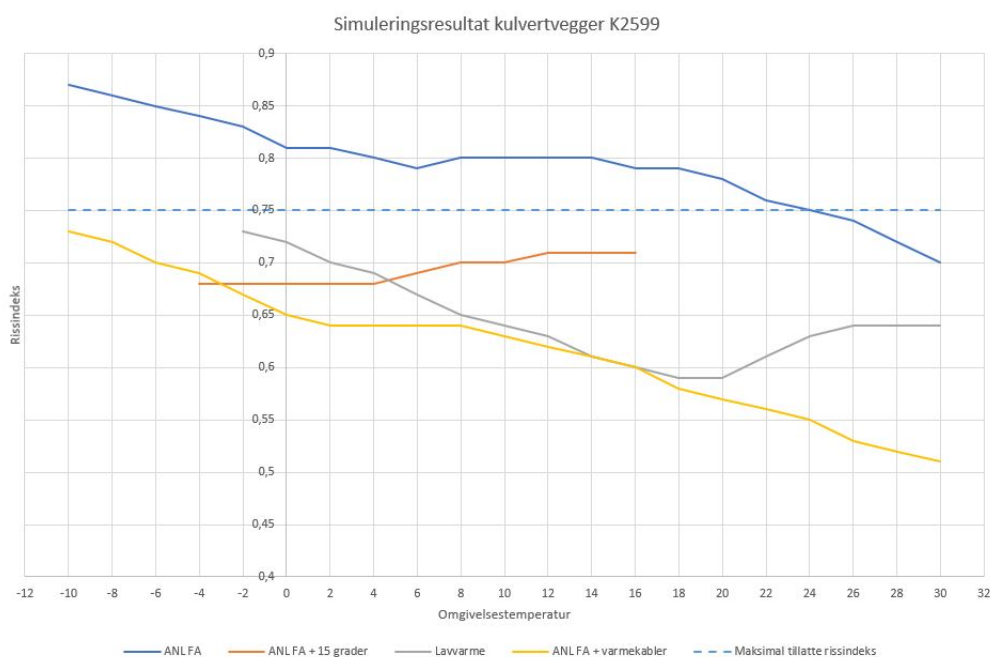
Ved å senke temperaturen på fersk betong til 15°C, reduseres spenningene i betongen betydelig. Det vil si at det kan støpes med anlegg FA ved omgivelsestemperaturer helt ned mot -1 °C. Det er derfor å anta at man klarer å holde seg innenfor grensen på 0.75 store deler av året på Vestlandet.

Lavvarmebetong gir lavere effekt enn betong med lavere fersktemperatur for temperaturer under 2 °C. For temperaturer over 2°C er rissindeksen under tillatt grense. Lavvarmebetong er et godt alternativ.

Det mest effektive tiltaket er å støpe inn varmekabler i bunnplata. Da senkes temperaturforskjellen mellom ny og gammel betong, noe som bidrar til mindre spenninger i betongen. Varmekablene gjør at rissindeksen er innenfor toleransen på 0.75 for alle temperaturer over -6°C.

### 4.3.2 Simulering i CrackTest COIN

Ved å se på graf 4.6 kommer det tydelig frem at det å kun bruke ANLFA vil fungere dårlig for alle temperaturer under 24 °C.



FIGUR 4.6: Simuleringsresultat kulvertvegger K2599

De resterende tiltakene som er simulert gir god effekt og holder rissindeksen under 0.75. Som vi ser så er tiltaket å bruke kaldere fersk betong et godt og gratis alternativ på vinteren. Det kan derimot ikke garanteres for dette på sommerhalvåret.

Kombinasjonen anlegg FA og varmekabler er det mest effektive tiltaket. Tiltaket gir stabilt synkende rissindeks med stigende temperaturer. Sammenlignet med lavvarmebetong som også har god effekt, kan varmekablene i bunnplata brukes to ganger, i og med at det skal støpes vegger på begge sider.

### 4.3.3 Kostnad

Det å holde faren for riss nede ved støp av denne kulverten trenger ikke å bli noen dyr affære. Det avhenger mer av hvilken risiko man ønsker å ta. Det vil si at man i utgangspunktet kan prise denne posten som at man bruker kaldere anlegg FA i konstruksjonen, og om fremdriften legger opp til sommerstøp så kan man se bort i fra tiltak og bruke ANL FA, eller bruke lavvarmebetong. Bruken av lavvarmebetong der det ikke er beskrevet i postgrunnlaget tas på egen regning. Kostnaden ved bruk av lavvarmebetong vil derfor være avgjørende. I byene trenger ikke lavvarmebetong føre med seg noe ekstra kostnad, ettersom tilgangen til FA er god. Ved å bruke mindre blandeverk uten kapasitet til å oppbevare disse mengdene med FA, vil betongen være dyrere.

En annen mulighet er å avgjøre tidlig å støpe inn varmekabler i bunnplata. På denne måten skaper man forutsigbar fremdrift, byggeledelsen bruker mindre tid på å analysere herdetiltak underveis og tiltaket holder rissindeksen under 0.75 for de aller fleste omgivelsestemperaturer. Det vil si at man kan spare tid, samt ha en viss forutsigbarhet. Det går med totalt 16 varmekabler med en lengde på 29.5m. Noe som tilsvarer totalt 472m varmekabel.

Tiltak	Sesong	Effekt	Laveste pris	Høyeste pris
Senke temperaturen på	Vinter	God	0	0
Lavvarmebetong	Sommer/vinter	God	0kr	22 014kr
Varmekabler	Sommer/vinter	God	21 004kr	58 764kr

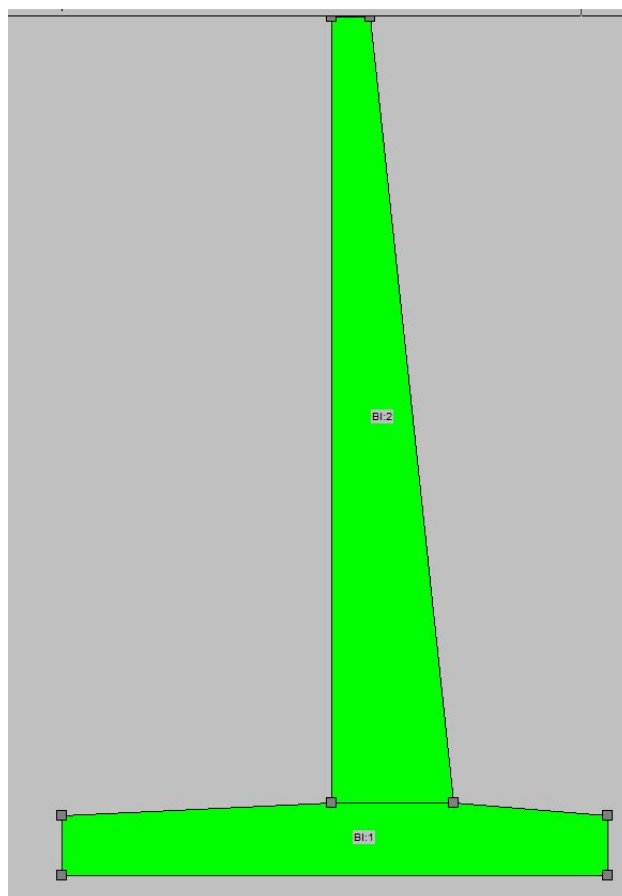
TABELL 4.3: Oversikt over kostnadene for herdetiltak for kulvert K2599

Det som omtales som høyeste kostnad er prisen som er oppgitt på ahlseil.no uten noe form for avtale. Lavest kostnad er prisen som det antas at entreprenører har tilgang til. En betongentreprenør vil som regel ha innkjøpsavtaler og gode rabatter i ulike butikker. Laveste pris kan også være lavere. Lavvarmebetong kan for eksempel leveres uten noen ekstra kostnad i de store byene, og potensielt koste ganske mye ekstra pr m<sup>3</sup> ved mindre blandeverk utenfor byene.



## 4.4 K2599 Støttemur Vest

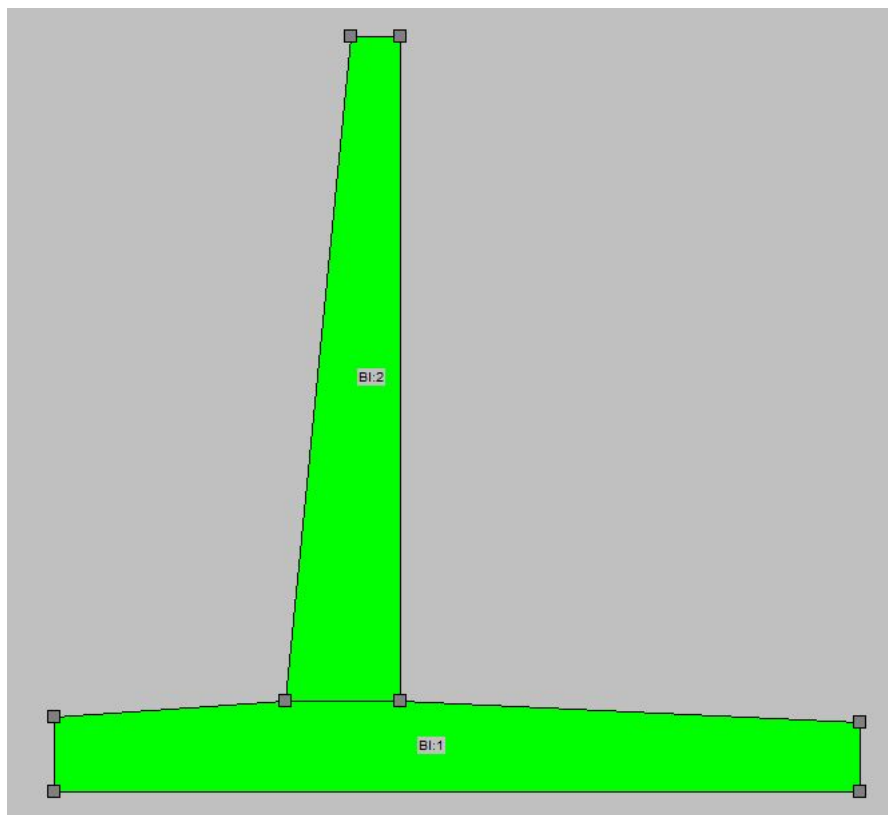
K2599 Støttemur Vest er det tverrsnittet som kan by på størst rissrisiko. Det har varierende høyder og tykkelser. Største tverrsnitt er 1.41m tykt i bunn, og rundt 10m høyt. Se illustrasjon 4.7 [13]



FIGUR 4.7: Største støttemurtverrsnitt K2599

Minste tverrsnitt vil i tillegg simuleres for å finne ut om tiltakene er de samme for hele konstruksjonen. Det minste tverrsnittet er 1,07m tykt i bunnen og 6.2m høyt. Begge tverrsnittene er tykkeste i bunnen, og ca 0.450m i toppen, der den ene veggflaten er skråstilt, som illustrert i 4.8. [13]

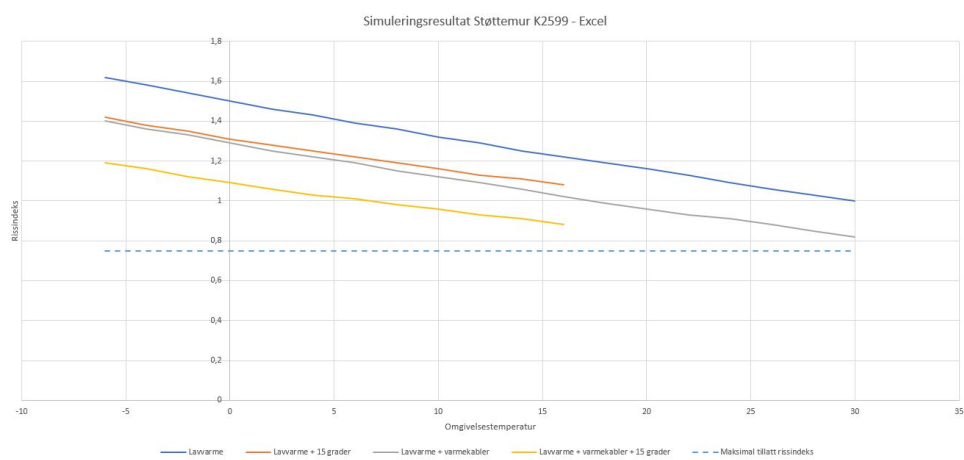
Stripefundamentet har 2 ulike dimensjoner. Endehøyden er 0.7m og midthøyden er 0.85m. Bredden på det største fundamentet er 7.5m. Denne bredden er kun for de 25 første meterene. Ellers er fundamentbredden konstant på 6.34m



FIGUR 4.8: Minste støttemurtverrsnitt K2599

#### 4.4.1 Simulering i excel

Fundamentet i K2599 bidrar til samme fastholding som bunnplata til kulverten. Den store pådriveren til rissindeksen i dette tverrsnittet er størrelse på veggen. Så bredt tverrsnitt vil ha mindre varmetap i senter, og derfor utvikle høy maks temperatur. Den høye maksimale temperaturen vil igjen føre til økte temperaturgradient som øker spenningene i betongtverrsnittet.



