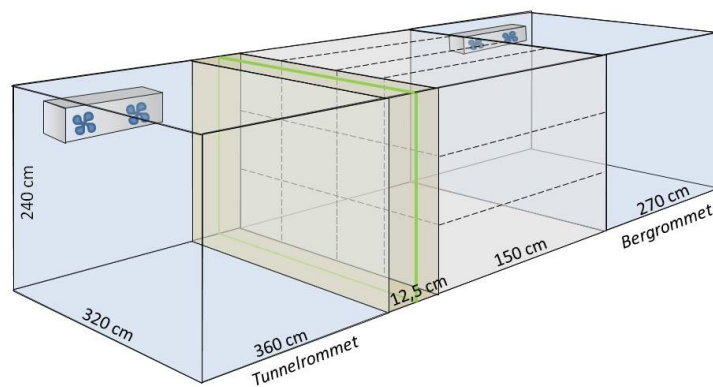


Solveig Vassenden

# Frostlaboratoriet – testing av varme/kuldeutveksling mellom tunnel og omkringliggende bergmasse

Trondheim, 1. juni 2010





## MASTEROPPGAVEN

**Kandidatens navn:** Solveig Vassenden

**Oppgavens tittel:** Frostlaboratoriet – testing av varme/kuldeutveksling mellom tunnel og omkringliggende bergmasse

**English title:** Frost laboratory – testing of heat/cold convection between a tunnel and surrounding rock mass

**Utfyllende tekst:**

1. SINTEF har nylig bygget opp et frostlaboratorium der man kan teste utvekslingen av varme/kulde mellom tunnel og omkringliggende bergmasse. Laboratoriet er ikke prøvet før og kandidaten vil være den første som får anledning til å benytte anlegget. Det er bygget inn i laboratoriet Masterseal vannsikring som er installert i henhold til leverandørens spesifikasjoner og de krav som ligger i Statens vegvesen sine retningslinjer for slike konsepter.

Kandidaten skal i sin oppgave gjøre følgende:

- a. Være med å planlegge de første testene som skal gjennomføres i laboratoriet
- b. Følge opp fortløpende alle tester og inngå i prosjektteamet som gjør denne testing for Jernbaneverket
- c. Tolke alle resultater og vurdere disse
- d. Etablere en numerisk modell og kjøre en modellering der alle parametre er identiske til de som gjelder for frostlaboratoriet slik at man kan få en sammenligning mellom resultat fra laboratoriet og den numeriske modellen
- e. Etablere hypotese for varmeutvekslingen mellom bergmassen og tunnelen

2. Ansvarlig faglærer og hovedveileder for oppgaven er prof. II Eivind Grøv, Institutt for geologi og bergteknikk. Oppgaven gjennomføres i samarbeid med SINTEF Geologi og bergteknikk og Jernbaneverkets tunnelprosjekt på Gjevingåsen. Oppgaven skal leveres i 4 trykte eksemplarer samt pdf-versjon.

**Studieretning:** Teknisk geologi

**Hovedprofil:** Ingeniørgeologi/bergteknikk

**Tidsrom:** 15.01.2010-15.06.2010

Faglærer

SKJEMAET TAS INN SOM SIDE 1 I MASTEROPPGAVEN  
NTNU, 11 mai 2010

## Forord

Denne masteroppgaven hadde ikke vært mulig uten SINTEFs fryselabb. Jeg vil derfor takke Jernbaneverket, gjennom sin finansiering, og SINTEF Geologi og Bergteknikk for muligheten til å jobbe med fryselabben. Jeg vil også takke Trond Erik Larsen, Kjartan Følke og Anders Storler for å bidra med opplysninger og erfaringer rundt byggingen av fryselabben. Trond Erik Larsen har også sørget for at jeg til en hver tid har hatt tilgang til oppdaterte resultater, noe jeg har satt stor pris på.

Håkon Skistad har vært en god diskusjonspartner rundt det faglige innholdet omkring termofysikken, men også omkring framstilling av resultater. Han fortjener derfor også en takk.

Jeg vil også rette en takk til min onkel Frode for uvurderlig hjelp til å forstå varmeledningsteorien, stor tålmodighet, konstruktiv kritikk og stor entusiasme.

Til slutt vil jeg takke min veileder Eivind Grøv for alltid å være tilgjengelig for diskusjoner rundt måleresultater, faglige spørsmål og detaljer rundt oppgaven. Han har gitt meg stor frihet til å forme denne masteroppgaven slik jeg har ønsket, noe jeg har satt stor pris på. Han har også vist meg mye tillitt og gitt meg ansvar ved å la meg være en del av testteamet. Denne prosessen har vært like lærerik som det faglige aspektet ved oppgaven.

Trondheim, 1.6.2010

---

Solveig Vassenden

## Sammendrag

I forbindelse med Jernbaneverkets utbygging av Gevingåsen jernbanetunnel vurderer Jernbaneverket *BASF Masterseal* kombinert med sprøytbetong som vann- og frostsikring i tunnelen. I den forbindelse har Jernbaneverket og SINTEF Geologi og Bergteknikk inngått et samarbeid om testing av dette konseptet for vann- og frostsikring med tanke på frostbestandighet. Med midler fra Jernbaneverket har SINTEF Geologi og Bergteknikk bygget en fryselabb til testing av vann- og frostsikringskonsepter. Hele fryselabben har målene 7,8m x 3,2m x 2,4m (lxbxh), og består av 12 blokker med Støren-granitt, som for testene beskrevet i denne masteroppgaven er påført sprøytebetong og Masterseal. Fryselabben er instrumentert med 67 temperaturmålere, fordelt i luften, vann- og frostsikringen og bergmassen.

Det er ikke tidligere gjort slike forsøk, og det er derfor ikke utviklet noen standardtester til dette formålet. Denne masteroppgaven er et ledd i prosessen med utvikling av slike tester og den praktiske testingen av sprøytebetong og Masterseal som vann- og frostsikring. Testteamet har bestått av Eivind Grøv og Trond Erik Larsen ved SINTEF Geologi og Bergteknikk, Håkon Skistad og undertegnede. Det har vært en dialog med Jernbaneverket og BASF underveis, men de har ikke hatt representanter i testteamet.

Teorien for respons på temperaturendringer i berg er lagt til grunn ved valg av tester for fryselabben. Som en del av kompetanseutviklingen rundt temaet er det viktig å dokumentere om teori og praksis stemmer. I tillegg er repeterbarheten av testene er viktig med tanke på å kunne bruke de samme testene på andre vann- og frostsikringskonsepter. Testene er derfor kjørt med enkle og gjentatte steglaster med forskjellig størrelse.

Testene som er utført i fryselabben viser at responsen på temperaturendringer i form av steglaster stemmer godt med de analytiske beregningene. Responsen ser ut til å være lik over det temperaturintervallet som er benyttet, noe som betyr at sprøytebetongen og Mastersealen ikke endrer egenskaper med temperatur. Det betyr også at erfaringene fra fryselabben, og senere også Gevingåsen jernbanetunnel, er gyldige også andre steder i Norge og i utlandet.

Resultatene viser også at kombinasjonen av sprøytebetong og Masterseal ikke er særlig frostbestandig. Selv ved beskjedne temperaturer ble det målt negative temperaturer bak membranen.

Som et supplement til testingen i fryselabben er det etablert en numerisk modell i programmet TEMP/W. Resultatene fra fryselabben er brukt som utgangspunkt for de numeriske beregningene, og temperaturforløpet er forsøkt gjenskapt så godt som mulig. Sammenligninger av resultatene fra fryselabben og de beregnede temperaturene viser at modellen gir gode svar, og at den derfor kan brukes til å kjøre beregninger over litt lengre tidsrom enn det som er hensiktsmessig i fryselabben.

# Innhold

Forside.....	1
Oppgavetekst .....	2
Forord .....	3
Sammendrag .....	4
Symbolliste .....	9
1 Bakgrunn for masteroppgaven .....	10
2 Oppbygging av fryselabben .....	11
2.1 Geometri .....	11
2.2 Montering av Støren-granitten.....	12
2.2.1 Hull for tester med vanntrykk.....	13
2.3 Instrumentering.....	13
2.4 Montering av kjøle- og fryseaggregat.....	14
2.5 Viktige datoer .....	15
3 Produktbeskrivelser.....	16
3.1 Støren-granitt .....	16
3.2 Sprøytbetongen.....	16
3.3 BASF Masterseal .....	16
3.4 Temperaturmålerne .....	17
3.4.1 Målenøyaktighet.....	18
3.5 Kjøleaggregat.....	19
4 Teori .....	20
4.1 Frostmengde .....	20
4.2 Varmeovergang ved konveksjon.....	21
4.3 Varmeovergang ved stråling.....	21
4.4 Varmeledning ligningen .....	22
4.5 Respons på steglaster .....	22
4.5.1 Respons på steglaster når berget er vann- og frostsikret .....	24
4.5.2 Respons på steglaster ved bruk av varmeovergangstall .....	25
4.5.3 Respons på steglaster i et endelig medium .....	25
4.6 Respons på sinusvariasjoner.....	26
4.6.1 Respons på sinusvariasjoner når berget er vann- og frostsikret.....	27
5 Innledende tester i fryselabben.....	28
5.1 Temperatur i Bergrommet.....	28

5.2	Testplan for innledende testing .....	28
6	Utfyllende testing i fryselabben .....	30
6.1	Kontroll i TEMP/W .....	30
6.2	Testplan utfyllende testing .....	31
7	Testprosedyrer for fryselabben .....	33
7.1	Testprosedyre for testing med enkle steglaster .....	33
7.2	Testprosedyre steglaster i serie .....	33
8	Resultater fryselabb .....	35
8.1	Faktorer som kan påvirke resultatene .....	35
8.2	Resultat F-1.....	36
8.3	Resultat F-2.....	38
8.4	Resultat F-3.....	40
8.5	Frostmengde .....	43
9	Numerisk modellering .....	44
9.1	Numeriske modeller .....	44
9.1.1	Endelig elementmetoden .....	44
10	Oppbygging av modellen i TEMP/W .....	45
10.1	Temp/W .....	45
10.2	Planlagte beregninger i TEMP/W.....	45
10.3	Standardinnstillinger .....	46
10.4	Geometri og inndeling i elementer.....	46
10.5	Materialegenskaper.....	47
10.5.1	Varmeledning .....	48
10.5.2	Varmekapasitet .....	48
10.5.3	Behov for testing av materialer .....	49
10.6	Grensebetingelser som er felles for alle beregninger.....	50
10.7	Spesielle grensebetingelser .....	50
10.7.1	Utgangstemperatur for de stabile tidsanalysene.....	50
10.7.2	Temperaturforløp for de tidsavhengige analysene.....	51
10.7.3	Varmeovergangstall.....	51
10.8	Tidsbetingelser .....	52
10.9	Noder som tilsvarer målepunktene i fryselabben.....	52
10.10	Feilkilder .....	52
11	Resultater Temp W.....	54

11.1	Faktorer som kan påvirke resultatene .....	54
11.2	Resultat T-1 .....	54
11.3	Resultat T-2 .....	54
11.4	Resultat T-3 og T4 .....	55
11.5	Resultat T-5 .....	57
12	Dimensjonsløse resultater .....	58
12.1	Teori for omgjøring til et homogent medium .....	58
12.2	Omgjøring til homogent medium .....	60
12.3	Dimensjonsløs plotting .....	60
12.3.1	Ny x-verdi for målepunkter i fryselabben og TEMP/W .....	61
13	Direkte sammenligning mellom numerisk modell og praksis .....	62
13.1	Sammenligning F-1 mot T-1 .....	62
13.2	Sammenligning F-2 mot T-2 .....	63
13.3	Sammenligning F-3 mot T-5 .....	65
13.4	Oppsummering .....	66
14	Dimensjonsløse resultater .....	67
14.1	Analytiske beregninger .....	67
14.2	Negativ steglast .....	68
14.2.1	Negativ steglast F-1 og T-1 .....	69
14.2.2	Negativ steglast F-2 og T-2 .....	71
14.3	Positiv steglast .....	72
14.3.1	Positiv steglast F-1 og T-1 .....	72
14.3.2	Positiv steglast F-2 og T-2 .....	74
14.4	Oppsummering .....	75
15	Hypotese for varmeutveksling mellom berg og luft .....	78
16	Konklusjon .....	79
17	Videre arbeid .....	80
18	Kilder .....	82
	Vedleggsliste .....	84
Vedlegg A	- Stegrespons i vann- og frostsikret berg .....	85
Vedlegg B	- Respons på steglast i et endelig medium .....	86
Vedlegg C	- Respons på sinussvingning i vann- og frostsikret berg .....	88
Vedlegg D	- Resymé av testteamets arbeid .....	89
Vedlegg E	- Beregning av temperaturvariasjoner for test i TEMP/W .....	91

Vedlegg F	- Resultater fra F-1 .....	94
Vedlegg G	- Resultater fra F-2 .....	100
Vedlegg H	- Resultater fra F-3 .....	106
Vedlegg I	- Standardinnstillinger i TEMP/W .....	109
Vedlegg J	- Temperaturer til tester i TEMP/W .....	110
Vedlegg K	- Dimensjonsløse resultater for negativ steglast.....	112
Vedlegg L	- Dimensjonsløse resultater for positiv steglast .....	115