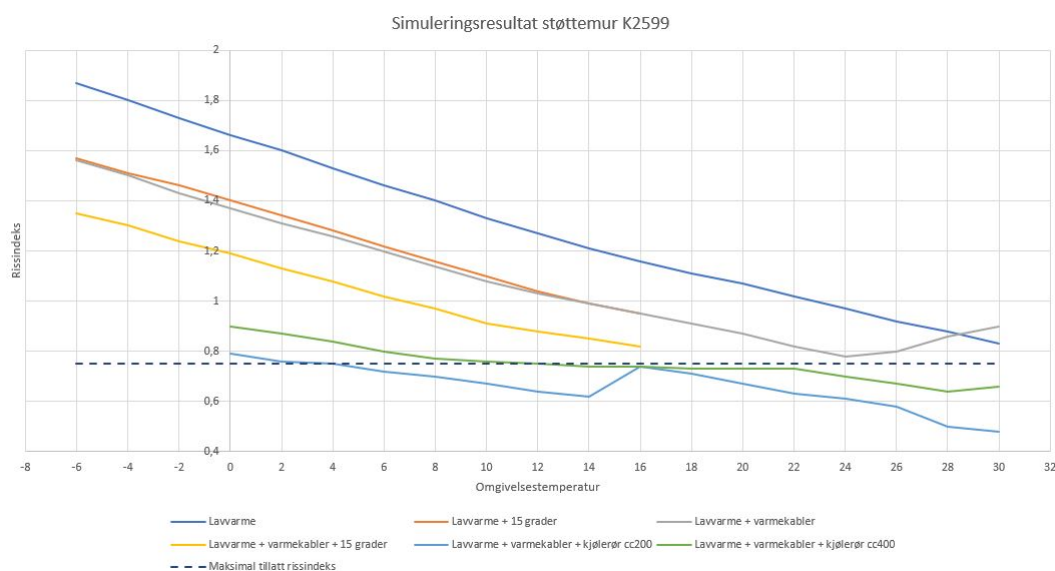
FIGUR 4.9: Excel: Simuleringsresultat Støttemur Vest K2599

Som vist i figur 4.9, er det ingen av de mindre herdetiltakene som senker rissindeksen tilstrekkelig. Det er i tillegg prøvd å kombinere 2 eller flere herdetiltak for å få rissindeksen under akseptabelt nivå. Herdetiltakene som gir størst effekt er lavvarmebetong, varmekabler og lavere fersk betong temperatur på 15 °C.

Det vil i dette tilfellet si at det er nødvendig med vannkjølt kjøleanlegg montert i den herdende vegg. Senteravstand mellom kjølerørene er ikke mulig å beregne i simuleringssarket i excel. Dette arket gir kun en indikasjon på om de rimelige tiltakene er tilstrekkelig gode nok.

#### 4.4.2 Simulering i CrackTest COIN

Resultatene for simulering av største tverrsnitt fra -6 til 30 °C er illustrert i figur 4.10.



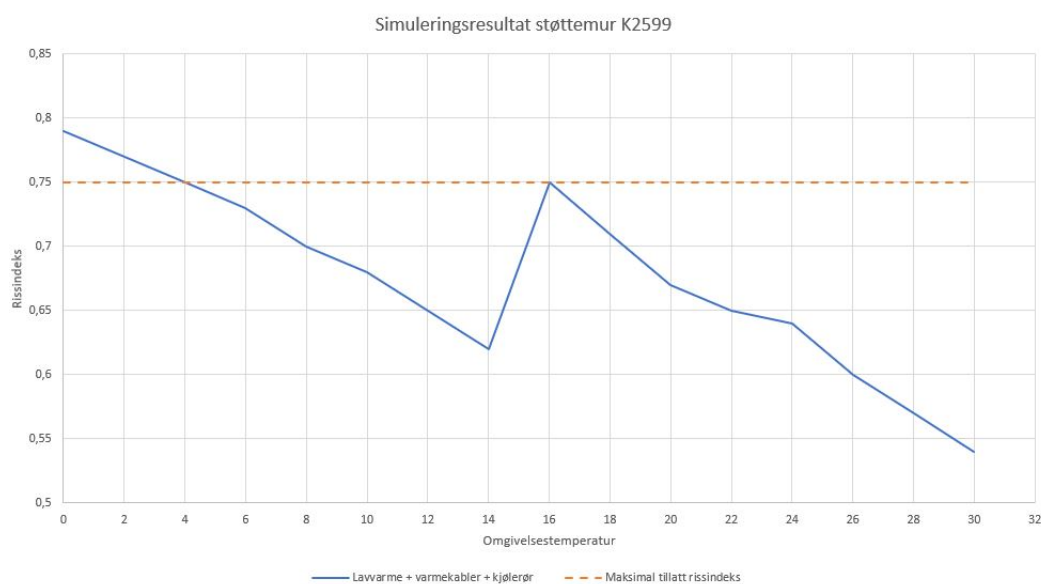
FIGUR 4.10: Simuleringsresultat støttemur K2599 - Største tverrsnitt

Som grafene i figur 4.10 viser, skal det en god del herdetiltak til for å holde rissindeksen under 0.75. Det er i dette massive tverrsnittet ingen enlige tiltak som er gode nok. Det er derfor krav til å kombinere tiltakene. Selv det å kombinere to herdetiltak ikke gir god nok effekt på rissindeksen. Den eneste kombinasjonen som gir god nok effekt er å kombinere lavvarmebetong, varmekabler i tilstøtende konstruksjon, fersk betong med temperatur på 15 °C og kjølerør i støpeavsnittet. Kjølerør med senter 400mm er kun tilstrekkelig ved omgivelsestemperaturer over 12 °C. Det bør derfor legges opp til senter 200mm mellom rørene i de fleste tilfeller.

Dette er et tverrsnitt som ikke bør støpes når været er på det kaldeste, fordi temperaturforskjellen mellom fundamentet og de massive veggene vil kunne bli for stor. Er

det slik at det må støpes ved kaldere temperaturer kan det være en mulighet å pumpe kaldere vann i kjølerørene eller planlegge for flere lag med varmekabler. Det bør også tas hensyn til at betongen ikke fryser før den har nådd trykkfasthet på 5 MPa, samt at vannforsyningen til kjøleanlegget ikke fryser.

For å finne ut om det er nødvendig med like strenge tiltak på hele lengden med støttemur, så er det også gjort simuleringer for minste tverrsnitt. Se figur 4.11



FIGUR 4.11: Simuleringsresultat støttemur K2599 - Minste tverrsnitt

Som grafen illustrerer, er det mulig å støpe denne etappen med kjølerør med senteravstand på 400mm og fortsatt være innenfor toleransene i rissindeksen. Dette gjelder for alle temperaturer over 4 °C. Grafen får et hopp ved 15°C fordi betongtemperaturen økes til 20°C.

#### 4.4.3 Kostnader

Som resultatene over viser, vil det være nødvendig å leie utstyr for å senke maksimal temperaturen i herdeprosessen ved alle støpeavsnittene. Det vil derfor være ønskelig å støpe så mye vegg som mulig, på kortest mulig tid for å spare leiekostnader på kjøleanlegget. Dette kan være vanskelig, fordi det er en del detaljer som skal støpes riktig, i tillegg til at forskalingen i mange tilfeller bør stå på i 7 dager.

Det er prosjektert lavvarmebetong i denne konstruksjonen, slik at dette herdetiltaket ikke vil medføre ekstra kostnad og heller ikke inngå i post 84.56.

Det skal totalt plasseres 16 varmekabler i bredden med senteravstand 400mm. På det største fundamenttverrsnittet skal det støpes inn 19 varmekabler i bredden.

<b>Tiltak</b>	<b>Antall kabler/rør</b>	<b>Laveste pris</b>	<b>Høyeste pris</b>
Varmekabler cc400	16 stk	12 000kr/m	31 760 kr/m
Kjølerør cc200	45 stk	2 350 kr/m	12 250 kr/m
<b>Totalt</b>		<b>2 702 kr/m</b>	<b>13 162 kr/m</b>

TABELL 4.4: Kostnadsoversikt for Støttemur vest K2599

Som tabell 4.3 viser ligger kostnaden på innstøpningsgods et sted mellom 2 702-13 162 kr/m. I tillegg vil det komme kostnader på arbeid med innfesting og innstøping av varmekabler og kjølerør, samt leie av kjøleanlegg.

Det vil si at kostnaden for denne støttemuren totalt sett kan komme til å ha en kostnad langt høyere enn Kulvert K2599 og støttemur K35.

<b>Tiltak</b>	<b>Mengde</b>	<b>Enhet</b>	<b>Laveste kostnad</b>	<b>Høyeste kostnad</b>
Varmekabler cc400mm	1536	m	33 792kr	87 552kr
Montering av varmekabler	1536	m	34 560kr	103 680kr
Kjølerør cc200	4320	m	216 000kr	1 166 400
Montering av kjølerør	4320	m	97 200kr	291 600kr
Diverse materiell for innfestning	5856	m	29 280kr	146 400kr
Leie av kjøleanlegg	4	mnd	120 000kr	200 000kr
<b>Totalt</b>			<b>530 832kr</b>	<b>1 995 632kr</b>

TABELL 4.5: Kostnad for støttemur K2599

Tabell 4.5 viser at om entreprenørene ikke har nok kunnskap om emnet og priser herdetiltakene feil finnes det stor risiko for å tape mye penger på denne posten uten at entreprenørene har vært klar over risikoen.

## Kapittel 5

# Diskusjon

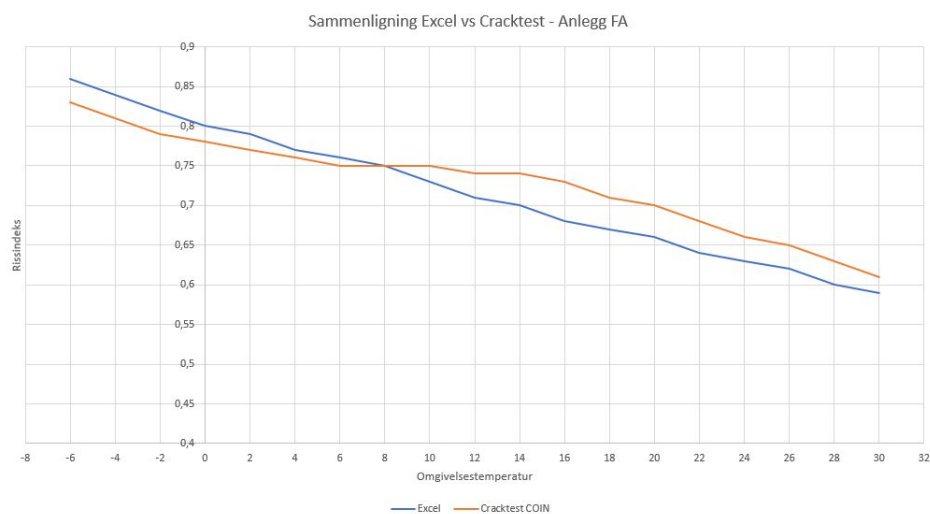
### 5.1 Sammenligning Excel vs CrackTest COIN

Simuleringsarket i excel vil aldri bli like nøyaktig som simuleringen i Cracktest COIN. Målet er at det skal være nøyaktig nok i en tilbudsfase, pluss en sikkerhetsmargin. Det er bedre at det er konservativt, slik at det beregnes for mye herdetiltak, enn for lite. Under vil resultatene fra excel og CrackTest COIN sammenlignes.

#### 5.1.1 Støttemur K35

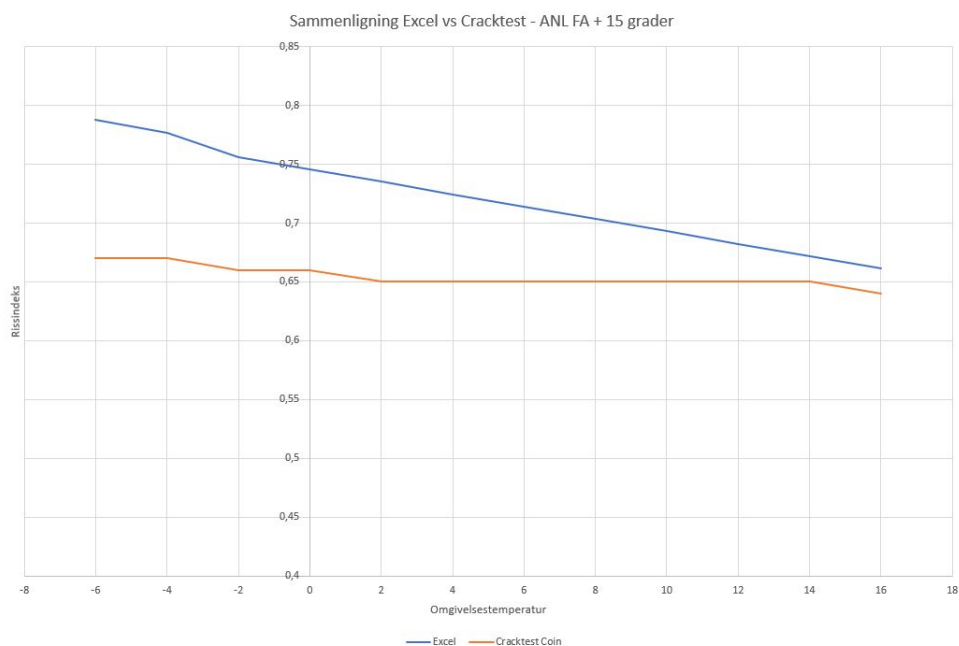
Som figur 5.1 under viser, er simuleringsresultatene veldig like hverandre. Excel er mer konservativ enn Cracktest for alle verdier over 0.75 før den krysser grafen for Cracktest ved 0.75 og er mindre konservativ.

Det vil si at resultat for både excel og Cracktest tilsier at det ikke er nødvendig med ekstra herdetiltak for temperaturer over 8°C.



FIGUR 5.1: Støttemur K35: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Anlegg FA

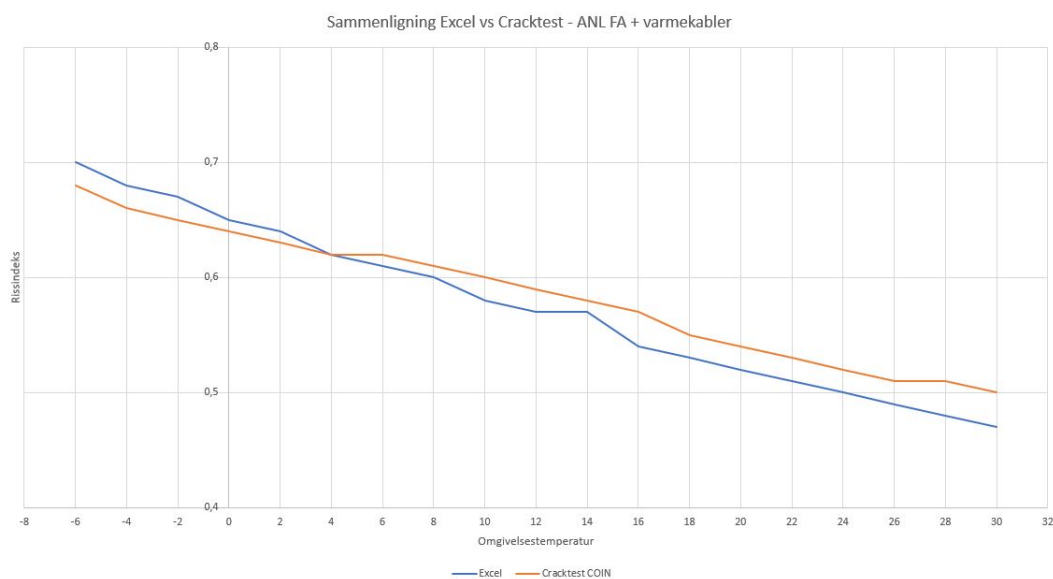
Det å senke temperaturen på fersk betong til 15 °C kan for dette tverrsnittet vær ganske effektivt. Fra figur 5.2 kan vi se at excel har en mer lineær tilnærming. Resultat fra excel er i tillegg ganske konservativt. Man kan derfor risikere å prise feil, fordi risikobilde er feil. I dette tilfellet er resultatene for Cracktest COIN under 0.75 for alle omgivelsestemperaturer fra -6 til 30 °C. Resultatene fra excel kommer seg derimot ikke under 0.75 før temperaturene er -1 °C og oppover. I dette tilfellet kan det derfor hende at det prises inn ekstra herdetiltak med tanke på vinterstøp, selv om det ikke er nødvendig.



FIGUR 5.2: Støttemur K35: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Anlegg FA + 15 grader

Simuleringsresultatene fra excel og Cracktest COIN følger noenlunde samme løp ved bruk av ANL FA + varmekabler. Excel er mer konservativ enn Cracktest for temperaturer under  $4^{\circ}\text{C}$ , før grafene krysses. Som det kommer frem av figur 5.3, så er alle resultatene fra  $-6$  til  $30^{\circ}\text{C}$  under grensen på 0.75. Det vil si at varmekabler som herdetiltak i dette tilfellet fungerer svært godt, og gjør at det kan støpes hele året. Det vil derfor gi forutsigbar drift.

Det som er haken med varmekabler, er at det må planlegges. Varmekablene må som sagt støpes inn i konstruksjonen det skal støpes mot. Denne konstruksjonen støpes ofte god tid i forveien, og man bør derfor ha klart for seg hvilke støpe-etapper som kan stå i fare for å komme i konflikt med kaldere vær. Man kan i noen tilfeller komme til å støpe inn varmekabler som strengt tatt ikke er nødvendige.



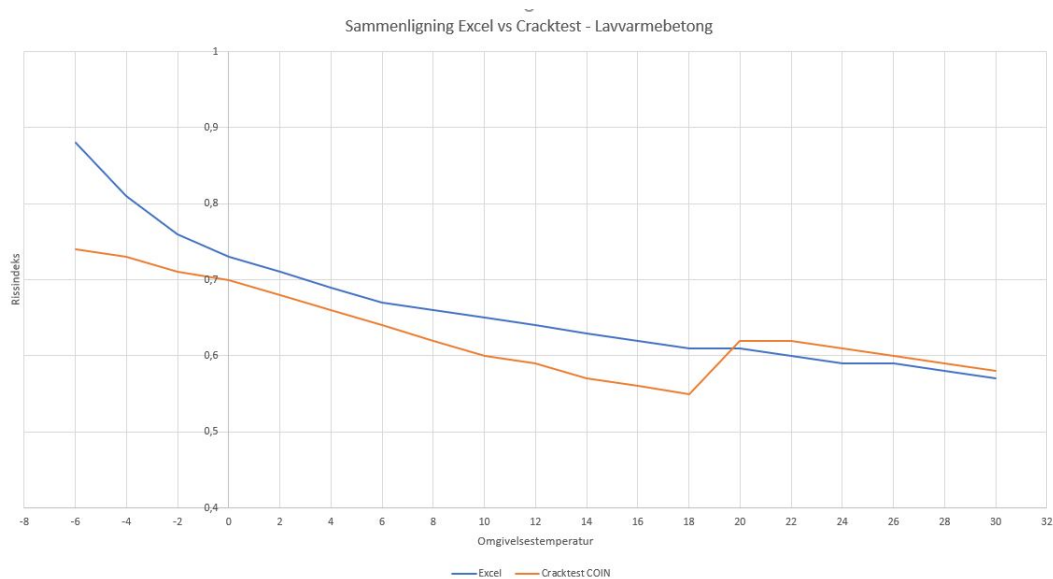
FIGUR 5.3: Støttemur K35: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Anlegg FA + Varmekabler

Effekten av lavvarmebetong er størst i resultatene fra Cracktest COIN. Resultatene fra excel er på sin side mer konservative. Noe av dette kommer av at noen av betongparametrene er ulike, og derfor gjør at maksimaltemperaturen i tverrsnittet blir for høyt ved minusgrader. Dette har med forskjellen i den danske og svenske modellen ved simulering av varmeutvikling. I følge resultatene fra excel vil ikke rissindeksen komme under 0.75 før omgivelsestemperaturen er over  $-2^{\circ}\text{C}$ , noe som står i kontrast til Cracktest COIN der rissindeksen er under 0.75 for alle temperaturer over  $-6^{\circ}\text{C}$ .

I Stavanger-regionen vil lavvarmebetong komme uten ekstra kostnad, og det vil derfor være et helgodt alternativ. For enda større effekt er det mulig å senke fersk betongtemperaturen til  $15^{\circ}\text{C}$ , også for lavvarmebetong. Det må derimot gjøres med forsiktighet ved minus grader, fordi det da er fare for at betongen fryser før den har nådd 5 MPa.



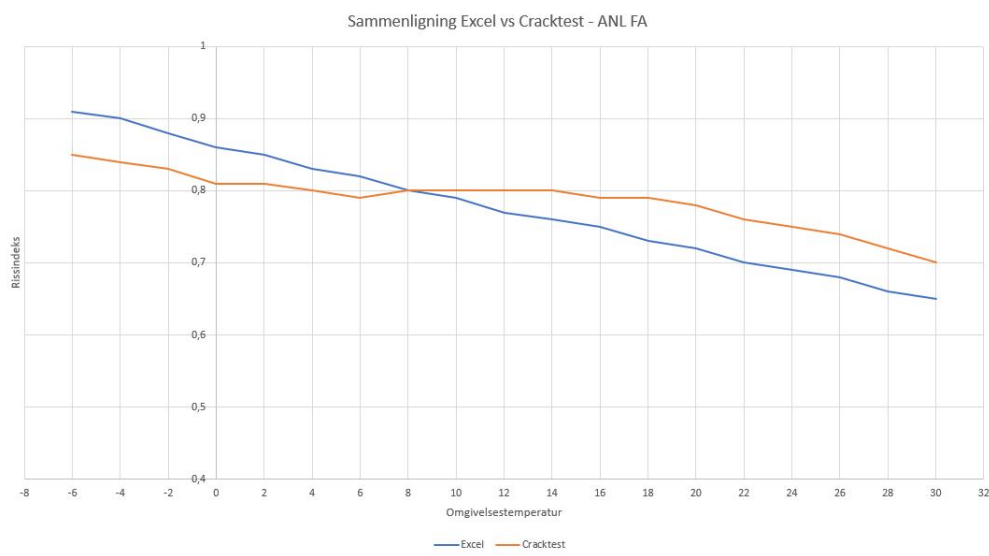
Dette er spesielt risikabelt ved bruk av lavvarmebetong, fordi den utvikler mindre varme og derfor har en tregere fasthetsutvikling.



FIGUR 5.4: Støttemur K35: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Anlegg FA + 16 % FA (Lavvarme)

### 5.1.2 Kulvert K2599

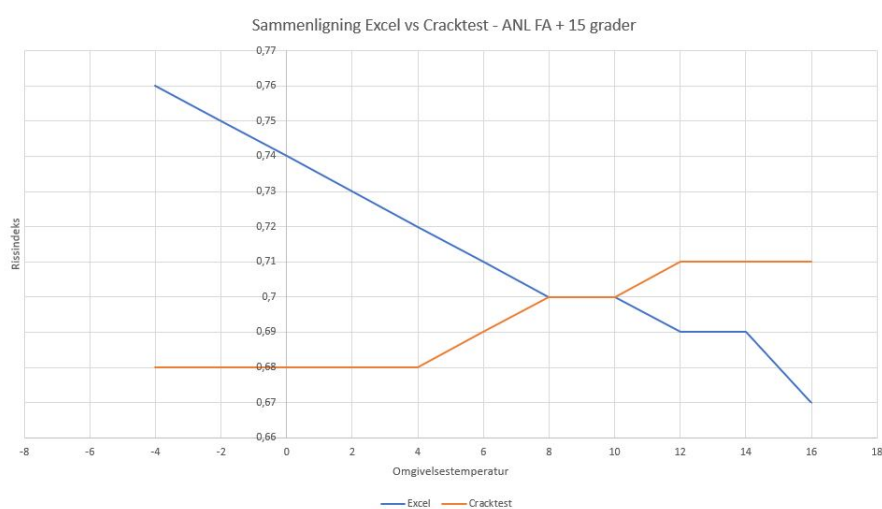
Simuleringsresultatene i figur 5.5 viser at rissindeksen simulert i excel følger en mer lineær kurve enn resultatene fra Cracktest COIN. Dette medfører at excel er mer konservativ frem til ca 8°C før den er mindre konservativ. Dette kan medføre at det dannes et feil bilde av når det er nødvendig med herdtiltak, i og med at Cracktest COIN ikke oppnår en rissindeksen innenfor toleransene før temperaturen er over 26°C. Sammenlignet med resultatene fra excel som beregner rissindeksen innenfor toleransene ved temperaturer over 16°C.