## Symbolliste

A	Utslag fra likevektslinja	[°C]
B	Sirkelfrekvensen	[1/t]
C	Faseforskyvning	[ ]
D	Gjennomsnittstemp over perioden	[°C]
F	Frostmengde	[t°C]
P	Periode	[t],[mnd], [år]
T	Temperatur	[°C]
T <sub>m</sub>	Middeltemperatur	[°C]
T <sub>mnd</sub>	Gjennomsnittlig månedstemperatur	[°C]
U	Spenning	[V]
V	Volum	[m <sup>3</sup> ]
c	Varmekapasiteten	[J/m <sup>3</sup> *°K]
d	Diameter	[m]
f	Faktor for homogenisering av et medium med flere lag	[ ]
h	Varmeovergangstall	[W/m <sup>2</sup> *°K]
m	Masse	[kg]
q	Konvektiv varmestrøm	[W/m <sup>2</sup> ]
t	Tid	[time]
t <sub>0°C</sub>	Antall timer med temperatur under °C	[t]
v	lufthastighet	[m/s]
w <sub>uf</sub>	Ufrosset vanninnhold	[%]
w <sub>vol</sub>	Volumetrisk vanninnhold	[%]
x	Tykkelsen	[m]
x´	Ny tykkelse	[m]
x <sub>0</sub>	Faseforskjell mellom to sinuskurver	[m]
α	Termal diffusivitet	[m <sup>2</sup> /s]
β	Varmestrøm fra jordens indre	[°C/m]
δ	Seebeck-koeffisienten	
ΔT <sub>0</sub>	Størrelsen på steglast	[°C]
ε	emisjonsevne	[ ]
λ	Varmeledningstallet	[J/t*m*°K]
σ	Stefan-Boltzmanns konstant	[W/m <sup>2</sup> *°K <sup>4</sup> ]
τ	Karakteristisk dimensjon	[ ]
ψ	Karakteristisk dimensjon	[ ]
MS	Masterseal	
SB	Sprøytbetong	
SG	Støren-granitt	

## **1 Bakgrunn for masteroppgaven**

I forbindelse med Jernbaneverkets (JBV) utbygging av Gevingåsen jernbanetunnel mellom Hommelvik og Hell, på grensen mellom Sør- og Nord-Trøndelag, vurderer JBV *BASF Masterseal* kombinert med sprøytbetong som vann- og frostsikring i tunnelen. Masterseal er ikke tidligere benyttet i Norge, og JBV og SINTEF Geologi og Bergteknikk har derfor inngått et samarbeid om testing av dette konseptet for vann- og frostsikring med tanke på frostbestandighet og vanntrykk bak vann- og frostsikringen. SINTEF Geologi og Bergteknikk har i den forbindelse bygget en fryselabb til testing av Masterseal, finansiert av JBV.

Det er ikke gjort noe lignende i Norge tidligere, og det er derfor ikke etablert noen faste prosedyrer for slike tester. SINTEF Geologi og Bergteknikk ser for seg muligheten til å teste andre konsepter for vann- og frostsikring i den samme fryselabben senere. Det er derfor viktig å finne én eller flere optimale tester, samt testprosedyrer slik at ulike vann- og frostsikringskonsepter kan sammenlignes. Denne masteroppgaven skal være et ledd i dette arbeidet.

Siden fryselabben er utstyrt med Masterseal og sprøytbetong som vann- og frostsikring vil denne oppgaven bruke det som utgangspunkt. Det innebærer at alle eksempler og figurer bruker den samme oppbygningen.

## 2 Oppbygging av fryselabben

SINTEF Geologi og Bergteknikk har stått for all prosjektering i forbindelse med byggingen av fryselabben. Dette ble gjort før denne masteroppgaven ble tatt ut, og detaljer ved prosjekteringen vil ikke bli vurdert, men beskrevet i denne masteroppgaven.

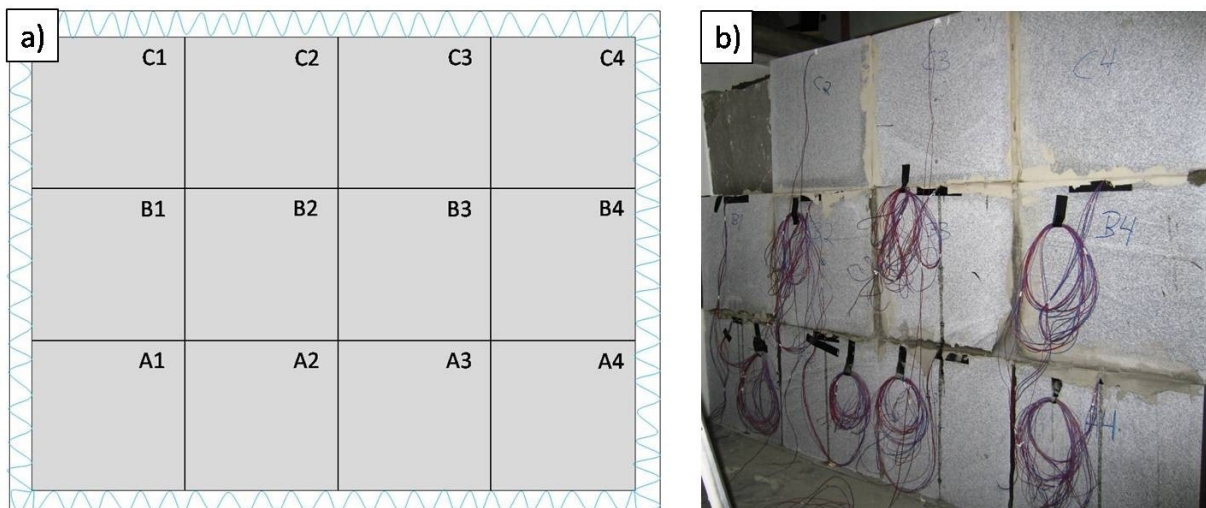
Fryselabben som er bygget til testingen ligger i SINTEFs lokaler ved Kyst- og havnelaboratoriet i Trondheim. Den ble ferdigstilt ved årsskifte 2009/2010, og satt i drift i februar 2010. Arbeidet er utført av Trond Erik Larsen og Kjartan Følke. Anders Storler står for instrumenteringen av fryselabben. All informasjon om byggingen er gitt av dem.

Selve fryselabben består av blokker med Støren-granitt, montert i et isolert rom. På hver side av blokkene er det et rom med et kjøleelement. Det ene rommet er tenkt å representere bergmassen, og blir heretter betegnet Bergrommet, mens det andre er tenkt å representere tunnelrommet, og blir betegnet Tunnelrommet. For å sikre god kontroll, og god dokumentasjon, er blokkene instrumenterte med flere temperaturmålere, både på overflaten, og inne i blokkene. Detaljer omkring fryselabben blir presentert i de kommende underkapitlene. Merk at alle mål er oppgitt som b x h x l.

### 2.1 Geometri

Rommet som utgjør fryselabben har målene 320 x 240 x 790 cm. Rommet er isolert i gulv, vegger og tak, slik at varmestrømmen kun skal gå gjennom blokkene med Støren-granitt.

Berget i fryselabben er representert med 12 blokker av Støren-granitt. Muligheten for å få feilfrie blokker, samt fryselabbens totale størrelse, var dimensjonerende for blokkenes størrelse. Blokkene er skjært til med diamantsag etter målene 80 x 80 x 150 cm. Blokkene er nummerert fra 1 til 4 mot høyre, og fra A til C nedenfra og opp når en ser blokkene fra Bergrommet. Dette er vist i Figur 1.

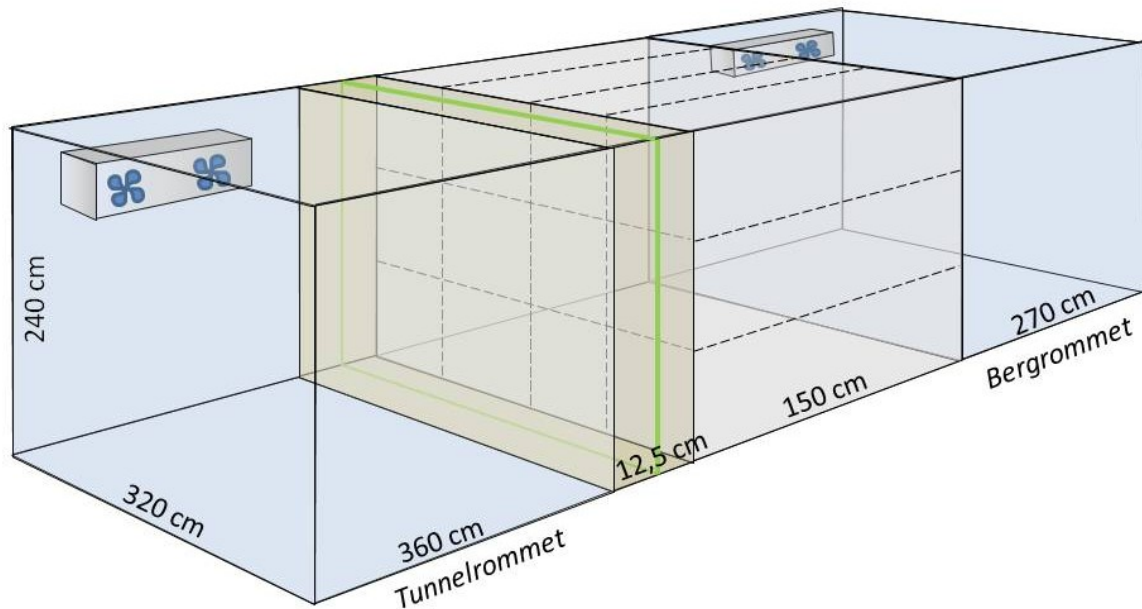


Figur 1: A) Nummerering av blokkene sett fra Bergrommet. B) Foto fra montering (Foto: SINTEF Geologi og Bergteknikk).

Blokkene ble firt ned gjennom en eksisterende luke i taket, og montert fire i bredden og tre i høyden, noe som gir en total overflate på 320 x 240 cm. Som en konsekvens av at luken i taket ikke er plassert rett over fryselabben, ble ikke blokkene montert midt i rommet. Dette medfører at det ene rommet måler 320 x 240 x 270 cm, mens det andre er 90 cm lengre og måler 320 x 240 x 360 cm. For å sikre

best mulig arbeidsvilkår under påføring av sprøytebetong og Masterseal, ble det største rommet valgt til Tunnelrommet og det minste til Bergrommet.

Den flaten som vender ut i Tunnelrommet er sprøytet med 60 mm fiberarmert sprøytbetong, 4-5 mm Masterseal, og deretter nye 60 mm med fiberarmert sprøytbetong. Hele fryselaabben er vist i Figur 2.



Figur 2: Modell av fryselaabben.

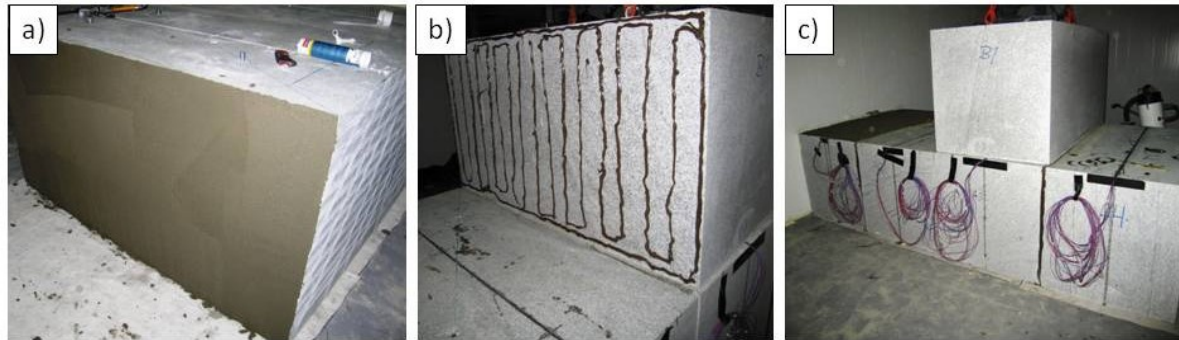
## 2.2 Montering av Støren-granitten

For å kunne flytte blokkene på en sikker måte, ble det montert to ekspanderende bolter i hver blokk. Hullene ble boret for lange slik at boltene kunne slås ned i blokken etter montering. Boltene ble satt i diagonalt motstående hjørner, og hullene ble etterfylt med mørtel.

For å sikre at varmestrømmen kun går gjennom Støren-granitten er det gjort tiltak i randsonene og i sprekke mellom blokkene. Mellom gulvet og blokkene er det lagt en svellematte av typen Voltex fra SealTech. Mellom blokkene og veggene er det tettet med silikon av typen Soudaseal 240FC. Isolasjonmatter ble forsøkt brukt under monteringen, men resultatet ble ikke godt nok. Det viste seg at mattene lett foldet seg, og dermed mistet all effekt. Mot taket er det tettet med ekspanderende isolasjonsskum.

Selv om blokkene ble skjært til med diamantsag, ble det sprekker mellom blokkene under montering. Horisontalt ble det brukt PCI Steinfix, en flismørtel til bruk på naturstein. De vertikale sprekke ble tettet med samme flismørtel i kombinasjon med en mer flytende flismørtel av typen Nonset 120 og Nonset 50 fra Rescon. Sprekke ble forsegle mot Bergrommet og Tunnelrommet med silikon, av typen Megatec fra Rescon, før alle vertikale sprekke ble fylt med Nonset 120 og/eller 50.

Overflaten mot tunnelrommet ble slisset for å sikre god heft for sprøytebetongen. Detaljer fra monteringen er vist i Figur 3.



**Figur 3: A) Steifix mellom blokkene vertikalt. B) Silikon mot veggene. C) Steifix mellom blokkene horisontalt. (Foto: SINTEF Geologi og Bergteknikk).**

Midtnorsk Betongsprøyting AS stod for påføringen av begge lagene med sprøytebetong og Masterseal. Rett etter at første lag med sprøytebetong var påført, ble det ripet inn kanaler for senere montering av termometer i overgangen mellom sprøytebetong og Masterseal. Disse ledningene ble montert etter at sprøytebetongen hadde herdet. De ble siden dekket av Masterseal og mer sprøytebetong.