FIGUR 5.5: Kulvert K2599: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Anlegg FA

Grafene i figur 5.6 følger to ganske forskjellige kurver. Resultatene fra excel følger som vanlig en mer lineærkurve grunnet forenklete formler. Rissindeksen er i tillegg synkende for resultatene fra excel. Resultatene fra Cracktest COIN på sin side ligger stabilt rundt 0.68 frem til 4 °C før rissindeksen øker med økende omgivelsestemperaturer.

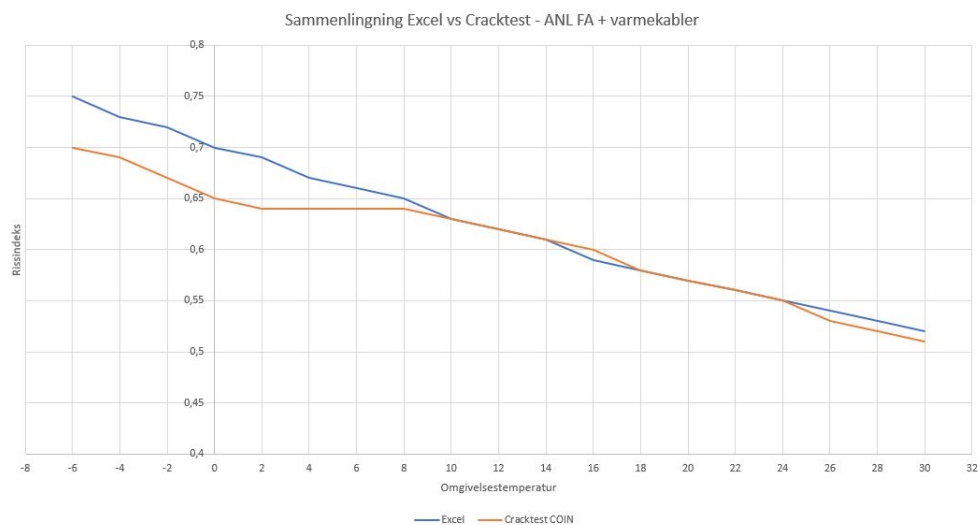
Begge simuleringene holder seg under rissindeksen lik 0.75 for temperaturer over  $-2^{\circ}\text{C}$ . Det kan være hensiktsmessig å sammenligne resultatene med  $15^{\circ}\text{C}$  betongtemperatur med  $20^{\circ}\text{C}$  betongtemperatur, for å finne ut om det er tilstrekkelig.



FIGUR 5.6: Kulvert K2599: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Anlegg FA + 15 grader

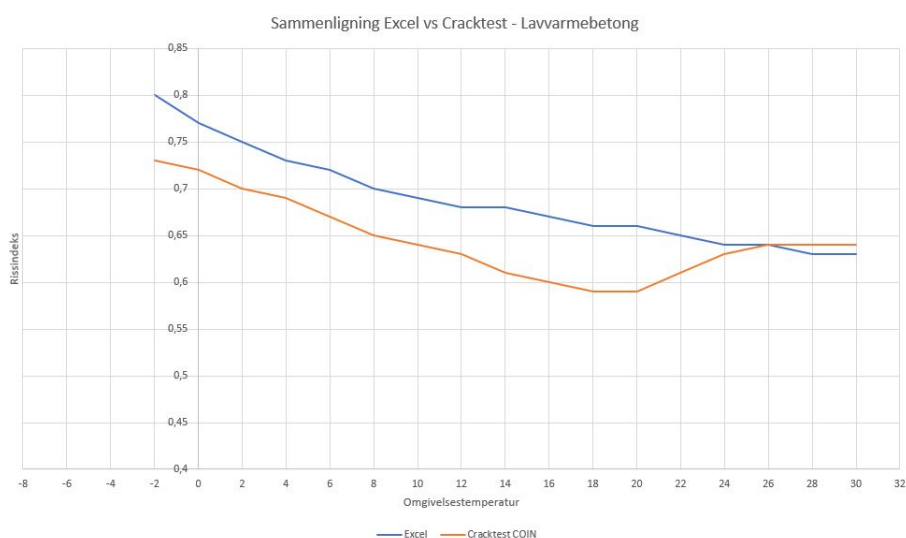
Som figur 5.7 indikerer så holdes rissindeksen under 0.75 for temperaturene  $-6$  til  $30^{\circ}\text{C}$  både i excel og Cracktest. Forløpet til rissindeksen simulert i excel er på sin side mer

konservativt enn resultat fra CrackTest COIN. Det vil derfor være en billig forsikring å støpe inn varmekabler i bunnplata for å holde fremdriften til prosjektet, i tilfelle kaldt vær.



FIGUR 5.7: Kulvert K2599: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Anlegg FA + varmekabler

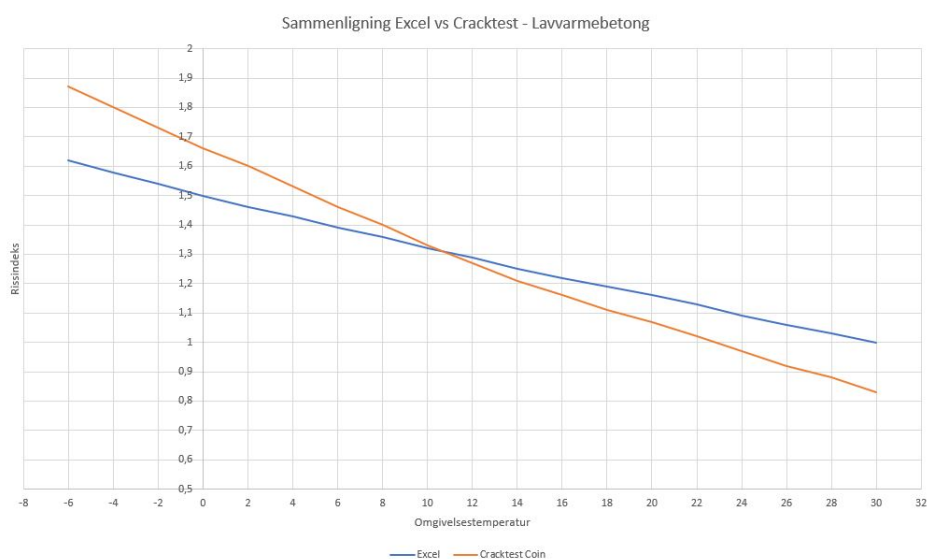
Sammenlignet med ANL FA er lavvarmebetong effektivt. Rissindeksen holdes under 0.75 for omgivelsestemperaturer over 4°C for simuleringen i excel. Det vil si at det vil være naturlig å legge til noen ekstra tiltak på vinteren. Rissindeksen fra CrackTest COIN holder seg innefor toleransen for omgivelsestemperaturer fra -6 til 30°C. Som vi ser i figur 5.8 er resultatet fra excel ganske konservativt i forhold til CrackTest COIN, noe som gjør at denne konstruksjonens herdetiltak i mange tilfeller kan bli overpriset.



FIGUR 5.8: Kulvert K2599: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Anlegg FA + 16 % FA (Lavvarme)

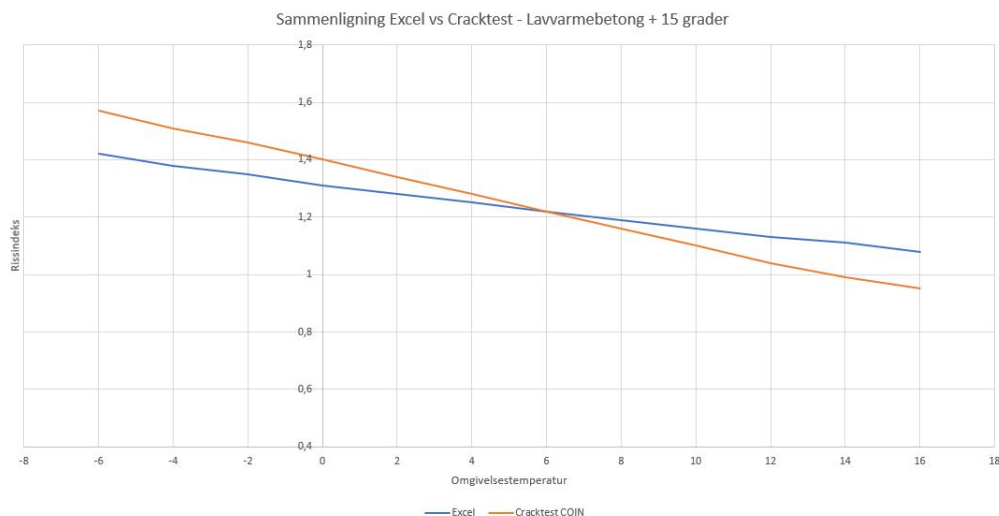
### 5.1.3 Støttemur K2599

I og med at lavvarmebetong er tiltenkt denne konstruksjonen er det unødvedning å simulere med ANL FA. I figur 5.8 kommer det klart frem at lavvarme ikke er effektivt nok til å holde rissindeksen under grensen på 0.75. Grafen for rissindeks simulert i Cracktest COIN har et større stigningstall enn excel. Derfor er rissindeksen større for Cracktest COIN frem til 13 °C, før kurvene krysser hverandre. I og med at rissindeksen uansett er over grensen, vil det ikke få noen økonomisk konsekvens at excel har mindre stigningstall enn CrackTest COIN.



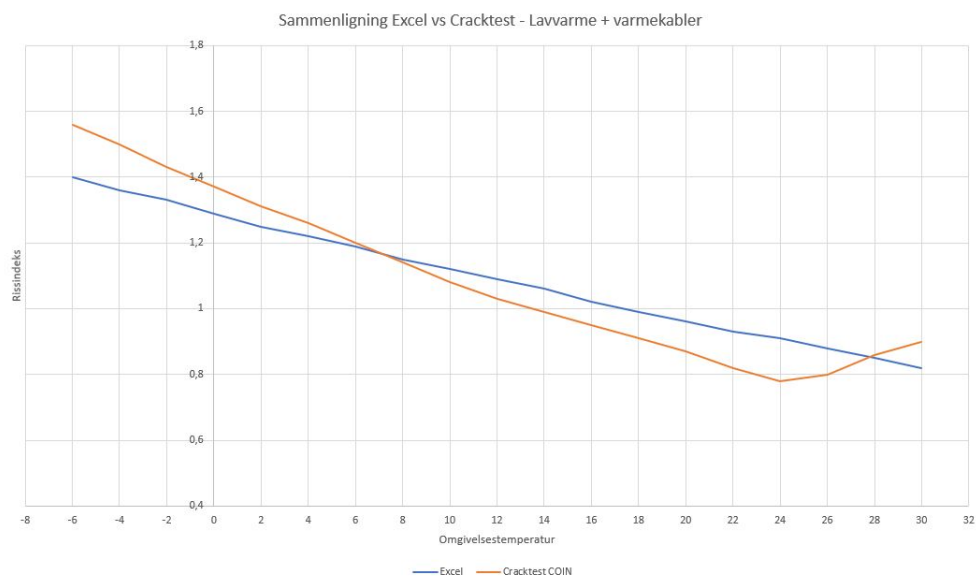
FIGUR 5.9: Støttemur K2599: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Lavvarme

Ved å bruke lavvarme og senke fersk betongtemperaturen til 15°C, vil stigningstallet være jevnere, som illustrert i figur 5.10. Excel vil også i dette tilfellet ligge under CrackTest COIN frem til omgivelsestemperaturen ligger rundt 7 °C, før kurvene krysser hverandre. Dette herdetiltaket tilfredstiller ikke i seg selv kravene, så forskjellen i rissindeks vil ikke få en økonomisk konsekvens.



FIGUR 5.10: Støttemur K2599: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Lavvarme + 15 grader

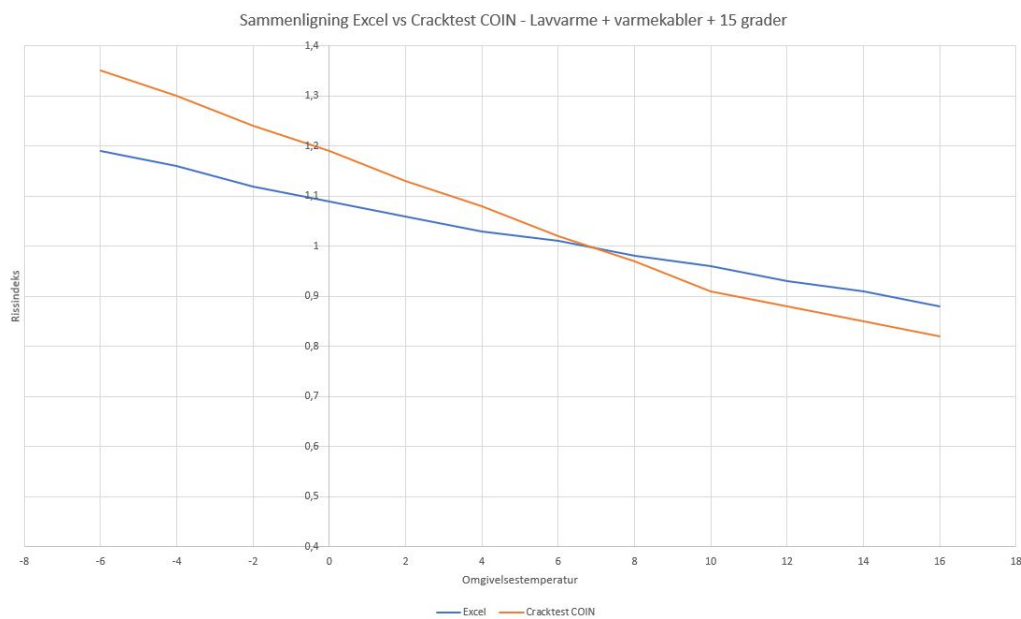
Figur 5.11 illustrerer forløpet til rissindeks for lavvarmebetong med varmekabler støpt inn i fundamentet. Disse herdetiltakene er ikke tilstrekkelig nok for å senke rissindeksen under 0.75. Rissindeksen simulert i excel er mindre enn indeksen simulert i Cracktest COIN frem til 7°C og det kan se ut som lavere betongvarme og varmekabler bidrar cirka like mye for å senke spenningene i betongen.



FIGUR 5.11: Støttemur K2599: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Lavvarme + varmekabler

Figur 5.12 illustrer rissindeksen for excel og Cracktest COIN simulert med lavvarmebetong, varmekabler i fundamentet, samt 15°C temperatur på fersk betongen. Som det kommer frem vil også resultatene fra excel ligge under resultatene fra Cracktest COIN

frem til 7 °C. I denne simuleringen er det gjort tre herdetiltak i samme støp, men rissindeksen er fortsatt over toleransene. Vi kan se at tiltakene har effekt, og at rissindeksen er redusert sammenlignet med resultatene over med to herdetiltak.



FIGUR 5.12: Støttemur K2599: Sammenligning Excel vs Cracktest COIN - Lavvarme + varmekabler + 15 grader

Det er per dags dato ikke mulig å simulere nedkjøling av betongen med kjølerør i Excel. I og med at det er mulig å simulere de andre tiltakene er det tenkt slik at om ingen av de andre tiltakene fungerer sammen, må posten prises med forbruksmateriell som kjølerør og leie av kjøleanlegg.

## Kapittel 6

# Konklusjon

### 6.1 Kostnad

Ved å sammenligne resultatene fra excel og Cracktest COIN er det mulig å finne ut hvilke herdetiltak som er nødvendig ved typiske temperaturer i løpet av et år i Stavanger. Utenom kostnaden til herdetiltak må kostnaden ved å montasje og innkjøp av temperaturfølere prises i posten, i tillegg til tidsforbruk ved å simulere og dokumentere temperaturforløpet og rissindeks. I tillegg må kostnaden med innkjøp av lisens til godkjent simuleringsprogram inkludert testing og dokumentasjon på eksakte materialdata fordeles på alle konstruksjonsdelene.

**Støttemur K35** I tabell 6.1 under er det sammenlignet hvilke tiltak som må utføres med normaltemperaturer i Stavanger hentet fra yr.no. Som det kommer frem i tabellen, kreves det at temperaturen på fersk betong er 15 °C for Mai og Oktober. Det vil ikke bety noe kostnadskonsekvens, i og med at gjennomsnittstemperaturen for Mai og Oktober er henholdsvis 10.3 og 8.7°C. Ved disse omgivelsestemperaturene skal det ikke være noen form for problem og få levert betong på 15°C. Man ser i tabell 6.1, at beregningene i excel burde vært mer konservative når det kommer til vanlig anlegg FA betong, fordi en slik forskjell i herdetiltak fort kunne ført til en større kostnad, dersom tiltaket hadde hatt en kostnad.

K35		Excel			Cracktest COIN			Differanse	
Måned	Normaltemperatur	Tiltak	Laveste	Høyeste	Tiltak	Laveste	Høyeste	Laveste	Høyeste
Januar	2.5	Fersk betong 15 grader	0	0	Fersk betong 15 grader	0	0	0	0
Februar	1.8	Fersk betong 15 grader	0	0	Fersk betong 15 grader	0	0	0	0
Mars	3.6	Fersk betong 15 grader	0	0	Fersk betong 15 grader	0	0	0	0
April	6.8	Fersk betong 15 grader	0	0	Fersk betong 15 grader	0	0	0	0
Mai	10.3	Ingen	0	0	Fersk betong 15 grader	0	0	0	0
Juni	13	Ingen	0	0	Ingen	0	0	0	0
Juli	15.4	Ingen	0	0	Ingen	0	0	0	0
August	15.5	Ingen	0	0	Ingen	0	0	0	0
September	12.7	Ingen	0	0	Ingen	0	0	0	0
Oktober	8.7	Ingen	0	0	Fersk betong 15 grader	0	0	0	0
November	5.7	Fersk betong 15 grader	0	0	Fersk betong 15 grader	0	0	0	0
Desember	3.2	Fersk betong 15 grader	0	0	Fersk betong 15 grader	0	0	0	0

TABELL 6.1: Kostnadssammenligning mellom Excel og Cracktest COIN for Støttemur K35

I og med at rissindeks er nytt for mange entreprenører, er det fort gjort lett at en så lang støttemur blir priset for høyt. Herdetiltak for en støttemur på over 400m blir veldig dyrt om en priser varmekabler cc 400mm for hele strekningen. Spesielt med tanke på at alle herdetiltakene som er nødvendig er gratis. Det kan i verste fall være det som gjør at en entreprenør ikke får jobben.

### Kulvert K2599

I tabell 6.2 er resultatene fra excel og Cracktest COIN sammenlignet. Det er både herdetiltakene og den økonomiske kosten som er sammenlignet. Som tabellen viser er det de samme herdetiltakene som er nødvendig for både excel og Cracktest for månedene Januar-Desember. Dette gjelder gjennomsnittstemperaturer fra Stavanger hentet fra yr.no. Man kan se at i sommermånedene juni, juli og august er nødvendig med lavvarmebetong. Dette kan by på ekstra kostnad på mindre tettsteder hvor oppbevaring av ekstra flygeaske ikke er mulig på blandeverket. I Stavanger-regionen regnes dette tiltaket til 0 kr. Dette kommer av oppbevaringskapasiteten er god, men også at sement er dyrere enn flygeaske slik at besparelsen til blandeverket er større.

K2599 Kulvert		Excel			Cracktest COIN			Differanse	
Måned	Normaltemperatur	Tiltak	Laveste	Høyeste	Tiltak	Laveste	Høyeste	Laveste	Høyeste
Januar	2.5	Fersk betong 15 grader	0	0	Fersk betong 15 grader	0	0	0	0
Februar	1.8	Fersk betong 15 grader	0	0	Fersk betong 15 grader	0	0	0	0
Mars	3.6	Fersk betong 15 grader	0	0	Fersk betong 15 grader	0	0	0	0
April	6.8	Fersk betong 15 grader	0	0	Fersk betong 15 grader	0	0	0	0
Mai	10.3	Fersk betong 15 grader	0	0	Fersk betong 15 grader	0	0	0	0
Juni	13	Lavvarme	0	22020	Lavvarme	0	22020	0	0
Juli	15.4	Lavvarme	0	22020	Lavvarme	0	22020	0	0
August	15.5	Lavvarme	0	22020	Lavvarme	0	22020	0	0
September	12.7	Fersk betong 15 grader	0	0	Fersk betong 15 grader	0	0	0	0
Oktober	8.7	Fersk betong 15 grader	0	0	Fersk betong 15 grader	0	0	0	0
November	5.7	Fersk betong 15 grader	0	0	Fersk betong 15 grader	0	0	0	0
Desember	3.2	Fersk betong 15 grader	0	0	Fersk betong 15 grader	0	0	0	0

TABELL 6.2: Kostnadssammenligning mellom Excel og Cracktest COIN for Kulvert K2599



## Støttemur K2599

Som illustrert i tabell 6.3 er det i hovedsak senteravstanden mellom kjølerørene som er forskjellig fra excel og Cracktest COIN. I og med at det ikke er lagt opp til simulering med kjølerør i excel, vil mengden kjølerør bli en antagelse. I og med at alle resultatene fra excel var over grensen på 0.75, ble det antatt kjølerør med senteravstand på 400 i stedet for 500mm for å være litt konservative, i tillegg ble det tiltenkt varmekabler i fundamentet med cc400mm. Som resultatene fra Cracktest COIN viser, er ikke dette tilstrekkelig. Det vil si at rissindeksen først kommer under 0.75 med senteravstand lik 200mm mellom kjølerørene. Dette tilsvarer totalt 22 ekstrarør i høyden, noe som tar med seg en betydelig ekstra kostnad uansett når på året det støpes. Selve månedsleien på kjøleanlegget er ikke inkludert i kostnadene i tabell 6.3. Dette kommer av at leieperioden er avhengig av hvilken fremdrift det er lagt opp til. Det samme gjelder kostnaden med å rengjøre og støpe igjen kjølerørene.

K2599 Støttemur		Excel			Cracktest COIN			Differanse	
Måned	Normaltemperatur	Tiltak	Laveste	Høyeste	Tiltak	Laveste	Høyeste	Laveste	Høyeste
Januar	2.5	Kjølerør cc400 + varmekabler	247 152	1 030 032	Kjølerør cc200 + varmekabler	410 832	1 795 632	-163 680	-765 600
Februar	1.8	Kjølerør cc400 + varmekabler	247 152	1 030 032	Kjølerør cc200 + varmekabler	410 832	1 795 632	-163 680	-765 600
Mars	3.6	Kjølerør cc400 + varmekabler	247 152	1 030 032	Kjølerør cc200 + varmekabler	410 832	1 795 632	-163 680	-765 600
April	6.8	Kjølerør cc400 + varmekabler	247 152	1 030 032	Kjølerør cc200 + varmekabler	410 832	1 795 632	-163 680	-765 600
Mai	10.3	Kjølerør cc400 + varmekabler	247 152	1 030 032	Kjølerør cc200 + varmekabler	410 832	1 795 632	-163 680	-765 600
Juni	13	Kjølerør cc400 + varmekabler	247 152	1 030 032	Kjølerør cc200 + varmekabler	410 832	1 795 632	-163 680	-765 600
Juli	15.4	Kjølerør cc400 + varmekabler	247 152	1 030 032	Kjølerør cc200 + varmekabler	410 832	1 795 632	-163 680	-765 600
August	15.5	Kjølerør cc400 + varmekabler	247 152	1 030 032	Kjølerør cc200 + varmekabler	410 832	1 795 632	-163 680	-765 600
September	12.7	Kjølerør cc400 + varmekabler	247 152	1 030 032	Kjølerør cc200 + varmekabler	410 832	1 795 632	-163 680	-765 600
Oktober	8.7	Kjølerør cc400 + varmekabler	247 152	1 030 032	Kjølerør cc200 + varmekabler	410 832	1 795 632	-163 680	-765 600
November	5.7	Kjølerør cc400 + varmekabler	247 152	1 030 032	Kjølerør cc200 + varmekabler	410 832	1 795 632	-163 680	-765 600
Desember	3.2	Kjølerør cc400 + varmekabler	247 152	1 030 032	Kjølerør cc200 + varmekabler	410 832	1 795 632	-163 680	-765 600

TABELL 6.3: Kostnadsammenligning mellom Excel og Cracktest COIN for Støttemur K2599

Som det kommer frem av tabell 6.3 er differansen mellom excel og Cracktest COIN i beste fall på -163 680kr og i verste fall -765 600kr. Forskjellen mellom verste og beste fall kommer av innkjøpsavtaler, altså innkjøp av varmekabler og kjølerør, samt materiell for innfesting. I tillegg til dette kommer variabelen for hvor lang tid det tar å montere 1m kjølerør og varmekabel. I begge tilfeller er det tenkt at det i beste fall tar 0,05 timer/meter å montere og kontrollere at rørene er tette og at det i verste fall tar 0,15timer/meter. Arbeidsoppgaven er repetitiv, og det er derfor naturlig at tidsforbruken går ned.