### 2.2.1 Hull for tester med vanntrykk

For å kunne teste Masterseal med tanke på bestandighet mot vanntrykk, er det boret hull gjennom blokk A3, B2, B3 og C3. Hullene er boret vannrett midt i blokkene, og har en diameter på 20 mm.

Hullene er tettet med en plastlapp i begge ender for å forhindre hullet i å bli fylt med sprøytebetong, og for å forhindre for mye bevegelse i luften. Siden hullene er så små, og ikke ligger i direkte kontakt med målepunktene vil se sannsynligvis ikke virke inn på resultatene.

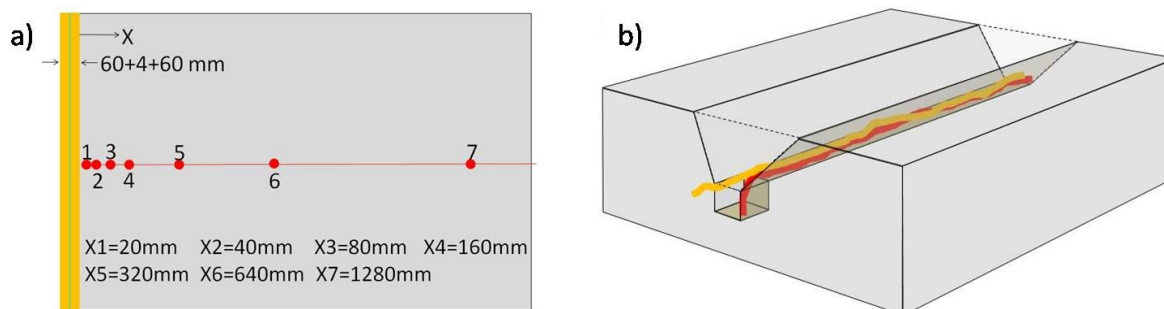
For å simulere dårlig eller ingen heft mellom Støren-granitten og sprøytebetongen er område rundt hullet i B2 innsurt med fett. Dette er ikke gjort rundt de tre andre hullene.

Vanntrykkstestene er tenkt kjørt inntil brudd i sprøytebetongen, og kan derfor ikke kjøres før etter at testingen med tanke på frostbestandighet er ferdig. Vanntrykkstestene blir derfor ikke behandlet i denne masteroppgaven.

## 2.3 Instrumentering

Til sammen er det montert 67 differensielle termometer frostlabben. 60 av dem sitter i Støren-granitten og fem på overflaten mellom det første laget med sprøytebetong og laget med Masterseal. I tillegg er det én termometer i Bergrommet og én i Tunnelrommet som måler lufttemperaturen.

I A- og B-blokkene er det montert sju målepunkter i hver blokk. Ledningene ligger i en langsgående sliss, og målepunktene ligger i hull som stikker dypere enn denne. Hullene er boret med håndbor, har en diameter på 6 mm og er 60 mm dype. Plasseringen av målepunktene er vist i Figur 4. Merk at blokken sees ovenfra.

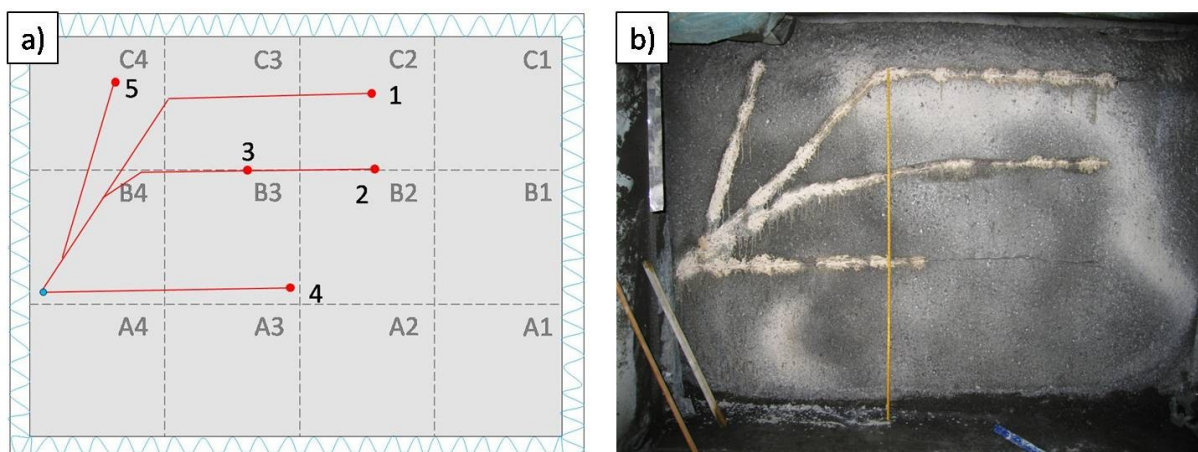


Figur 4: A) Plassering av målepunkt langs slissa i A- og B-blokkene. B) Plassering av målepunkt nede i slissa.

I blokkene C2 og C3 er det to målepunkter i hver blokk. Disse målepunktene ligger ved  $x=400$  mm og  $x=800$  mm. Monteringen er lik som i de andre blokkene, men hullene er 300 mm dype.

For å hindre lufttilgang til ledningene er de limt fast med aralditt av typen Araldite AY 103-1. Før ledningene ble limt inn, ble hver enkelt ledning sjekket for feil. I tillegg var limet fullstendig herdet før neste rast med blokker ble montert.

Det er også montert fem målere mellom det første laget med sprøytbetong og laget med Masterseal. Disse målerne er ikke limt inn med aralditt, men sprøytet inn med Masterseal. Plasseringen er vist i Figur 5. Merk at veggen sees fra Tunnelrommet.



Figur 5: A) Nøyaktig plassering av målepunktene sett fra Tunnelrommet. B) Foto fra monteringen (foto: SINTEF Geologi og Bergteknikk).

For å kontrollere at temperaturen i Bergrommet og Tunnelrommet stemmer med de programmerte temperaturene er det installert en temperaturmåler i hvert av rommene. Temperaturmåleren i Tunnelrommet er plassert på veggen under fryseaggregatet, det vil si i nærheten av blokk A4, B4 og C4. I Bergrommet er måleren montert på motsatt side, det vil si i nærheten av A1, B1 og C1.

## 2.4 Montering av kjøle- og fryseaggregat

Etter at sprøytbetongen hadde herdet, ble kjøle- og fryseaggregatene montert i hvert sitt rom. Det var leverandøren, Trondheim kulde- og fryseteknikk, som stod for monteringen. Av praktiske årsaker er begge aggregatene montert på veggen ved døren inn til rommet.

## **2.5 Viktige datoer**

Første lag med sprøytbetong ble lagt 4. januar 2010, og Masterseal ble påført den 6. januar 2010. Det andre laget med sprøytbetong ble lagt 11. januar 2010, fem døgn etter påføring av Masterseal. Dette er godt over kravet på de 24 timene Masterseal må herde før den kan dekket med sprøytbetong.

Masterseal skal ikke utsettes for frost de første 28 døgnene etter påføring. I dette tilfellet betyr det den 3. februar 2010. Fryselabben ble ikke satt i drift før 11. februar 2010, så alle krav til herdetid er overholdt.

## 3 Produktbeskrivelser

### 3.1 Støren-granitt

Støren-granitten er en egentlig en kvartsdioritt, og kommer fra et brudd ved Støren i Sør-Trøndelag. Kvartsdioritt er en intermediaær dypbergart. Som andre dypbergarter er den mer grovkornede enn gang- og dagbergarter siden den har størknet over lang tid. Bergarten består hovedsakelig av plagioklas, men også litt kvarts, alkalifeltspat og biotitt. Nærmere bestemt inneholder den mellom 90 og 100 % plagioklas. Mindre enn 50 % av denne plagioklasen er av typen anortitt, som er en kalsiumrik plagioklas (Prestvik, Mineralogi, 2.utgave, 2001). Både kvarts- og alkalifeltspatinnholdet er relativt lavt, mellom 5 og 20 % for kvarts og mellom 0 og 10 % for alkalifeltspaten. Når det gjelder mafiske mineraler som olivin, pyroksen, amfibol, glimmer, epidot og granat, er de nesten fraværende, men glimmermineralet biotitt gir de mørke flekkene i den ellers lyse bergarten (Prestvik, Petrologi og geokjemi, 2001).

### 3.2 Sprøytbetongen

Sprøytbetongen som er benyttet i fryselabben er av samme type som brukes ved Gevingåsen jernbanetunnel. Betongen er bestilt fra Unicon, og levert fra Stjørdal. Den har fasthetsklasse B35 og bestandighetsklasse M4. Kravet til energiabsorpsjonsklasse er E700, noe som innebærer et innhold av PP-makrofiber på 5 kg/m<sup>3</sup> (Nyberg, 2010). I kontrakten mellom JBV og entreprenøren MIKA står det at *"Sprøytingen skal ikke forgå på flater som har en temperatur under +2°C ... sprøytbetongen skal beskyttes mot frost inntil sprøytbetongen har oppnådd en fasthet på 5MPa ... under herdingen skal sprøytbetongen holdes fuktig, eller være beskyttet mot uttørking"* (Jernbaneverket, 2009). Disse kravene er innfridd i forbindelse med bygging av frostlabben.

### 3.3 BASF Masterseal

*Masterseal* er en vanntett membran som er utviklet av *BASF Construction Chemicals* til bruk i tunneler og bergrom (MacDonald, 2009).

Membranen består av hurtigherdende sement blandet med etylen-vinyl acetat  $[(C_2H_4)_n(C_4H_6O_2)_m]$ , en kopolymer av etylen (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) og vinylacetat (C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>) (Aylward & Findlay, 2001). Membranen kan sprøytes direkte på fjell, armert og uarmert sprøytbetong eller på metall.

For å oppnå et best mulig resultat, bør overflaten som skal sprøytes med Masterseal ha en viss grad av jevnhet og heft (Brandenberger, Holter, & Kothe). Jevnheten kan oppnås ved å sprøyte berget med sprøytbetong før membranen påføres. For å redusere forbruket, og samtidig sikre en kontinuerlig membran, bør ikke tilslaget ha kornstørrelser større enn 4-8 mm (Brandenberger, Holter, & Kothe). Det er derimot ikke noe problem å sprøyte direkte på fiberarmert sprøytbetong. For at membranen skal få ordentlig heft, må overflaten rengjøres grundig med både trykkluft og høytrykksspyler. I tillegg skal overflaten være fuktet når membranen påføres, og temperaturen skal ligge mellom +5 og +40°C. Masterseal kan ikke sprøytes direkte på vann under trykk. I de tilfellene må vannet enten dreneres ut, eller styres gjennom kanaler av fleecematter, før membranen kan påføres. Produsenten anbefaler maskinell påføring for et jevnest mulig resultat, og lavest forbruk. Manuell påføring med trent personell kan gi like gode resultater, men med et litt høyere tidsforbruk.

Membranen herder raskt, og kan dekkes av sprøytbetong etter 24 timer. Påføringen av sprøytbetong skal da skje nedenfra og oppover. Etter ti dager er membranen fult herdet, men den kan ikke utsettes



for frost de første 28 dager etter påføring (MacDonald, 2009). Optimale forhold under herdingen er en relativ luftfuktighet på 90 % og en ventilasjon på mer enn 1m/s.

Vann som befinner seg bak membranen absorberes inn åpne porer hvor det bindes, både kjemisk og ved kapillære krefter. Et 3 med mer tykt lag med Masterseal kan absorbere 24 vekt-%, og være dermed være mettet med vann på mindre enn én time (MacDonald, 2009). Fra porene fordampes vannet med en hastighet på  $0,05 \text{ l/m}^2\text{dag}$ . Til sammenligning defineres vanntett betong, i følge *Swiss Engineers and Designers Society Standard SIA 162/1, test no. 5*, som 25 cm betong med en vanddampavgivelse på  $0,26 \text{ l/m}^2\text{dag}$ .

Når det gjelder mekaniske egenskaper, har Masterseal en bindestyrke til betong på  $1,2 \pm 0,2 \text{ MPa}$ , og til metall på 0,5 - 1,2 MPa. Mellom  $-20$  og  $+20^\circ\text{C}$  varierer elastisiteten mellom 80 og 140 %, og membranen kan motstå opp til 15 bar trykk, tilsvarende en vannsøyle på 150 m (MacDonald, 2009). Forsøk og modelleringer utført på bestilling fra produsent, viser at to lag sprøytebetong adskilt med 3 med mer Masterseal, har samme mekaniske egenskaper som et kontinuerlig lag. Membranen er også selvslukkende ved brann (MacDonald, 2009).

Membranen er kun tiltenkt en rolle som vannsikring, og skal ikke bidra til frostsikringen.

### 3.4 Temperaturmålerne

Temperaturen bak membranen og i Støren-granitten måles med termoelementer. Et termoelement består av to metalltråder av forskjellige metaller eller legeringer som er koblet sammen. Når to ulike metaller kobles sammen, virker de som et batteri og det oppstår ei kontaktspenning mellom metallene. Denne spenningen kalles termospenning, og avhenger av temperaturen. Jo høyere temperatur, dess større spenning. Det er denne termospenningen som utnyttes til temperaturmålinger. Ved å koble de to metalltrådene mot et voltmeter kan en lese av termospenningen og siden regne ut temperaturen i koblingspunktet. Alle opplysninger omkring temperaturmålingene er gitt av Anders Storler, SINTEF.

I fryselabben er det benyttet tråder av kobber og konstantan. Konstantan er en legering som består av 55-60 % kobber, 40-45 % nikkell og 1 % mangan (Aylward & Findlay, 2001). Fordelen med konstantan er at det har konstant elektrisk motstand over et bredt temperaturintervall, noe som gjør det mye brukt i termoelement. Denne kombinasjonen er mye brukt i termoelementer, og den kan brukes for temperaturer fra  $-200$  til  $+350^\circ\text{C}$ . Følsomheten er  $38 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ .

Voltmeteret som benyttes i fryselabben benytter koblingstråder av kobber, så når termoelementet kobles til voltmeteret blir det to termoelementer. Én kobber-konstantan kobling i målepunktet, og én konstantan-kobber kobling i koblingspunktet med voltmeteret. Spenningen som måles med voltmeteret er derfor summen av spenningene i de to koblingspunktene. Denne situasjonen er illustrert i Figur 6a. For å finne temperaturen i målingspunktet må en ta i bruk Seebeck-koeffisienten. Alle metaller og legeringer har en Seebeck-koeffisient,  $\delta$ , som er slik at når to metaller kobles, for eksempel kobber og konstantan, oppstår det en termospenning som vist i Formel ( 3.1) (Davidsen, 2002).

$$U_{\text{kobber-konstantan}} = T(\delta_{\text{kobber}} - \delta_{\text{konstantan}}) \quad (3.1)$$

Hvor:

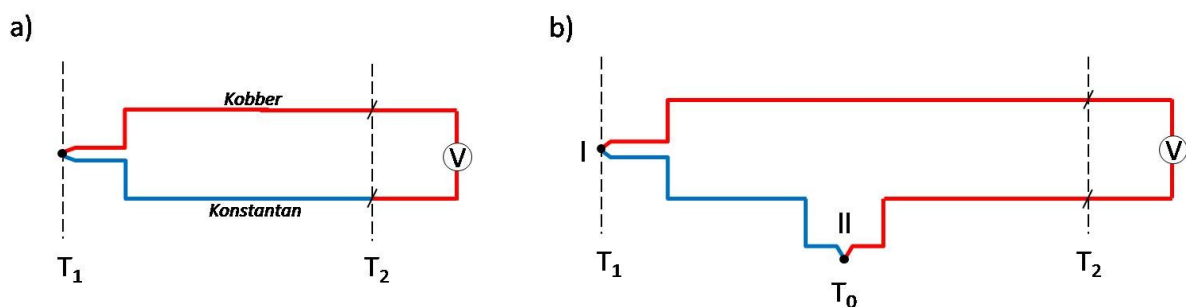
U = spenning [V]

T=temperatur [°C]

$\delta$ = Seebeck-koeffisienten []

Hvis en kjenner temperaturen i koblingspunktet med voltmeteret, kan en bruke Formel ( 3.2) for å finne temperaturen i målepunktet (Davidsen, 2002).

$$U = (\delta_{\text{kobber}} - \delta_{\text{konstantan}}) * (T_1 - T_2) \quad (3.2)$$



Figur 6: A) Termoelement koblet til voltmeter. B) Termoelement koblet til voltmeter ved bruk av referansetemperatur.

For å finne temperaturen i koblingspunktet med voltmeteret kan en enten måle temperaturen direkte, eller benytte et referansepunkt med kjent temperatur  $T_0$ . Denne situasjonen er vist i Figur 6b. I fryselabben er det benyttet et kar med vann som referansepunkt. Temperaturen i karet måles med to uavhengige målere, et termoelement med kobber og konstantan, og en PT-100 måler. Både PT-100 måleren og termoelementet er kalibrert mot temperaturen i is-sørpe, og deretter sjekket mot flere kjente temperaturer.

PT-100 måleren er en RTD-måler (Resistance Temperature Detector) som måler resistansen i metalltråden. Denne resistansen avhenger av temperaturen. I PT-100 målere er det brukt en platinatråd med sensitivitet  $100 \Omega$  ved  $T=0 \text{ } ^\circ\text{C}$  (Davidsen, 2002).

Når en kjenner temperaturen i vannbadet og spenningen målt i voltmeteret kan en enten regne ut temperaturen i målepunktet, eller benytte standardiserte tabeller (Davidsen, 2002) som gir svaret direkte.

I fryselabben er det kontinuerlig logging av temperaturen bak membranen og i Støren-granitten. Hvert tiende minutt bergenes det en snitttemperatur, noe som gir seks målinger i timen.

### 3.4.1 Målenøyaktighet

Siden både termoelementet og PT-100 måleren er kalibrert mot is-sørpe, og sjekket mot flere kjente temperaturer er temperaturen i vannbadet rimelig sikkert, noe som er med på å øke nøyaktigheten. Repeterbarheten i målingene er veldig god, og ved variasjoner i temperaturen viste målingene med stor sannsynlighet den samme eksakte temperaturen når temperaturen var tilbake til

utgangspunktet. Måleresultatene inneholder lite støy, noe som også er et godt bevis på at målingene er gode.

Anders Storler anslår målenøyaktigheten til  $\pm 0,1$  °C, men at feilen kan avhenge av hvor på temperaturskalaen målingene ligger. Han poengterer at det ikke foreligger noen vitenskapelig dokumentasjon av nøyaktigheten.

### **3.5 Kjøleaggregat**

Kjøleaggregatene er levert av Klima- og Kuldeteknikk i Trondheim, og er av merket Carrier 38 YE 009 i Bergrommet og Bitzer 2DC-2,24 i kjølerommet. Dette er to adskilte kjøleaggregater, og temperaturen i de to rommene kan derfor stilles uavhengig av hverandre, og etter behov. Under forsøkene er temperaturen i Bergrommet tenkt holdt konstant på 8-9 °C. Temperaturen i Tunnelrommet kan senkes til -20°C, og er tenkt endret for ulike tester. Disse temperaturene vil bli videre kommentert i kapittel 0.

Fryseaggregatet i Tunnelrommet har en kjølekapasitet på 5,2 kW, og fordamperen av typen KPN 77 yter 6,4kW. Aggregatet stopper for avising 1-2 ganger i døgnet. For å hindre at temperaturen i rommet stiger for mye, er prosessen programmert slik at temperaturen i rommet ikke kan stige mer enn 2°C før den begynner å gå igjen.

Kjøleaggregatet i Bergrommet har en kjølekapasitet på 2,8 kW, og fordamperen, av type KPN 134, yter 3,3kW.

Egne dataprogrammer for kontinuerlig styring av temperaturen i Tunnelrommet er tilgjengelig på markedet, men er foreløpig ikke montert i fryselabben.

## 4 Teori

For å finne gode testprosedyrer og kunne tolke resultatene er det viktig å kjenne teorien for responser på temperaturendringer i berg både med og uten vann- og frostsikring.

### 4.1 Frostmengde

Det er store forskjeller i årsmiddeltemperatur og temperaturforløp fra sted til sted i Norge. Antall måneder med frost, første og siste måned med frost og kaldeste måned varierer også (www.met.no). For og best mulig kunne sammenligne frostpåkjenningene ved forskjellige lokaliteter er det nødvendig med en størrelse som tar hensyn til disse variasjonene. For termisk dimensjonering blir begrepet *frostmengde* benyttet til dette formålet. Frostmengden er gitt ved formel ( 4.1) (Instones, 2005).

$$F = \int_0^{t_{0^{\circ}\text{C}}} T dt_{0^{\circ}\text{C}} \quad (4.1)$$

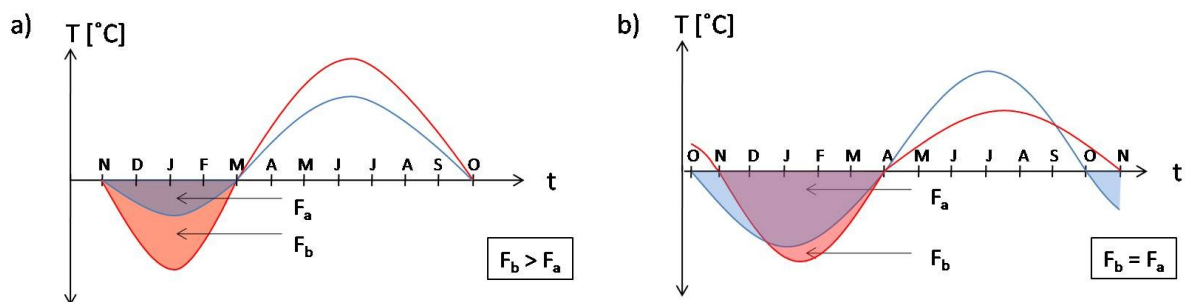
Hvor:

F = Frostmengde [ $t^{\circ}\text{C}$ ]

T = Lufttemperaturen [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$t_{0^{\circ}\text{C}}$  = Antall timer med lufttemperatur under  $0^{\circ}\text{C}$  [t]

Frostperioden på et sted, antall dager mellom første og siste døgn med negative temperaturer, varierer lite fra år til år (Instones, 2005), og frostmengden avhenger derfor mest av amplituden. Siden frostmengden er lik arealet under kurven, vil en kort og kald vinter kunne gi samme frostmengde som en lang og mild vinter, se Figur 7.



Figur 7: A) Forskjellig minimumstemperatur, men like mange dager med minusgrader gir ulik frostmengde. B) Forskjellig minimumstemperatur, og ulikt antall dager med minusgrader kan gi samme frostmengde (Vassenden S., 2009).

Alternativt kan frostmengden regnes ut ved hjelp av månedsmiddeltemperaturene, se formel ( 4.2) (Pedersen, Knut Borge, 2002). Benevnelsen blir den samme.

$$F = 730 * \sum_{n=1}^{12} T_{mnd} n \quad (4.2)$$

Hvor:

$T_{mnd}$  = Gjennomsnittlig månedstemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]

## 4.2 Varmeovergang ved konveksjon

Konvektiv varmeoverføring er varmeoverføring mellom to medier som er i bevegelse i forhold til hverandre (Tipler & Mosca, 2004). Et eksempel på dette er luft som strømmer langs en flate med temperatur forskjellig fra lufttemperaturen. Varmeovergangen skjer ved at molekylene i lufta krasjer med molekylene i det faste mediet. Konveksjonen kan enten være tvungen eller naturlig.

Newtons avkjølningslov sier at endringen i temperaturen i et medium per tidsenhet, er proporsjonal med differansen mellom temperaturen utenfor mediet og temperaturen i mediet. Denne formelen kan brukes til å finne varmestrømmen gjennom en grenseflate mellom et fluid og et fast medium. Denne varmestrømmen er vist i Formel (4.3) (Incropera, DeWitt, Bergman, & Lavine, 2007).

$$q = h * (T_{medium} - T_{fluid}) \quad (4.3)$$

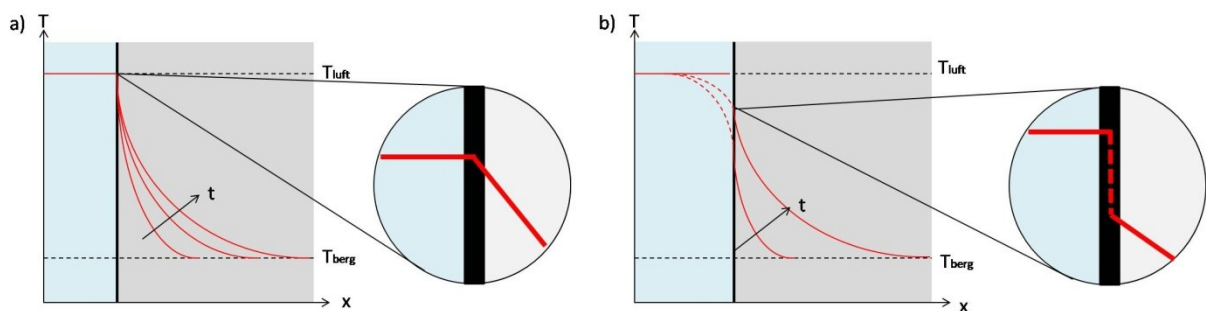
Hvor:

$q$  = Konvektiv varmestrøm [ $W/m^2$ ]

$h$  = varmeovergangstall ved konveksjon [ $W/m^2 * ^\circ K$ ]

Varmeovergangstallet forteller hvor effektiv varmeovergangen i grenseflaten er. Tallet avhenger av materialet og hastigheten til fluidet, og kan variere fra 0 til nesten 100 [ $W/m^2 * ^\circ C$ ] (Opstad & Stensaas, 1998).

Figur 8a viser temperaturforløpet når det er konstant temperatur på overflaten. Responsen på temperaturendringen sees umiddelbart, og temperaturen i overgangen mellom lufta og berget er lik lufttemperaturen. Figur 8b viser temperaturforløpet når det er konvektiv varmeoverføring langs overflaten. På grunn av konveksjonen blir det et sprang mellom lufttemperaturen og temperaturen på bergoverflata. De stiplede linjene er en mulig forklaring på hva som skjer i grensesonen mellom luft og berg.



Figur 8: A) Temperaturforløp i et medium ved konstant overflatetemperatur. B) Temperaturforløp i et medium ved konvektiv varmeoverføring langs overflaten.

## 4.3 Varmeovergang ved stråling

I tillegg til varmeovergang ved konveksjon, vil det i fryselabben være varmeovergang ved stråling. Varmestrålingen kommer av termiske bevegelser i atomene og/eller molekylene. Fordi atomene og molekylene inneholder ladete partikler vil disse bevegelsene gjøre at de sender ut elektromagnetisk stråling. Energien, eller varmen, som frigis transporteres av elektromagnetiske bølger. Mengden energi som frigis øker med temperaturen. Denne energien, eller strålingen, blir absorbert når den

treffer en overflate. Mørke overflater absorberer mye energi, mens lyse og blanke flater absorberer lite energi. De flatene som absorberer lite energi, mister også minst energi i form av utstråling (Tipler & Mosca, 2004).

#### 4.4 Varmeledning ligningen

Varmeledning ligningen, formel ( 4.4 ), gjelder for alle situasjoner der det er en temperaturendring i et medium.

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\lambda}{c} * \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (4.4)$$

Hvor:

T = Temperatur [°C]

t = Tid [t]

λ = Varmeledningstallet [J/t\*m\*°K]

c = Varmekapasiteten [J/m<sup>3</sup>\*°K]

x = Avstanden [m]

Ligningen er en andreordens differensialligning, og ved å løse den ved bruk av ulike grensebetingelser kan en finne responsen på alle mulige temperaturendringer. Ulike grensebetingelser gir ulike løsninger, og disse løsningene kan se veldig forskjellige ut. Siden varmeledning ligningen består av ett ledd med den deriverte av temperaturen med hensyn på tiden, og ett med den deriverte av temperaturen med hensyn på avstanden har alle løsninger én felles sammenheng mellom avstand og tid. Ved å innføre to karakteristiske dimensjoner for avstanden (ψ) og tiden (τ) i varmeledning ligningen, blir denne sammenhengen tydeligere. Dette er vist i formel ( 4.5).

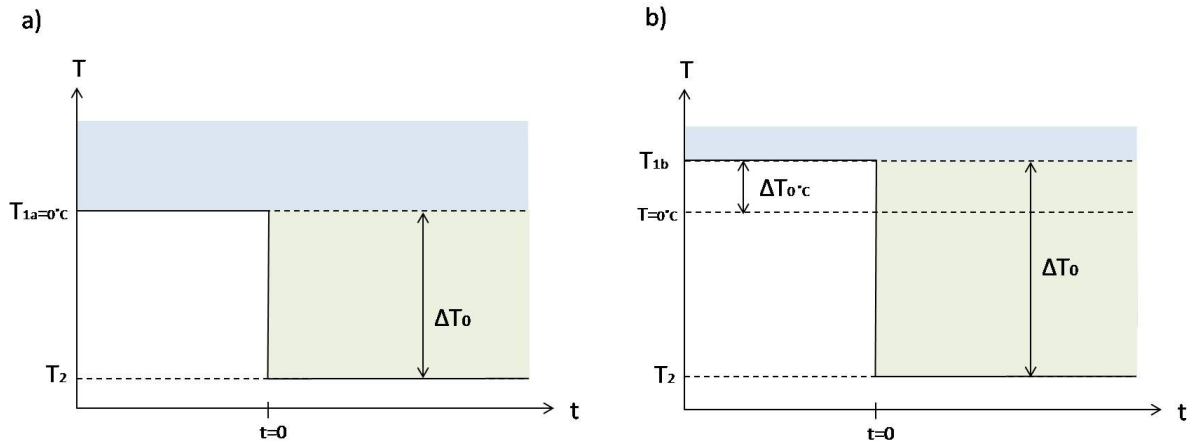
$$\frac{\partial T}{\partial \frac{t}{\tau} * \tau} - \frac{\lambda}{c} * \frac{\partial^2 T}{\partial \left(\frac{x^2}{\psi^2}\right) * \psi^2} = \frac{\partial T}{\partial \frac{t}{\tau}} - \left(\frac{\lambda * \tau}{c * \psi^2}\right) * \frac{\partial^2 T}{\partial \left(\frac{x^2}{\psi^2}\right)} = 0 \quad (4.5)$$

Ved å sette verdien av (λ\*τ/c \*ψ<sup>2</sup>)=1, blir varmeledning ligningen dimensjonsløs og en ser at ψ = √(λ\*τ /c) = √( α\*τ). Dette betyr at distansen temperaturen forflytter seg avhenger av √t, λ og c. Dette innebærer at løsningen for store systemer ser ut som løsningen for små systemer, bare etter litt lengre tid. Ved å velge riktige verdier for ψ og τ vil alle løsningene se like ut. "Til sammenligning kan en tenke at dersom en filmer en bestemt bevegelse utført i forskjellige hastigheter, kan en få dem til å se helt like ut ved å justere tempoet filmene spilles i, enten opp eller ned"(Vassenden S. , 2009).

I forbindelse med testing av vann- og frostsikring er det hensiktsmessig å benytte oversiktlige og generaliserte temperaturendringer som steglaster og sinusvariasjoner. Teorien for disse temperaturendringene vil derfor bli behandlet videre.

#### 4.5 Respons på steglaster

Med steglaster menes, i denne sammenhengen, en plutselig endring i temperatur fra T<sub>1</sub> til T<sub>2</sub> ved tiden t=0, der dT/dt=0 for alle verdier av t>0. Dette er illustrert i Figur 9.



Figur 9: A) Steglast med  $T=0^{\circ}\text{C}$  som utgangstemperatur. B) Steglast med  $T=0^{\circ}\text{C} + \Delta T_0^{\circ}\text{C}$  som utgangstemperatur.

Løsningen på varmeledningsligningen for steglast i 1D i et uendelig medium vil være lik i alle homogene medier, og er gitt ved formel (4.6) (Kittel & Kroemer, 1980). Feilfunksjonen gir avviket fra en gausisk fordelt løsning, og fås ved å integrere gaussfunksjonen, gitt ved formel (4.7). Merk at formel (4.6) gjelder for tilfeller der steglasten legges til utgangstemperaturen,  $T_1=0^{\circ}\text{C}$ , se Figur 9a. Steglasten kan være både positiv og negativ.

$$T_{T_1=0^{\circ}\text{C}}(x, t) = \Delta T_0 * \left[ 1 - \text{Erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4\alpha t}}\right) \right] \quad (4.6)$$

Hvor:

$\Delta T_0 = T_2 - T_1 =$  Størrelsen på steglasten [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$x =$  Avstanden [m]

$t =$  Tid [t]

$\alpha = \lambda/c =$  Varmediffusiviteten [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$$\text{Erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} * \int_0^z e^{-t^2} dt \quad (4.7)$$

Ved å legge til forskjellen mellom utgangstemperaturen  $T_1$  og  $T_1=0^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta T_0^{\circ}\text{C}$ ) på begge sider av likhetstegnet, blir formel (4.6) gyldig i alle situasjoner. Dette er vist i Figur 9b. Den endelige formelen er gitt ved Formel (4.8).

$$T(x, t) = [T_{T_1=0^{\circ}\text{C}}(x, t) + \Delta T_0^{\circ}\text{C}] = \Delta T_0 * \left[ 1 - \text{Erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4\alpha t}}\right) \right] + \Delta T_0^{\circ}\text{C} \quad (4.8)$$

Hvor:

$\Delta T_0 = T_2 - T_1 =$  Størrelsen på steglasten [ $^{\circ}\text{C}$ ], inkludert  $\Delta T_0^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.5.1 Respons på steglaster når berget er vann- og frostsikret

I tilfeller der det ikke er et homogent medium, for eksempel berg som er kledd med vann- og frostsikring, er ikke formel ( 4.8) gyldig. Da må temperaturen innenfor isolasjonen, vist i Formel ( 4.9) brukes som utgangspunkt for Formel ( 4.5).

$$T_{\text{iso/berg}} = T_{\text{tunnelluft}} - \Delta T_{\text{iso}} \quad (4.9)$$

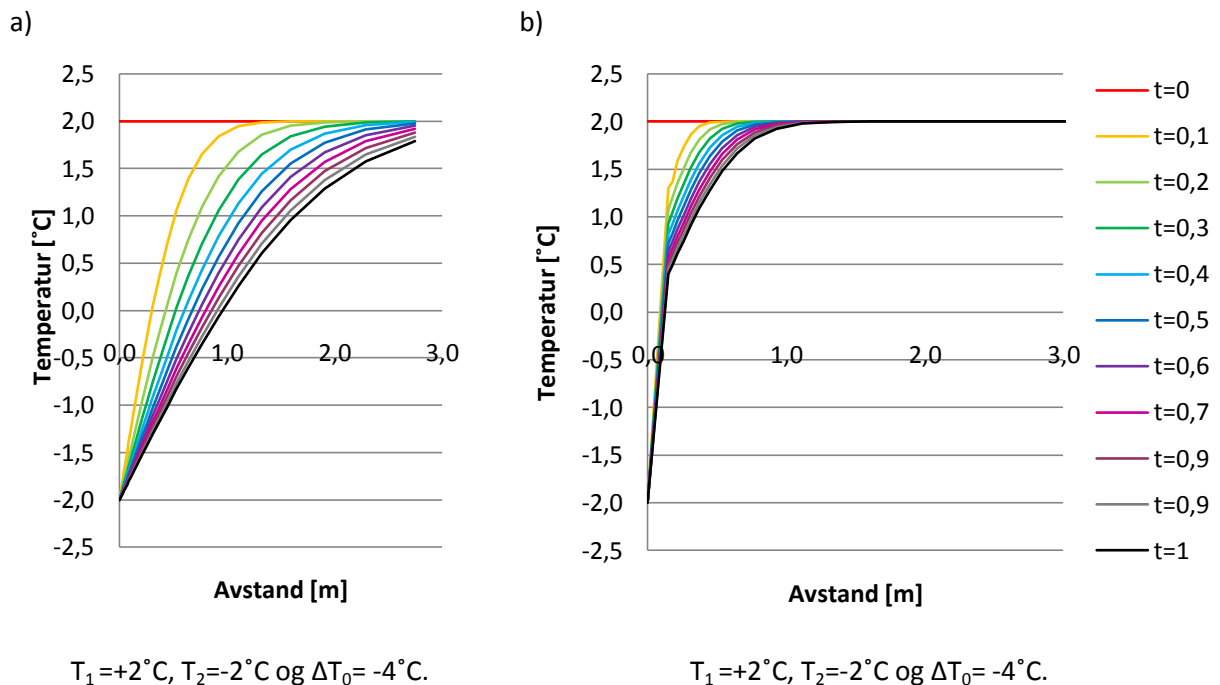
Hvor:

$T_{\text{iso/berg}}$  = Temperaturen i overgangen mellom isolasjonen og berget [°C]

$\Delta T_{\text{iso}}$  = Temperaturforskjellen over isolasjonen [°C]

For å kunne sammenligne resultatene fra tester med ulike steglaster med hverandre, og med teorien, må resultatene gjøres dimensjonsløse. Dette er nærmere beskrevet i Kapittel 0. Et ledd i denne prosessen er å gjøre om enheten med sprøytbetong, Masterseal og Støren-granitt til et homogent medium. Den teoretiske beregningen kan derfor gjøres ved Formel ( 4.5). På grunn av dette, vil ikke formelen for responsen på steglaster når berget er vann- og frostsikret bli nærmere omtalt i dette kapittelet, men utledningen kan sees i Vedlegg A.

Et eksempel på stegrespons for berg med og uten vann- og frostsikring er vist i Figur 10. I eksempelet har vann- og frostsikringen halvparten så god ledningsevne som berget.



Figur 10: A) Respons på steglaster når  $T_1 = +2^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = -2^\circ\text{C}$  og berget ikke er vann- og frostsikret. B) Respons på steglaster når  $T_1 = +2^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = -2^\circ\text{C}$  berget er vann- og frostsikret med 15 cm vann – og frostsikring.



#### 4.5.2 Respons på steglaster ved bruk av varmeovergangstall

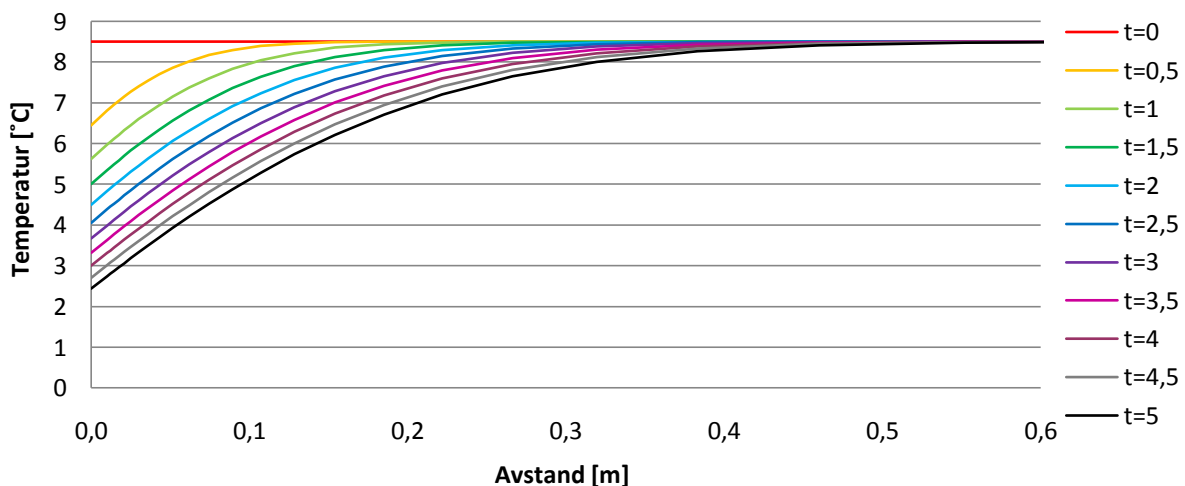
Hvis det er konveksjon langs overflaten mellom et fluid og et medium, vil responsen på steglaster bli annerledes enn om temperaturen på overflaten er konstant. Formelen for respons på steglaster ved konveksjon er gitt i Formel ( 4.10).

$$T(x, t) = \Delta T_0 \left[ \left( 1 - \operatorname{Erfi} \left( \frac{x}{\sqrt{4\alpha t}} \right) \right) - \left( e^{\frac{hx}{\lambda} + \frac{h^2 \alpha t}{\lambda^2}} \right) \left( 1 - \operatorname{Erfi} \left( \frac{x}{\sqrt{4\alpha t}} + \frac{h\sqrt{\alpha t}}{\lambda} \right) \right) \right] + \Delta T_0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.10)$$

Hvor:

$h$ = varmeovergangstallet [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]

Et eksempel på respons på steglaster ved bruk av varmeovergangstall er vist i Figur 11. I eksempelet har vann- og frostsikringen halvparten så god ledningsevne som berget.