### 6.1.1 Simuleringsoppsett

Regnearket i excel måtte til slutt deles inn i ni ulike filer som er linket sammen. En fil med alt samlet var for stor til at excel hadde mulighet til å kjøre den. Selv om filstørrelsen ble redusert ved å dele inn i ark, var det fortsatt store mengder data som skulle regnes ut. Jeg vil derfor si at det i utgangspunktet burde vært brukt en programvare som matlab.

Grunnet excels tilgjengelighet, så ble allikevel oppsettet laget i excel. Ved å simulere i en dimensjon, går antall utregninger kraftig ned og det samme gjør størrelsen på regnearket. Det bør derfor i fremtiden gjøres et forsøk på om en dimensjonale utregninger er tilfredstillende nok.

Videre er det å beregne fastholding og slipp i betongen komplisert. De forenklede formelene som tar for seg forholdet mellom ny og gammel betong stemmer svært dårlig når veggen blir veldig bred og høy. Mulighetene for å bruke bestemte verdier for slip når forholdet øker bør utforskes i videre arbeid. Det bør i tillegg legges til en formel som deler vegger med ulik tykkelse inn i passende kvadranter. Slik at det ikke bare er en standard inndeling for både tynne og tykke vegger. Blir inndelingen for stor går nøyaktigheten ned. excelfilen klarer ikke å beregne vegger som er tynnere enn 430mm, fordi beregningene mellom kvadrantene blir feil med for små kvadranter. Generelt sett visere resultatene at temperaturdifferansen mellom Cracktest COIN og excel er  $\pm 2$  °C, noe som må sies å være stabilt nok for en slik tidligfase beregning av rissindeks.

## Tillegg A

# Simuleringsresultat K2599 Støttemur

### A.1 Simuleringsresultat med inngangsparametere

Navn	Betongtype	Betongtemp	Lte temp	Fastholding	Vind	Forskaling	Varmekabler	Avforskaling	Rissindeks Cracktest	Rissindeks Excel	Maks Temp Cracktest	Maks Temp Excel
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	-6	0.25		2 15mm	Nei	7	1,87	1,62	40,6	39,2
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	-4	0.25		2 15mm	Nei	7	1,8	1,58	41,2	40,1
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	-2	0.25		2 15mm	Nei	7	1,73	1,54	41,8	41
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	0	0.25		2 15mm	Nei	7	1,66	1,5	42,5	41,9
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	2	0.25		2 15mm	Nei	7	1,6	1,46	43,3	42,8
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	4	0.25		2 15mm	Nei	7	1,53	1,43	44	43,8
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	6	0.25		2 15mm	Nei	7	1,46	1,39	44,8	44,8
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	8	0.25		2 15mm	Nei	7	1,4	1,36	45,6	45,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	10	0.25		2 15mm	Nei	7	1,33	1,32	46,4	46,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	12	0.25		2 15mm	Nei	7	1,27	1,29	47,3	47,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	14	0.25		2 15mm	Nei	7	1,21	1,25	48,2	48,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	16	0.25		2 15mm	Nei	7	1,16	1,22	49,1	49,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	18	0.25		2 15mm	Nei	7	1,11	1,19	49,9	50,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	20	0.25		2 15mm	Nei	7	1,07	1,16	50,8	51,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	22	0.25		2 15mm	Nei	7	1,02	1,13	51,75	52,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	24	0.25		2 15mm	Nei	7	0,97	1,09	52,7	53,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	26	0.25		2 15mm	Nei	7	0,92	1,06	53,6	54,6
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	28	0.25		2 15mm	Nei	7	0,88	1,03	54,5	55,6
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	30	0.25		2 15mm	Nei	7	0,83	1	55,5	56,6

FIGUR A.1: Simuleringsresultat for K2599 Støttemur - Lavvarmebetong

Navn	Betongtype	Betongtemp	Ute temp	Fastholding	Vind	Forskaling	Varme kabler	Avforskaling	Rissindeks Cracktest	Rissindeks Excel	Maks Temp Cracktest	Maks Temp Excel
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	-6	0.25	2	15mm	Nei	7	1,57	1,42	33,5	31,8
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	-4	0.25	2	15mm	Nei	7	1,51	1,38	34,3	32,9
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	-2	0.25	2	15mm	Nei	7	1,46	1,35	35	34
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	0	0.25	2	15mm	Nei	7	1,4	1,31	35,9	35,2
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	2	0.25	2	15mm	Nei	7	1,34	1,28	36,7	36,4
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	4	0.25	2	15mm	Nei	7	1,28	1,25	37,6	37,5
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	6	0.25	2	15mm	Nei	7	1,22	1,22	38,6	38,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	8	0.25	2	15mm	Nei	7	1,16	1,19	39,6	39,8
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	10	0.25	2	15mm	Nei	7	1,1	1,16	40,6	40,9
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	12	0.25	2	15mm	Nei	7	1,04	1,13	41,7	42,1
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	14	0.25	2	15mm	Nei	7	0,99	1,11	42,8	43,1
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	16	0.25	2	15mm	Nei	7	0,95	1,08	43,9	44,3

FIGUR A.2: Simuleringsresultat for K2599 Støttemur - Lavvarmebetong + 15°C

Navn	Betongtype	Betongtemp	Ute temp	Fastholding	Vind	Forskaling	Varme kabler	Avforskaling	Rissindeks Cracktest	Rissindeks Excel	Maks Temp Cracktest	Maks Temp Excel
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	-6	0.25	2	15mm	JA	7	1,56	1,4	41,1	39,2
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	-4	0.25	2	15mm	JA	7	1,5	1,36	41,8	40,1
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	-2	0.25	2	15mm	JA	7	1,43	1,33	42,4	41
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	0	0.25	2	15mm	JA	7	1,37	1,29	43,1	41,9
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	2	0.25	2	15mm	JA	7	1,31	1,25	43,8	42,8
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	4	0.25	2	15mm	JA	7	1,26	1,22	44,6	43,8
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	6	0.25	2	15mm	JA	7	1,2	1,19	45,3	44,8
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	8	0.25	2	15mm	JA	7	1,14	1,15	46,1	45,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	10	0.25	2	15mm	JA	7	1,08	1,12	46,9	46,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	12	0.25	2	15mm	JA	7	1,03	1,09	47,8	47,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	14	0.25	2	15mm	JA	7	0,99	1,06	48,6	48,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	16	0.25	2	15mm	JA	7	0,95	1,02	49,4	49,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	18	0.25	2	15mm	JA	7	0,91	0,99	50,3	50,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	20	0.25	2	15mm	JA	7	0,87	0,96	51,1	51,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	22	0.25	2	15mm	JA	7	0,82	0,93	52	52,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	24	0.25	2	15mm	JA	7	0,78	0,91	52,8	53,8
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	26	0.25	2	15mm	JA	7	0,8	0,88	53,7	54,8
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	28	0.25	2	15mm	JA	7	0,86	0,85	54,6	55,9
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	30	0.25	2	15mm	JA	7	0,9	0,82	55,5	56,9

FIGUR A.3: Simuleringsresultat for K2599 Støttemur - Lavvarmebetong + Varmekabler i fundament

Navn	Betongtype	Betongtemp	Ute temp	Fastholding	Vind	Forskaling	Varme kabler	Avforskaling	Rissindeks Cracktest	Rissindeks Excel	Maks Temp Cracktest	Maks Temp Excel
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	-6	0.25	2	15mm	JA	7	1,35	1,19	34,3	31,8
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	-4	0.25	2	15mm	JA	7	1,3	1,16	35,1	32,9
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	-2	0.25	2	15mm	JA	7	1,24	1,12	35,9	34
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	0	0.25	2	15mm	JA	7	1,19	1,09	36,7	35,2
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	2	0.25	2	15mm	JA	7	1,13	1,06	37,6	36,4
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	4	0.25	2	15mm	JA	7	1,08	1,03	38,5	37,5
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	6	0.25	2	15mm	JA	7	1,02	1,01	39,4	38,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	8	0.25	2	15mm	JA	7	0,97	0,98	40,4	39,8
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	10	0.25	2	15mm	JA	7	0,91	0,96	41,4	40,9
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	12	0.25	2	15mm	JA	7	0,88	0,93	42,4	42,1
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	14	0.25	2	15mm	JA	7	0,85	0,91	43,5	43,2
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	16	0.25	2	15mm	JA	7	0,82	0,88	44,5	44,4

FIGUR A.4: Simuleringsresultat for K2599 Støttemur - Lavvarmebetong + 15°C + varmekabler

Navn	Betongtype	Betongtemp	Ute temp	Fastholding	Vind	Forskaling	Varme kabler	Avforskaling	Rissindeks Cracktest	Maks Temp Cracktest
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	0	0.25	2	15mm	JA	7	0,9	32,9
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	2	0.25	2	15mm	JA	7	0,87	33,6
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	4	0.25	2	15mm	JA	7	0,84	34,3
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	6	0.25	2	15mm	JA	7	0,8	35
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	8	0.25	2	15mm	JA	7	0,77	35,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	10	0.25	2	15mm	JA	7	0,76	36,4
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	12	0.25	2	15mm	JA	7	0,75	37,2
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	14	0.25	2	15mm	JA	7	0,74	38
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	16	16	0.25	2	15mm	JA	7	0,74	39,6
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	18	18	0.25	2	15mm	JA	7	0,73	43,1
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	20	0.25	2	15mm	JA	7	0,73	45,5
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	22	22	0.25	2	15mm	JA	7	0,73	46,2
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	24	24	0.25	2	15mm	JA	7	0,7	47
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	26	26	0.25	2	15mm	JA	7	0,67	47,8
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	28	28	0.25	2	15mm	JA	7	0,64	48,6
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	30	30	0.25	2	15mm	JA	7	0,66	49,4

FIGUR A.5: Simuleringsresultat for K2599 Støttemur - Lavvarmebetong + 15°C + varmekabler + Kjølørør cc400

Navn	Betongtype	Betongtemp	Ute temp	Fastholding	Vind	Forskaling	Varmekabler	Avforskaling	Rissindeks Cracktest	Maks Temp Cracktest
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	0	0.25	2	15mm	JA	7	0,79	30,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	2	0.25	2	15mm	JA	7	0,76	31,3
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	4	0.25	2	15mm	JA	7	0,75	32
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	6	0.25	2	15mm	JA	7	0,72	32,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	8	0.25	2	15mm	JA	7	0,7	33,3
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	10	0.25	2	15mm	JA	7	0,67	33,9
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	12	0.25	2	15mm	JA	7	0,64	34,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	14	0.25	2	15mm	JA	7	0,62	35,2
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	15	15	0.25	2	15mm	JA	7	0,6	35,7
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	16	0.25	2	15mm	JA	7	0,74	39,9
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	18	0.25	2	15mm	JA	7	0,71	40,6
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	20	0.25	2	15mm	JA	7	0,67	41,3
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	22	0.25	2	15mm	JA	7	0,63	42,8
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	24	0.25	2	15mm	JA	7	0,61	43,6
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	26	0.25	2	15mm	JA	7	0,58	44,4
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	28	0.25	2	15mm	JA	7	0,5	45,4
K2599 Støttemur	ANL FA + FA	20	30	0.25	2	15mm	JA	7	0,48	46,3

FIGUR A.6: Simuleringsresultat for K2599 Støttemur - Lavvarmebetong + 15°C + varmekabler + Kjølerør cc200





## Tillegg B

# K2599 Kulvert

### B.1 Simuleringsresultat med inngangsparametere

Navn	Betongtype	Betongtemp	Ute temp	Fastholding	Vind	Forskaling	Varmer kabler	Auforskaling	Rissindeks Cracktest	Rissindeks Excel	Maks Temp Cracktest	Maks temp Excel
K2599 Kulvert	ANL FA	20	-6	0.25	2	15mm	Nei	7	0,85	0,91	23,3	25,7
K2599 Kulvert	ANL FA	20	-4	0.25	2	15mm	Nei	7	0,84	0,9	25,1	27,1
K2599 Kulvert	ANL FA	20	-2	0.25	2	15mm	Nei	7	0,83	0,88	26,8	28,4
K2599 Kulvert	ANL FA	20	0	0.25	2	15mm	Nei	7	0,81	0,86	28,5	29,9
K2599 Kulvert	ANL FA	20	2	0.25	2	15mm	Nei	7	0,81	0,85	30,1	31,3
K2599 Kulvert	ANL FA	20	4	0.25	2	15mm	Nei	7	0,8	0,83	31,7	32,7
K2599 Kulvert	ANL FA	20	6	0.25	2	15mm	Nei	7	0,79	0,82	33,2	34
K2599 Kulvert	ANL FA	20	8	0.25	2	15mm	Nei	7	0,8	0,8	34,6	35,4
K2599 Kulvert	ANL FA	20	10	0.25	2	15mm	Nei	7	0,8	0,79	36,1	36,8
K2599 Kulvert	ANL FA	20	12	0.25	2	15mm	Nei	7	0,8	0,77	37,5	38,2
K2599 Kulvert	ANL FA	20	14	0.25	2	15mm	Nei	7	0,8	0,76	38,9	39,6
K2599 Kulvert	ANL FA	20	16	0.25	2	15mm	Nei	7	0,79	0,75	40,3	40,9
K2599 Kulvert	ANL FA	20	18	0.25	2	15mm	Nei	7	0,79	0,73	41,6	42,3
K2599 Kulvert	ANL FA	20	20	0.25	2	15mm	Nei	7	0,78	0,72	42,9	43,6
K2599 Kulvert	ANL FA	20	22	0.25	2	15mm	Nei	7	0,76	0,7	44,3	44,9
K2599 Kulvert	ANL FA	20	24	0.25	2	15mm	Nei	7	0,75	0,69	45,6	46,3
K2599 Kulvert	ANL FA	20	26	0.25	2	15mm	Nei	7	0,74	0,68	47	47,6
K2599 Kulvert	ANL FA	20	28	0.25	2	15mm	Nei	7	0,72	0,66	48,3	48,9
K2599 Kulvert	ANL FA	20	30	0.25	2	15mm	Nei	7	0,7	0,65	49,7	50,2

FIGUR B.1: Simuleringsresultat for K2599 Kulvert - Ingen tiltak



Navn	Betongtype	Betongtemp	Ute temp	Fastholding	Vind	Forskaling	Varmekabler	Avforskaling	Rissindeks Cracktest	Rissindeks Excel	Maks Temp Cracktest	Maks temp Excel
K2599 Kulvert	ANL FA	15	-4	0.25	2	15mm	Nei	7	0,68	0,76	19,9	21,6
K2599 Kulvert	ANL FA	15	-2	0.25	2	15mm	Nei	7	0,68	0,75	21,9	23,2
K2599 Kulvert	ANL FA	15	0	0.25	2	15mm	Nei	7	0,68	0,74	23,9	24,8
K2599 Kulvert	ANL FA	15	2	0.25	2	15mm	Nei	7	0,68	0,73	25,7	26,5
K2599 Kulvert	ANL FA	15	4	0.25	2	15mm	Nei	7	0,68	0,72	27,5	28,1
K2599 Kulvert	ANL FA	15	6	0.25	2	15mm	Nei	7	0,69	0,71	29,2	29,7
K2599 Kulvert	ANL FA	15	8	0.25	2	15mm	Nei	7	0,7	0,7	30,8	31,3
K2599 Kulvert	ANL FA	15	10	0.25	2	15mm	Nei	7	0,7	0,7	32,5	32,8
K2599 Kulvert	ANL FA	15	12	0.25	2	15mm	Nei	7	0,71	0,69	34	34,3
K2599 Kulvert	ANL FA	15	14	0.25	2	15mm	Nei	7	0,71	0,69	35,6	35,9
K2599 Kulvert	ANL FA	15	16	0.25	2	15mm	Nei	7	0,71	0,67	37,1	37,4

FIGUR B.2: Simuleringsresultat for K2599 Kulvert - 15 °C

Navn	Betongtype	Betongtemp	Ute temp	Fastholding	Vind	Forskaling	Varmekabler	Avforskaling	Rissindeks Cracktest	Rissindeks Excel	Maks Temp Cracktest	Maks temp Excel
K2599 Kulvert	ANL FA + 16% FA	20	-2	0.25	2	15mm	Nei	7	0,73	0,8	19,5	20,3
K2599 Kulvert	ANL FA + 16% FA	20	0	0.25	2	15mm	Nei	7	0,72	0,77	21,3	21,6
K2599 Kulvert	ANL FA + 16% FA	20	2	0.25	2	15mm	Nei	7	0,7	0,75	23	23
K2599 Kulvert	ANL FA + 16% FA	20	4	0.25	2	15mm	Nei	7	0,69	0,73	24,7	24,6
K2599 Kulvert	ANL FA + 16% FA	20	6	0.25	2	15mm	Nei	7	0,67	0,72	26,4	26,3
K2599 Kulvert	ANL FA + 16% FA	20	8	0.25	2	15mm	Nei	7	0,65	0,7	27,9	28
K2599 Kulvert	ANL FA + 16% FA	20	10	0.25	2	15mm	Nei	7	0,64	0,69	29,4	29,8
K2599 Kulvert	ANL FA + 16% FA	20	12	0.25	2	15mm	Nei	7	0,63	0,68	30,9	31,5
K2599 Kulvert	ANL FA + 16% FA	20	14	0.25	2	15mm	Nei	7	0,61	0,68	32,4	33,3
K2599 Kulvert	ANL FA + 16% FA	20	16	0.25	2	15mm	Nei	7	0,6	0,67	33,8	35,1
K2599 Kulvert	ANL FA + 16% FA	20	18	0.25	2	15mm	Nei	7	0,59	0,66	35,2	36,9
K2599 Kulvert	ANL FA + 16% FA	20	20	0.25	2	15mm	Nei	7	0,59	0,66	36,7	38,7
K2599 Kulvert	ANL FA + 16% FA	20	22	0.25	2	15mm	Nei	7	0,61	0,65	38,1	40,5
K2599 Kulvert	ANL FA + 16% FA	20	24	0.25	2	15mm	Nei	7	0,63	0,64	39,6	42,3
K2599 Kulvert	ANL FA + 16% FA	20	26	0.25	2	15mm	Nei	7	0,64	0,64	41	44
K2599 Kulvert	ANL FA + 16% FA	20	28	0.25	2	15mm	Nei	7	0,64	0,63	42,5	45,8
K2599 Kulvert	ANL FA + 16% FA	20	30	0.25	2	15mm	Nei	7	0,64	0,63	44	47,6

FIGUR B.3: Simuleringsresultat for K2599 Kulvert - Lavvarmebetong

Navn	Betongtype	Betongtemp	Ute temp	Fastholding	Vind	Forskaling	Varme kabler	Avforskaling	Rissindeks Cracktest	Rissindeks Excel	Maks Temp Cracktest	Maks temp Excel
K2599 Kulvert	ANL FA	20	-6	0.25	2	15mm	JA	7	0,7	0,75	23,3	25,7
K2599 Kulvert	ANL FA	20	-4	0.25	2	15mm	JA	7	0,69	0,73	25,1	27,1
K2599 Kulvert	ANL FA	20	-2	0.25	2	15mm	JA	7	0,67	0,72	26,8	28,5
K2599 Kulvert	ANL FA	20	0	0.25	2	15mm	JA	7	0,65	0,7	28,4	29,9
K2599 Kulvert	ANL FA	20	2	0.25	2	15mm	JA	7	0,64	0,69	30	31,3
K2599 Kulvert	ANL FA	20	4	0.25	2	15mm	JA	7	0,64	0,67	31,6	32,7
K2599 Kulvert	ANL FA	20	6	0.25	2	15mm	JA	7	0,64	0,66	33,1	34
K2599 Kulvert	ANL FA	20	8	0.25	2	15mm	JA	7	0,64	0,65	34,5	35,4
K2599 Kulvert	ANL FA	20	10	0.25	2	15mm	JA	7	0,63	0,63	36	36,8
K2599 Kulvert	ANL FA	20	12	0.25	2	15mm	JA	7	0,62	0,62	37,4	38,2
K2599 Kulvert	ANL FA	20	14	0.25	2	15mm	JA	7	0,61	0,61	38,8	39,6
K2599 Kulvert	ANL FA	20	16	0.25	2	15mm	JA	7	0,6	0,59	40,1	40,9
K2599 Kulvert	ANL FA	20	18	0.25	2	15mm	JA	7	0,58	0,58	41,5	42,3
K2599 Kulvert	ANL FA	20	20	0.25	2	15mm	JA	7	0,57	0,57	42,9	43,7
K2599 Kulvert	ANL FA	20	22	0.25	2	15mm	JA	7	0,56	0,56	44,3	45,1
K2599 Kulvert	ANL FA	20	24	0.25	2	15mm	JA	7	0,55	0,55	45,7	46,5
K2599 Kulvert	ANL FA	20	26	0.25	2	15mm	JA	7	0,53	0,54	47,1	47,9
K2599 Kulvert	ANL FA	20	28	0.25	2	15mm	JA	7	0,52	0,53	48,5	49,3
K2599 Kulvert	ANL FA	20	30	0.25	2	15mm	JA	7	0,51	0,52	49,9	50,7

FIGUR B.4: Simuleringsresultat for K2599 Kulvert - Lavvarmebetong



## Tillegg C

# Simuleringsresultat K35 Støttemur

### C.1 Simuleringsresultat med inngangsparametere

Navn	Betongtype	Betongtemp	Ute temp	Fastholding	Vind	Forskaling	Varmekabler	Avforskaling	Rissindeks Cracktest	Rissindeks Excel	Maks Temp Cracktest	Maks temp Excel
K35	ANL FA	20	-6	0.25	2	15mm	Nei	7	0,83	0,86	24,4	26,3
K35	ANL FA	20	-4	0.25	2	15mm	Nei	7	0,81	0,84	26,1	27,7
K35	ANL FA	20	-2	0.25	2	15mm	Nei	7	0,79	0,82	27,7	29
K35	ANL FA	20	0	0.25	2	15mm	Nei	7	0,78	0,8	29,3	30,4
K35	ANL FA	20	2	0.25	2	15mm	Nei	7	0,77	0,79	30,9	31,7
K35	ANL FA	20	4	0.25	2	15mm	Nei	7	0,76	0,77	32,3	33,1
K35	ANL FA	20	6	0.25	2	15mm	Nei	7	0,75	0,76	33,8	34,5
K35	ANL FA	20	8	0.25	2	15mm	Nei	7	0,75	0,75	35,2	35,9
K35	ANL FA	20	10	0.25	2	15mm	Nei	7	0,75	0,73	36,6	37,2
K35	ANL FA	20	12	0.25	2	15mm	Nei	7	0,74	0,71	38	38,6
K35	ANL FA	20	14	0.25	2	15mm	Nei	7	0,74	0,7	39,3	39,9
K35	ANL FA	20	16	0.25	2	15mm	Nei	7	0,73	0,68	40,6	41,3
K35	ANL FA	20	18	0.25	2	15mm	Nei	7	0,71	0,67	41,9	42,6
K35	ANL FA	20	20	0.25	2	15mm	Nei	7	0,7	0,66	43,3	43,9
K35	ANL FA	20	22	0.25	2	15mm	Nei	7	0,68	0,64	44,6	45,2
K35	ANL FA	20	24	0.25	2	15mm	Nei	7	0,66	0,63	45,9	46,5
K35	ANL FA	20	26	0.25	2	15mm	Nei	7	0,65	0,62	47,2	47,8
K35	ANL FA	20	28	0.25	2	15mm	Nei	7	0,63	0,6	48,6	49,1
K35	ANL FA	20	30	0.25	2	15mm	Nei	7	0,61	0,59	49,9	50,4