$T_1 = +2^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = -2^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_0 = -4^\circ\text{C}$  og  $h = 36000 \text{ J}/\text{t} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}$ .

Figur 11: Respons på steglaster når  $T_1 = +2^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = -2^\circ\text{C}$  og en tar hensyn til konveksjon langs overflaten mellom luft og berg.

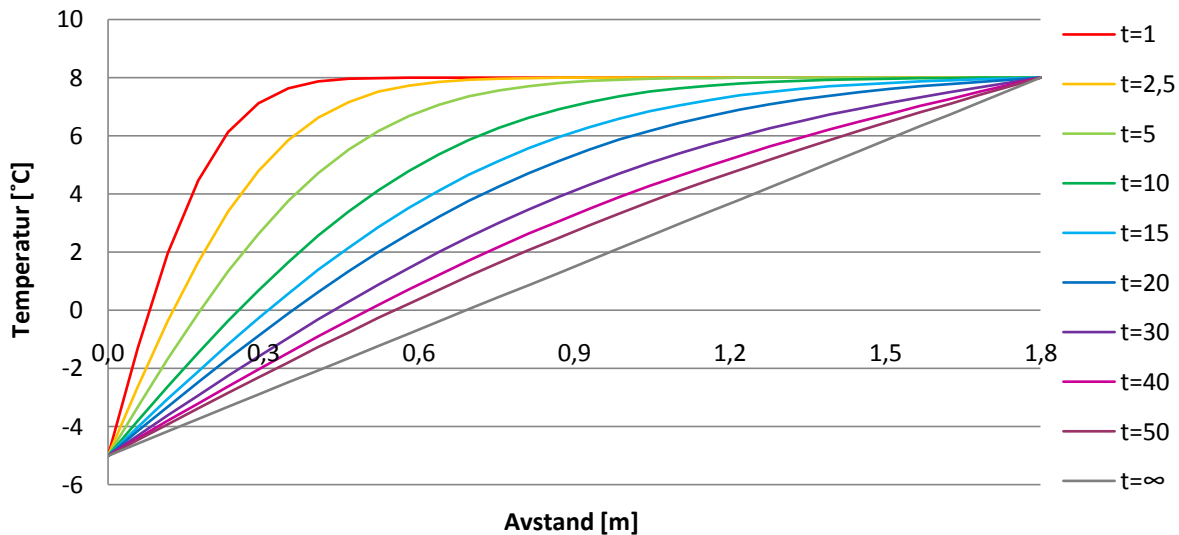
Varmeovergangen har størst innvirkning nær overgangen mellom fluid og medium, og for punkter lenger inn i berget vil løsningen som ikke tar hensyn til varmeovergangstallet gi tilnærmet samme respons.

#### 4.5.3 Respons på steglaster i et endelig medium

Formlene som har vært presentert så langt gjelder for uendelige medier. I en tunnel kan bergmassen betraktes som uendelig, og formlene vil gi gode svar. I fryselabben er det derimot en begrenset mengde berg, og temperaturen i Bergrommet holdes konstant. Dette innebærer at berget lengst mot Bergrommet aldri får temperatur ned mot frysepunktet. Formelen er vist i Formel ( 4.11). og utledningen kan sees i Vedlegg B.

$$u(x, t) = \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{2 \left( \frac{T_{berg} - |T_{luft}|}{L} \right) L}{n\pi} (-1)^n - \frac{2|T_{luft}|}{n\pi} [(-1)^n - 1] \right) \sin \frac{n\pi x}{L} e^{-\frac{\alpha(n\pi)^2}{L^2} t} \right] + \left[ \frac{T_{berg} - T_{luft}}{L} x + T_{luft} \right] \quad (4.11)$$

Figur 12 viser responsen i en 1,8 m lang steinblokk når temperaturen på den ene siden er -5 °C og +8 °C på den andre.



Figur 12: Respons på stegløst i en bergblokk på 1,8m med en temperatur på +8 °C når det er konstant -5 °C på den ene siden, og +8 °C på den andre siden.

#### 4.6 Respons på sinusvariasjoner

Løsningen på varmeledningsligningen når temperaturendringen følger en sinuskurve vil være ett ledd i en Fourier-rekke, og er gitt ved formel (4.12) (Andersland & Ladanyi, 2003).

$$T(x, t) = T_m + A * e^{-x * \sqrt{\frac{\pi}{\alpha * p}}} * \sin\left(\frac{2\pi}{p} * \sqrt{\frac{\alpha * p}{\pi}} * t - x\right) \quad (4.12)$$

Hvor:

$T_m$  = middeltemperaturen [°C]

A = amplituden, dvs utslag fra middeltemperaturen [°C]

x = avstand [m]

$\alpha = \lambda/c$  = Varmediffusiviteten [m<sup>2</sup>/s]

p = perioden,

t = tiden, må ha samme enhet som perioden

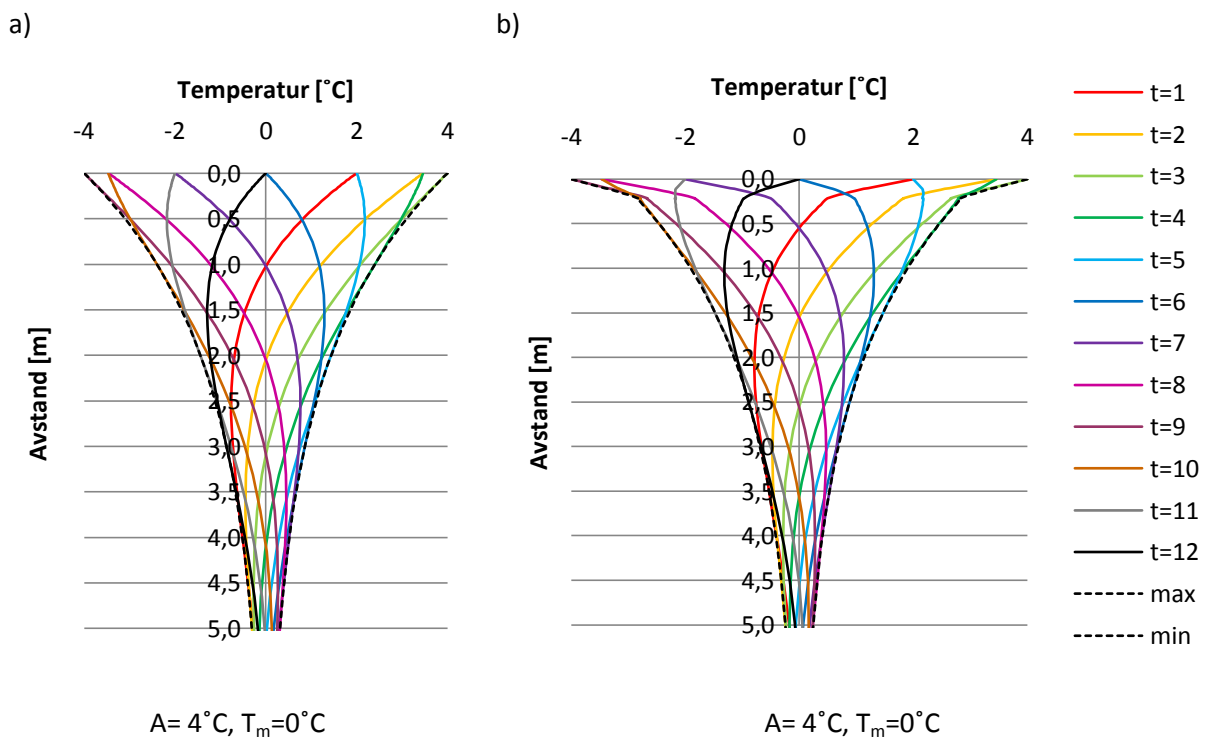
Sinusleddet representerer bølgen, med en avstand x og en forflytning  $c*t$ , der c er hastigheten på bølgen. Eksponentialleddet representerer dempningen av bølgen som funksjon av avstand, tid og diffusivitet. Dempningsleddet gjør at følsomheten for temperaturforandringer på overflaten vil avta

med økende lengde innover i berget, og at temperaturene i berget ikke svinger like mye som på overflaten.  $C*t$ - leddet representerer en forsinket respons på temperaturendringene, og gjør at det kan være minusgrader i berget et godt stykke ut på våren, selv om det er varmegrader i lufta.

For at formel ( 4.12) skal være gyldig er det gjort to forenklinger. Den første forenklingen er at temperaturfordelingen følger en sinuskurve over en periode. Dette betyr at høyfrekvente temperatursvingninger er neglisjert. Slike høyfrekvente svingninger dør rask ut når de kommer inn i berget, og påvirker derfor ikke temperaturen i stor grad. For at temperaturfordelingen skal følge en sinuskurve, må den virkelige lufttemperatursvingningen tilpasses til en teoretisk. Denne tilpassingen vil, i mange tilfeller, ikke avvike mye fra virkeligheten. Den andre forenklingen er at en ser bort fra varmestrømmen fra jordas indre. Denne varmestrømmen avhenger av litosfærens tykkelse (Marshak, 2005), og i Norge varierer den mellom 1,4 °C/100m og 3,0 °C/100m (Iversen, Edvard, 1997). Denne varmen vil virke inn på temperaturen i berggrunnen, og bør derfor egentlig tas med i beregningene. Varmestrømmen fra jordens indre kan legges til temperaturen fra varmeledningsligningen,  $T(x)$ , som et eget ledd,  $\beta*x$ , der  $\beta$  er varmestrømmen fra jordens indre gitt i °C/m.

#### 4.6.1 Respons på sinusvariasjoner når berget er vann- og frostsikret

Også for sinusvariasjoner vil responsen være forskjellig avhengig av om berget er vann- og frostsikret eller ikke, noe som krever en modifisering av formel ( 4.12). Av samme grunn som nevnt i Kapittel 4.5.1, blir heller ikke denne formelen nærmere omtalt her, men den er vist i Vedlegg C.



Figur 13: A) Respons på sinusvariasjon når  $A=4^{\circ}\text{C}$ ,  $T_m=0^{\circ}\text{C}$  og berget ikke er vann- og frostsikret. B) respons på sinusvariasjon når  $A=4^{\circ}\text{C}$ ,  $T_m=0^{\circ}\text{C}$  og berget er vann- og frostsikret.

Et eksempel på sinusvariasjoner for berg med og uten vann- og frostsikring er vist i Figur 13. I eksempelet har berget ti ganger ledningsevnen til vann- og frostsikringen.

## 5 Innledende tester i fryselabben

Som tidligere nevnt er det aldri gjort slike tester i Norge før, og derfor heller ikke etablert noen testprosedyrer. Teorien er klar, både for steglaster og sinusvariasjoner over en gitt periode. Utfordringen er å finne den eller de testene som gir best, og mest, resultater i løpet av en begrenset periode. Resultatene fra disse testene kan så brukes til å optimalisere en numerisk modell som kan kjøres over lengre tidsrom, og med ulike temperaturvariasjoner.

Ved å se på frostmengden vann- og frostsikringen har vært utsatt for når første negative temperatur blir registrert bak membranen kan en også få en pekepinn på om frostmengde er et fornuftig mål på hvor mye vann- og frostsikringen tåler.

Som beskrevet i oppgaveteksten har en del av denne masteroppgaven bestått i "å være med å planlegge de første testene som skal gjennomføres i laboratoriet" samt "følge opp fortløpende alle tester og inngå i prosjektteamet som gjør denne testing for Jernbaneverket". Prosjektteamet som har gjort denne testingen av Masterseal for JBV har bestått av Eiving Grøv og Trond Erik Larsen fra SINTEF, Håkon Skistad fra Siv. Ing. Håkon Skistad og undertegnede. Kontaktpersonene i JBV, Brede Nermoen og BASF, Kar-Gunnar Holter, har ikke inngått i teamet, men har vært dialog underveis i prosessen. Nedenfor følger en beskrivelse av de planlagte restene i fryselabben. En kort beskrivelse av prosessen med testteamet er vist i Vedlegg D.

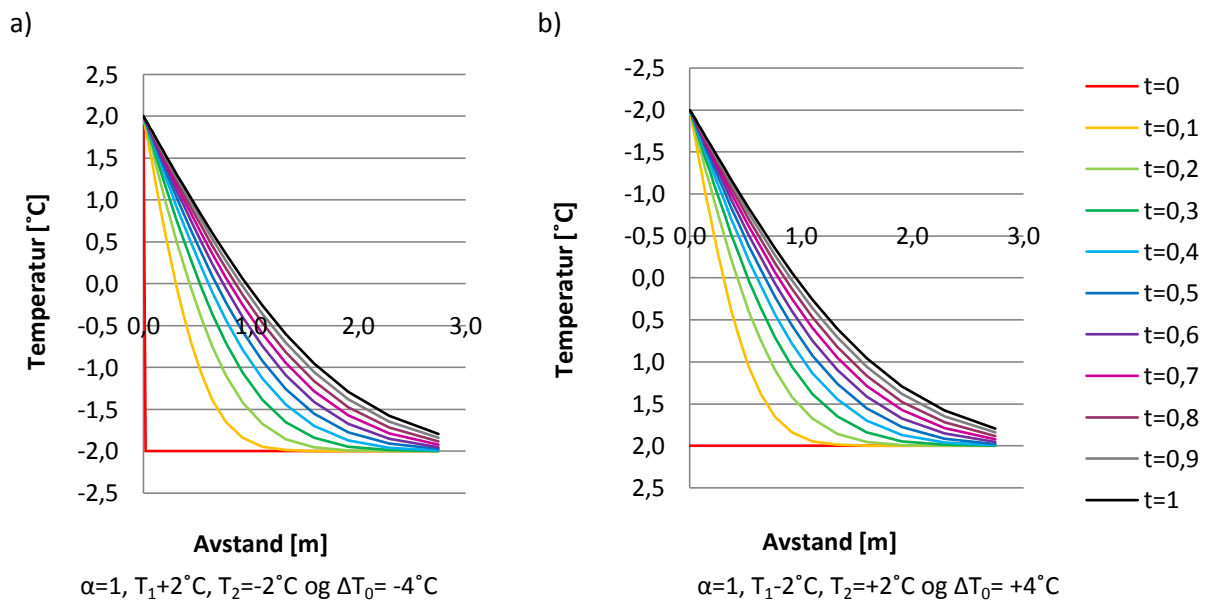
### 5.1 Temperatur i Bergrommet

Som beskrevet i kapittel 4 er det størrelsen på temperaturendringen for steglaster, og amplituden for sinusvariasjoner, som er viktig med tanke på responsen. Temperaturen i Bergrommet er derfor ikke avgjørende for kvaliteten på resultatene fra testene. Men for å få så naturtro resultat som mulig, er det naturlig å velge samme temperatur som stedet det skal testes for. For testingen av Masterseal er det derfor temperaturen i Bergrommet lik det en kan forvente i Gevingåsen.