FIGUR C.1: Simuleringsresultat for K35 Støttemur - Ingen tiltak

Navn	Betongtype	Betongtemp	Ute temp	Fastholding	Vind	Forskaling	Varme kabler	Avforskaling	Rissindeks Cracktest	Rissindeks Excel	Maks Temp Cracktest	Maks temp Excel
K35	ANL FA	15	-6	0,25	2	15mm	Nei	7	0,67	0,7875	18,8	20,5
K35	ANL FA	15	-4	0,25	2	15mm	Nei	7	0,67	0,777	20,9	22,1
K35	ANL FA	15	-2	0,25	2	15mm	Nei	7	0,66	0,756	22,8	23,7
K35	ANL FA	15	0	0,25	2	15mm	Nei	7	0,66	0,7455	24,6	25,3
K35	ANL FA	15	2	0,25	2	15mm	Nei	7	0,65	0,735	26,4	26,9
K35	ANL FA	15	4	0,25	2	15mm	Nei	7	0,65	0,7245	28,1	28,5
K35	ANL FA	15	6	0,25	2	15mm	Nei	7	0,65	0,714	29,7	30,1
K35	ANL FA	15	8	0,25	2	15mm	Nei	7	0,65	0,7035	31,3	31,6
K35	ANL FA	15	10	0,25	2	15mm	Nei	7	0,65	0,693	32,9	33,2
K35	ANL FA	15	12	0,25	2	15mm	Nei	7	0,65	0,6825	34,4	34,7
K35	ANL FA	15	14	0,25	2	15mm	Nei	7	0,65	0,672	35,9	36,2
K35	ANL FA	15	16	0,25	2	15mm	Nei	7	0,64	0,6615	37,4	37,7

FIGUR C.2: Simuleringsresultat for K35 Støttemur - 15 °C

Navn	Betongtype	Betongtemp	Ute temp	Fastholding	Vind	Forskaling	Varme kabler	Avforskaling	Rissindeks Cracktest	Rissindeks Excel	Maks Temp Cracktest	Maks temp Excel
K35	ANL FA + 16%FA	20	-6	0,25	2	15mm	Nei	7	0,74	0,88	16,8	18
K35	ANL FA + 16%FA	20	-4	0,25	2	15mm	Nei	7	0,73	0,81	18,6	19,5
K35	ANL FA + 16%FA	20	-2	0,25	2	15mm	Nei	7	0,71	0,76	20,3	20,7
K35	ANL FA + 16%FA	20	0	0,25	2	15mm	Nei	7	0,7	0,73	22,1	22
K35	ANL FA + 16%FA	20	2	0,25	2	15mm	Nei	7	0,68	0,71	23,8	23,5
K35	ANL FA + 16%FA	20	4	0,25	2	15mm	Nei	7	0,66	0,69	25,4	25,1
K35	ANL FA + 16%FA	20	6	0,25	2	15mm	Nei	7	0,64	0,67	26,9	26,7
K35	ANL FA + 16%FA	20	8	0,25	2	15mm	Nei	7	0,62	0,66	28,4	28,4
K35	ANL FA + 16%FA	20	10	0,25	2	15mm	Nei	7	0,6	0,65	29,9	30,2
K35	ANL FA + 16%FA	20	12	0,25	2	15mm	Nei	7	0,59	0,64	31,3	31,9
K35	ANL FA + 16%FA	20	14	0,25	2	15mm	Nei	7	0,57	0,63	32,7	33,7
K35	ANL FA + 16%FA	20	16	0,25	2	15mm	Nei	7	0,56	0,62	34,1	35,5
K35	ANL FA + 16%FA	20	18	0,25	2	15mm	Nei	7	0,55	0,61	35,5	37,3
K35	ANL FA + 16%FA	20	20	0,25	2	15mm	Nei	7	0,62	0,61	36,9	39
K35	ANL FA + 16%FA	20	22	0,25	2	15mm	Nei	7	0,62	0,6	38,3	40,8
K35	ANL FA + 16%FA	20	24	0,25	2	15mm	Nei	7	0,61	0,59	39,8	42,6
K35	ANL FA + 16%FA	20	26	0,25	2	15mm	Nei	7	0,6	0,59	41,3	44,3
K35	ANL FA + 16%FA	20	28	0,25	2	15mm	Nei	7	0,59	0,58	42,8	46
K35	ANL FA + 16%FA	20	30	0,25	2	15mm	Nei	7	0,58	0,57	44,3	47,8

FIGUR C.3: Simuleringsresultat for K35 Støttemur - Lavvarmebetong



Navn	Betongtype	Betongtemp	Ute temp	Fastholding	Vind	Forskaling	Varme kabler	Avforskaling	Rissindeks Cracktest	Rissindeks Excel	Maks Temp Cracktest	Maks temp Excel
K35	ANL FA	20	-6	0.25	2	15mm	JA	7	0.68	0.7	24,4	26,3
K35	ANL FA	20	-4	0.25	2	15mm	JA	7	0.66	0.68	26,1	27,7
K35	ANL FA	20	-2	0.25	2	15mm	JA	7	0.65	0.67	27,8	29
K35	ANL FA	20	0	0.25	2	15mm	JA	7	0.64	0.65	29,4	30,4
K35	ANL FA	20	2	0.25	2	15mm	JA	7	0.63	0.64	30,9	31,7
K35	ANL FA	20	4	0.25	2	15mm	JA	7	0.62	0.62	32,4	33,1
K35	ANL FA	20	6	0.25	2	15mm	JA	7	0.62	0.61	33,8	34,5
K35	ANL FA	20	8	0.25	2	15mm	JA	7	0.61	0.6	35,2	35,9
K35	ANL FA	20	10	0.25	2	15mm	JA	7	0.6	0.58	36,6	37,2
K35	ANL FA	20	12	0.25	2	15mm	JA	7	0.59	0.57	38	38,6
K35	ANL FA	20	14	0.25	2	15mm	JA	7	0.58	0.57	39,3	39,9
K35	ANL FA	20	16	0.25	2	15mm	JA	7	0.57	0.54	40,7	41,3
K35	ANL FA	20	18	0.25	2	15mm	JA	7	0.55	0.53	42	42,6
K35	ANL FA	20	20	0.25	2	15mm	JA	7	0.54	0.52	43,3	44
K35	ANL FA	20	22	0.25	2	15mm	JA	7	0.53	0.51	44,6	45,4
K35	ANL FA	20	24	0.25	2	15mm	JA	7	0.52	0.5	45,9	46,8
K35	ANL FA	20	26	0.25	2	15mm	JA	7	0.51	0.49	47,2	48,2
K35	ANL FA	20	28	0.25	2	15mm	JA	7	0.51	0.48	48,6	49,6
K35	ANL FA	20	30	0.25	2	15mm	JA	7	0.5	0.47	50	50,9

FIGUR C.4: Simuleringsresultat for K35 Støttemur - Varmekabler

## C.2 Kostnadsoverslag inkludert enhetspriser

Varmekabler - rabattert pris	22,00	kr/m																		
Varmekabler - ordinær pris	57,00	kr/m																		
Antall varmekabler pr fundamentbredde	9,00	stk																		
Lawarmebetonng - storby	0,00	kr/m3																		
Lawarmebetonng - bygd	300,00	kr/m3																		
Senke betongtemperatur - vinter	0,00	kr/m3																		
Enhetskost pr arbeidstime inkl avgifter	450,00	kr/t																		
<b>K35 Støttemur</b>																				
	Tidsforbruk ved montasje		Mengde		Kostnad ved innkjøp		Kostnad ved montasje													
	Beste tilfelle	Verste tilfelle	Mengde	Enhet	Beste tilfelle	Verste tilfelle	Beste tilfelle	Verste tilfelle	Beste tilfelle	Verste tilfelle	Beste tilfelle	Verste tilfelle	Totalt							
Varmekabler	0,05	0,15	435	m	kr 86 130,00	kr 223 155,00	kr 88 087,50	kr 264 262,50	kr 174 217,50	kr 487 417,50										
Lawarme	0	0	652	m3	kr -	kr 195 600,00	kr -	kr -	kr -	kr 195 600,00										
Senke betongtemperatur	0	0	652	m3	kr -	kr -	kr -	kr -	kr -	kr -										

FIGUR C.5: Kostnadsoverslag - Støttemur K35

# Bibliografi

- [1] Prosesskode 2 - standard beskrivelse for bruer og kaier. 2018. URL [https://www.vegvesen.no/\\_attachment/2362834/](https://www.vegvesen.no/_attachment/2362834/).
- [2] Øyvind Bjøntegaard. Volumendringer og risstendens i betong= volum changes and cracking tendency in concrete. 2009. URL [https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/bitstream/handle/11250/194017/volumendringer\\_og\\_risstendens\\_i\\_betong.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/bitstream/handle/11250/194017/volumendringer_og_risstendens_i_betong.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- [3] Øyvind Bjøntegaard. Basis for and practical approaches to stress calculations and crack risk estimation in hardening concrete structures—state of the art fa 3 technical performance. sp 3.1 crack free concrete structures. 2011. URL <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/bitstream/handle/11250/2411102/coin31.pdf?sequence=1>.
- [4] S. Jacobsen, M. Maage, S. Smepllass, K.O. Kjellsen, E.J. Sellevold, J. Lindgård, R. Cepuritis, R. Myrdal, Ø. Bjøntegaard, and M-Geiker. *Concrete Technology*. Fakultet for ingeniørvitenskap/Institutt for konstruksjonsteknikk, 2016.
- [5] Norcem. Herdeteknologi. s.a. URL [https://www.norcem.no/sites/default/files/assets/document/bb/11/herdeteknologi\\_lav.pdf](https://www.norcem.no/sites/default/files/assets/document/bb/11/herdeteknologi_lav.pdf). Lastet ned 03.03.2021.
- [6] Anja Estensen Klausen, Terje Kanstad, Øyvind Bjøntegaard, and Erik J Sellevold. The effect of realistic curing temperature on the strength and e-modulus of concrete. *Materials and Structures*, 51(6):1–14, 2018. URL [https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2580808/The%2beffect%2bof%2brealistic%2bcuring%2btemperature%2bon%2bmechanical%2bproperties\\_%2bCristin.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2580808/The%2beffect%2bof%2brealistic%2bcuring%2btemperature%2bon%2bmechanical%2bproperties_%2bCristin.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- [7] Yr.no. Temperatur i stavanger siste 13mnd. URL <https://www.yr.no/nb/historikk/tabell/1-15183/Norge/Rogaland/Stavanger/Stavanger?q=siste-13-m%C3%A5neder>. Hentet 12.03.2021.



- [8] GM Ji, Terje Kanstad, and Øyvind Bjøntegaard. Crack risk evaluation of submerged concrete tunnel during hardening phase. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 2018. URL <https://www.hindawi.com/journals/ace/2018/7354025/>.
- [9] Oliver Berget Skjølvik, Eirik Haram, and Sverre Smepllass. Beregning av rissrisiko cracktest coin: Fa: Technical performance: Sp 3.1 crack free concrete structures. 2015. URL <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/bitstream/handle/11250/2379270/COIN57.pdf?sequence=1>.
- [10] Ø Bjøntegaard, I Hegseth, S Smepllass, T Kanstad, A. B.E Klausen, and B Kristansen. Praktiske råd og tiltak mot fastholdingsriss i herdende betongskonstruksjoner - rapport 9. 2021. URL [https://betong.net/wp-content/uploads/Rapport-nr.-9\\_web-versjon.-pr.-feb.-2021-1.pdf](https://betong.net/wp-content/uploads/Rapport-nr.-9_web-versjon.-pr.-feb.-2021-1.pdf).
- [11] Thomas Blomberg. Heat conduction in two and three dimensions. *Report TVBH*, 1996. URL [https://buildingphysics.com/manuals/avh\\_TB.pdf](https://buildingphysics.com/manuals/avh_TB.pdf).
- [12] Anja Birgitta Estensen Klausen. Early age crack assessment. 2018. URL <https://www.sintef.no/contentassets/a2c5a98a03594086b7e6e872c02f39f7/dacs-report-no-2-wp1.2-early-age-crack-assessment.pdf>.
- [13] Utførelsesentreprise - fv.44 bussvei diagonalen - gauselstasjon, 2020. URL <https://www.mercell.com/nb-no/anbud/128425865/utfoerelsesentreprise---fv-44-bussvei-diagonalen---gauselstasjon-anbud.aspx>. Lastet ned 20.02.2021.