Som en tommelfingerregel kan man anta at temperaturen i berggrunnene er 1-2 °C høyere enn årsmiddeltemperaturen utenfor ([www.ngu.no](http://www.ngu.no)). Bergoverdekning, løsmassemekthet, vegetasjon og snøoverdekning kan bidra til at temperaturen blir enda litt høyere (Vassenden S. , 2009). Gevingåsen jernbanetunnel går mellom kommunene Malvik og Stjørdal, som begge har en gjennomsnittstemperatur på +5°C. Gevingåsen er bevokst, og det er snø i området på vinteren. For å gjenskape forholdene i tunnelen best mulig, er temperaturen i Bergrommet derfor satt til +8°C. Denne temperaturen gjelder for alle forsøkene utført i fryselabben i forbindelse med testingen av Masterseal.

### 5.2 Testplan for innledende testing

For å bli kjent med fryselabben og se at alt virker som det skal, er det hensiktsmessig å begynne testingen med den enkleste formen for temperaturvariasjoner, steglaster. Steglaster er enkle å gjennomføre fordi temperaturendringen skjer én gang. Når temperaturen har jevnet seg ut, kan temperaturen stilles tilbake til utgangsverdien. Siden størrelse på steglaster er den samme, bare med motsatt fortegn, skal responsen bli lik. Utgangstemperaturen i bergmassen må uansett gjenopprettes før neste test, så egentlig er det to tester i én. Et eksempel på to like store steglaster med motsatt fortegn er vist i Figur 14. Merk at y-aksen viser verdier i motsatt rekkefølge i Figur b og at det ikke er beregnet for Støren-granitt, men et vilkårlig materiale med  $\alpha=1 \text{ m/s}^2$ .



Figur 14: A) Respons på steglaster når  $T_1=+2^\circ\text{C}$  og  $T_2=-2^\circ\text{C}$ . B) Respons på steglaster når  $T_1=-2^\circ\text{C}$  og  $T_2=+2^\circ\text{C}$ .

For å kontrollere om vann- og frostsikringen endrer egenskaper med temperatur, bør det testes med minst to forskjellige steglaster, der en er større enn den andre. Størrelsen på steglaster avhenger av utgangstemperaturen, det vil si temperaturen i bergmassen, og kapasiteten til kjøleaggregatet. For testingen av Masterseal er steglaster bestemt til hhv  $-13^\circ\text{C}$  og  $-28^\circ\text{C}$ . Disse størrelsene kan tilpasset vann- og frostsikringen som skal testes.

Formel ( 4.11) viser at temperaturen gjennom mediet etter hvert vil stabilisere seg, se Figur 12. Testene bør derfor kjøres over så lang tid at temperaturen har stabilisert seg i både sprøytbetongen, Mastersealen og Støren-granitten. Et estimat for tidsforbruket kan finnes ved hjelp av Formel ( 4.11) før testen begynner, men det er viktig å kontrollere med resultatene at temperaturen er stabil før testen reverseres. For at responsen på reverseringen av forsøket skal bli riktig er det viktig at døren til Tunnelrommet holdes lukket, og at det kun er fryseaggregatet som sørger for temperaturøkningen. Tabell 1 viser detaljene for de planlagte steglaster i fryselabben. Merk at det estimerte tidsforbruket ikke gjelder returen av forsøket, og returen bør logges like lenge som steglaster varte.

Tabell 1: Planlagte steglaster i fryselabben.

Test nr:	Temp i Bergrommet( $T_1$ )	Temp i Tunnelrommet( $T_2$ )	$\Delta T_0$	Estimert tidsforbruk
F-1	$8^\circ\text{C}$	$-5^\circ\text{C}$	$-13^\circ\text{C}$	250-300 t
F-2	$8^\circ\text{C}$	$-20^\circ\text{C}$	$-28^\circ\text{C}$	200-250 t

Resultatene av testene vil bli presentert i kapittel 8.

## 6 Utfyllende testing i fryselabben

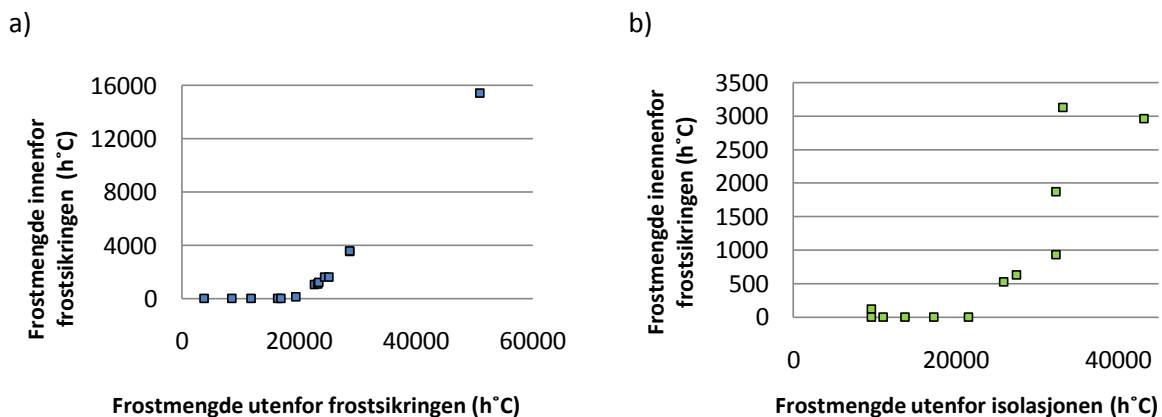
Som nevnt i forrige kapittel er steglaster en fin måte å bli kjent med fryselabben på, men steglaster som går over lange tidsrom er ikke en naturlig form for temperaturvariasjon. I virkeligheten varierer temperaturen gjennom timer, gjennom døgnet og gjennom året. Som nevnt i kapittel 4.6, er disse variasjonene tilnærmet lik sinussvingninger. Testene som følger etter steglattestene bør derfor være med temperatursvingninger som følger en sinuskurve.

Det fins styringssystemer for kjøleaggregatet i Tunnelrommet som kan programmeres til å følge sinuskurver. Sett i forhold til kostnadene ved bygging av fryselabben er dette styringssystemet relativt kostbart. Et interessant spørsmål i den sammenheng er om sinusvariasjoner og gjentatte steglaster gir tilnærmet lik respons med tanke på sluttemperatur og frostdyp dersom frostmengden er den samme. Hvis det er tilfelle, kan innkjøp av styringssystemet for kjøleaggregatet i Tunnelrommet unngås.

### 6.1 Kontroll i TEMP/W

For å sjekke om repeterte steglaster og sinusvariasjoner gir lignende responser, ble modellen i TEMP/W benyttet. Denne modellen vil bli nærmere beskrevet i Kapittel 10. Før beregningene kan gjøres, er det nødvendig å konstruere to temperaturvariasjoner med samme totale frostmengde.

Erfaringer fra undertegnede prosjektoppgave høsten 2009, *Frostinntrengning i norske vegtunneler*, viser at vann- og frostsikringen har en grenseverdi med tanke på frostmengde dersom den utsettes for naturlige temperaturvariasjoner, det vil si et naturlig forhold mellom amplituder og frekvens. Dette er vist i Figur 15.



Figur 15: A) Frostmengde innenfor frostsikringen som funksjon av frostmengden utenfor frostsikringen ved naturlige temperaturvariasjoner. B) Frostmengde innenfor frostsikringen som funksjon av frostmengden utenfor frostsikringen ved vilkårlige temperaturvariasjoner (Vassenden S. , 2009).

Som utgangspunkt for modelleringen i TEMP/W er det derfor forsøkt å etterligne forholdene ved Gevingåsen best mulig. Det er frostmengden som opptrer hvert andre år,  $F_2$  (Statens Vegvesen, 2006), som er brukt, og perioden er satt til 24 timer. Tabell 2 viser de verdiene som er brukt som grunnlag for konstruering av temperaturvariasjonene.

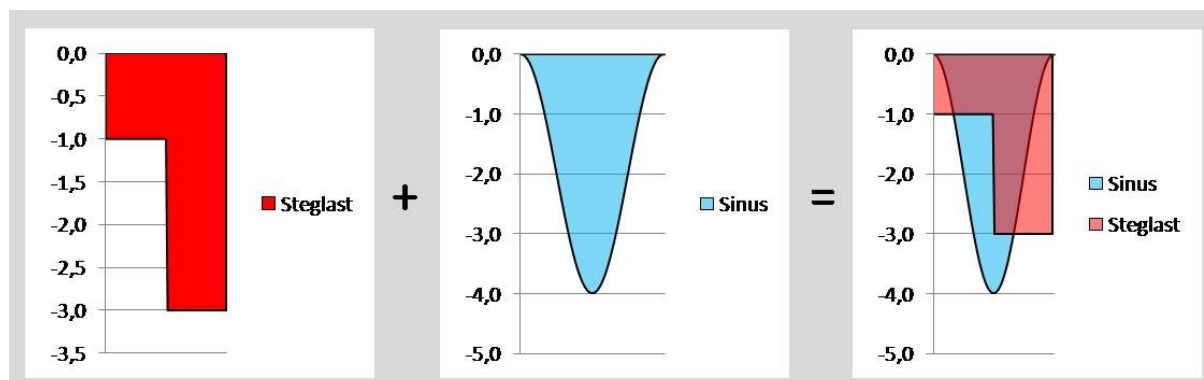
Tabell 2: Klimadata for Gevingåsen og valgt periode.

Bakgrunn for temperaturvariasjoner til test T-3 og T-4.	
Total frostmengde	6000 t°C
Døgn med frost	125 døgn = 3000 t
Gjennomsnittstemperatur	-2 °C
Periode (P)	24 t
Frostmengde (F) pr periode	- 48 t°C

Beregningene av temperaturvariasjonene er vist i Vedlegg D. Figur 16 viser steglaster og sinusvariasjonen som passer til klimadataene. Andre betingelser for test i TEMP/W er presentert i Tabell 3.

Tabell 3: Betingelser for testing i TEMP/W.

Test nr:	Temp i Bergrommet( $T_1$ )	Temp i Tunnelrommet( $T_2$ )	Varighet
T-3	8 °C	Steglaster, se Figur 16.	3000 t
T-4	8 °C	Sinusvariasjon, se Figur 16.	3000 t

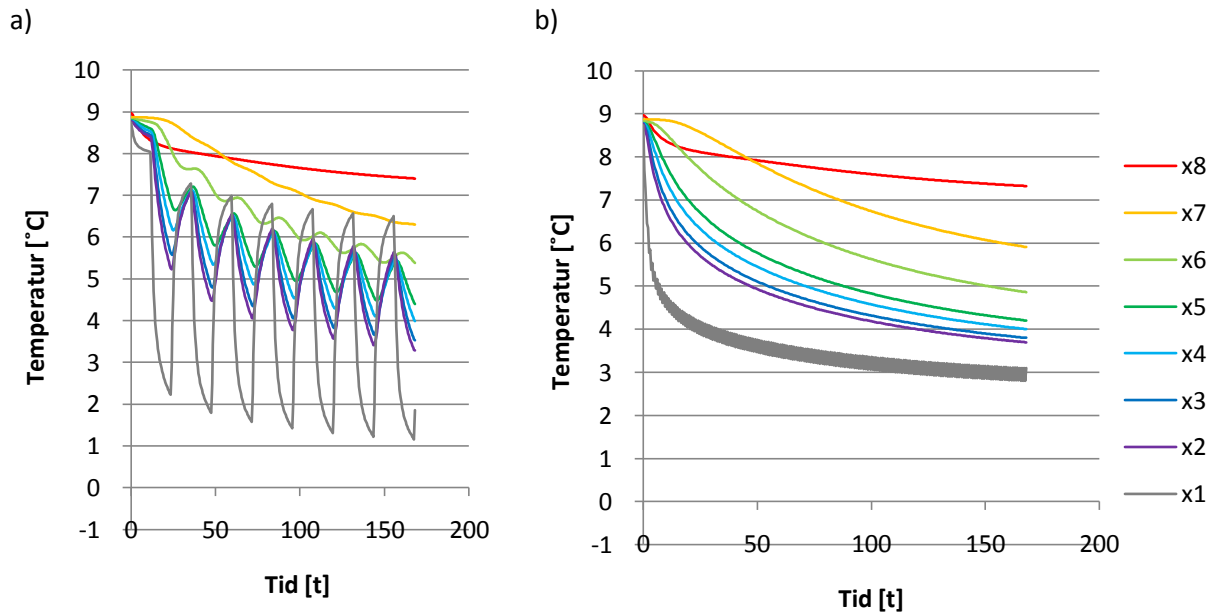


Figur 16: Steglaster og sinusvariasjon med samme frostmengde.

Resultatene fra beregningen i TEMP/W viste at forskjellene med tanke på temperatur og frysedyb, med de konstruerte temperaturvariasjonene, er minimale. (Disse vil bli nærmere presentert i Kapittel 11). De videre testene i fryselabben kan derfor gjøres med gjentatte steglaster.

## 6.2 Testplan utfyllende testing

For å etterligne naturlige temperaturvariasjoner mest mulig er det hensiktsmessig å kjøre testene i fryselabben med den konstruerte temperaturvariasjonen presentert ovenfor. Erfaringer fra undertegnede prosjektoppgave viser at ved å øke frekvensen på endringene mister en effekten av temperaturendringene, og på et tidspunkt blir resultatet likt som én steglaster med temperatur lik gjennomsnittstemperaturen for de gjentatte steglasterne. Et eksempel er vist i Figur 17.



$T_{\text{middel}} = 3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_0 = \pm 6 \text{ } ^\circ\text{C}$  og  $p = 24 \text{ t}$

$T_{\text{middel}} = 3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_0 = \pm 3 \text{ } ^\circ\text{C}$  og  $p = 1 \text{ t}$

**Figur 17: A) Respons på repeterte steglaster der  $T_m = 3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_0 = \pm 3 \text{ } ^\circ\text{C}$  og  $p = 24 \text{ t}$ . B) Repeterte steglaster der  $T_m = 3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_0 = \pm 3 \text{ } ^\circ\text{C}$  og  $p = 1 \text{ t}$ . (Vassenden S., 2009).**

Hvis temperaturen må endres manuelt er det fare for avvik fra tidsskjemaet. Jo flere ganger i døgnet temperaturen skal stilles, jo større blir faren for avvik. Det er derfor viktig med gode rutiner og klar ansvarsfordeling ved manuell stilling av temperaturen. Et system med nedtelling til neste gang temperaturen skal endres er nødvendig. For fryselabben har Anders Storler laget et program som styrer temperaturen, noe som øker nøyaktigheten betraktelig. Det er like vel nødvendig med jevnlig kontroll for å sjekke at det virker som det skal.

For det endelige resultatet spiller det ingen rolle om testen begynner med  $-1 \text{ } ^\circ\text{C}$  eller  $-3 \text{ } ^\circ\text{C}$ , men for å få et jevnere temperaturforløp, og et mer naturlig temperatursprang, er det mest fornuftig å begynne med  $-1 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

På samme måte som for enkle steglaster vil temperaturen i sprøytbetongen, Mastersealen og Størengranitten etter hvert stabilisere seg. Det er derfor viktig å kjøre forsøket inntil temperaturen er stabilisert. Et estimat for tidsforbruket kan finnes ved hjelp av Formel ( 4.11), der en setter størrelsen av steglaster lik middeltemperaturen. Det er like vel viktig å kontrollere med resultatene at temperaturen er stabil før testen avsluttes. Tabell 4 viser den planlagte testen med gjentatte steglaster i fryselabben.

**Tabell 4: Planlagt test med gjentatte steglaster i fryselabben.**

Test nr:	Temp i Bergrommet( $T_1$ )	Temp i Tunnelrommet( $T_2$ )	$\Delta T_0$	Estimert tidsforbruk
F-3	$8 \text{ } ^\circ\text{C}$	Gjentatte steglaster fra en utgangstemperatur på $-1 \text{ } ^\circ\text{C}$ .	$\pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$	350-450 t

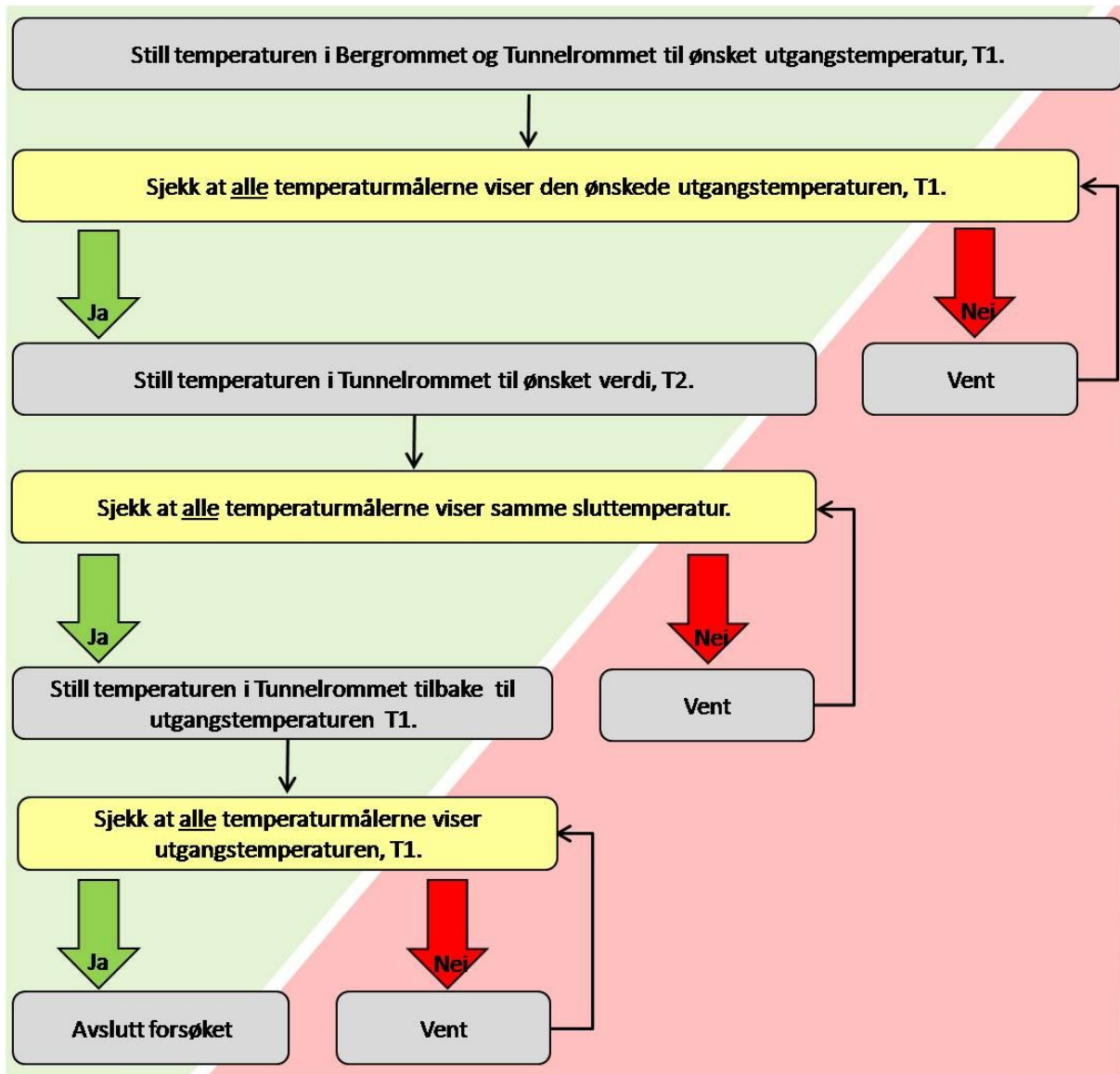


## 7 Testprosedyrer for fryselabben

For å sikre at alle tester i fryselabben blir mest mulig like, er det viktig med gode rutiner for testingen. Nedenfor følger testprosedyren for de planlagte testene.

### 7.1 Testprosedyre for testing med enkle steglaster

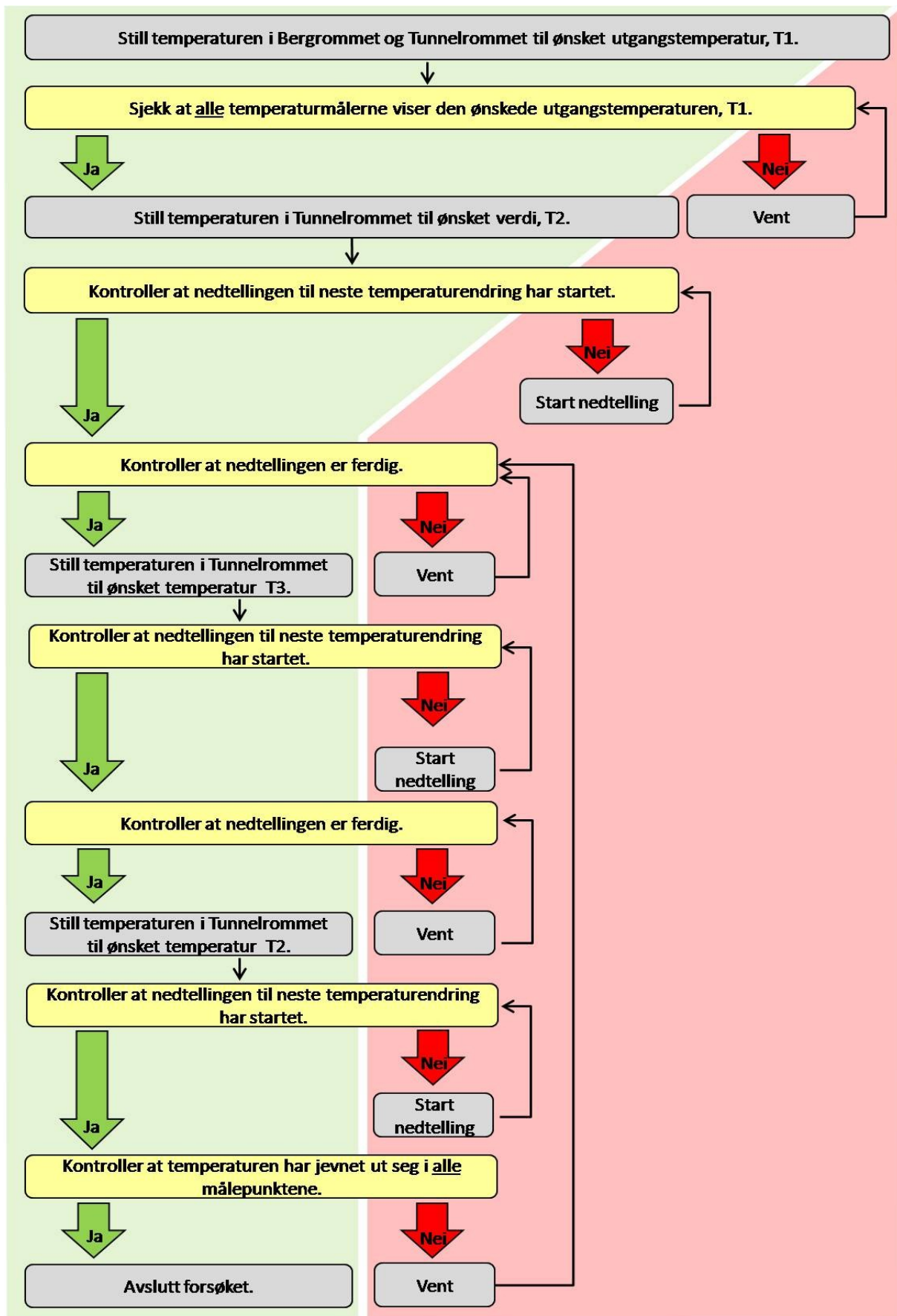
Figur 18 viser prosedyren for utførelse av steglasterforsøk.



Figur 18: Testprosedyre for steglasterforsøk.

### 7.2 Testprosedyre steglaster i serie

Figur 19 viser prosedyren for utførelse av forsøk med gjentatte steglaster ved når det er manuell styring av temperaturen.



Figur 19: Testprosedyre for forsøk med gjentatte steglaster og manuell styring av temperatur.

## 8 Resultater fryselabb

Siden blokken B2 er valgt som utgangspunkt for testene i TEMP/W er det resultatene fra B-2 blokken som blir presentert i dette kapitlet. Resultater fra blokkene A2, A3, B2, og B3, samt resultater for alle målerne med samme x-verdi kan sees i Vedlegg F, Vedlegg G og Vedlegg H. For å redusere mengden data er ikke resultatene for blokkene A1, A4, B1 og B4 presentert i denne masteroppgaven. Resultatene for de enkelte målernumrene viser at de ikke avviker fra de blokkene som er presentert. Resultatet for C-blokkene er heller ikke presentert, da det bare er to målepunkt i blokkene C2 og C3, og ingen i C1 og C4.

Resultater fra alle målerne bak membranen og temperaturen i Bergrommet og Tunnelrommet er også presentert for alle forsøkene.

### 8.1 Faktorer som kan påvirke resultatene

Det er noen faktorer som kan påvirke resultatene fra fryselabben. Nedenfor følger en kort diskusjon av disse.

Alle målepunktene ble nøye innmålt før montering, men hullene temperaturmålerne ligger i er boret for hånd. En kan derfor forvente et vist borhullsavvik. Dessuten er det brukt en bor med diameter på 6 mm. Det innebærer at målerens plassering nede i hullet også kan avvike litt. Til sammen kan det utgjøre  $\pm 5$  mm fra den teoretiske plasseringen (Larsen, pers. med. vår 2010). Dette vil gi størst utslag på de første målepunktene, som bare er to og fire cm inn i Støren-granitten.

For målepunktene bak membranen er det flere usikkerheter. Etter påføringen av sprøytebetongen ble det risset inn slisser som disse målerne ligger i. Disse slissene er laget på frihånd, noe som kan ha resultert i ulik dybde. På grunn av varierende kornstørrelser i tilslagsmaterialet til sprøytbetongen er heller ikke overflaten helt jevn. Dette kan resultere i litt varierende tykkelse, både på sprøytbetongen og Mastersealen. Denne usikkerheten i avstanden fra overflaten og inn til målepunktene er i størrelsesorden  $\pm 2,5$  mm (Larsen, pers. med. vår 2010).

Luftstrømmer i Tunnelrommet på grunn av kjøleaggregatet kan også forklare hvorfor det er ulike temperaturer innenfor membranen.

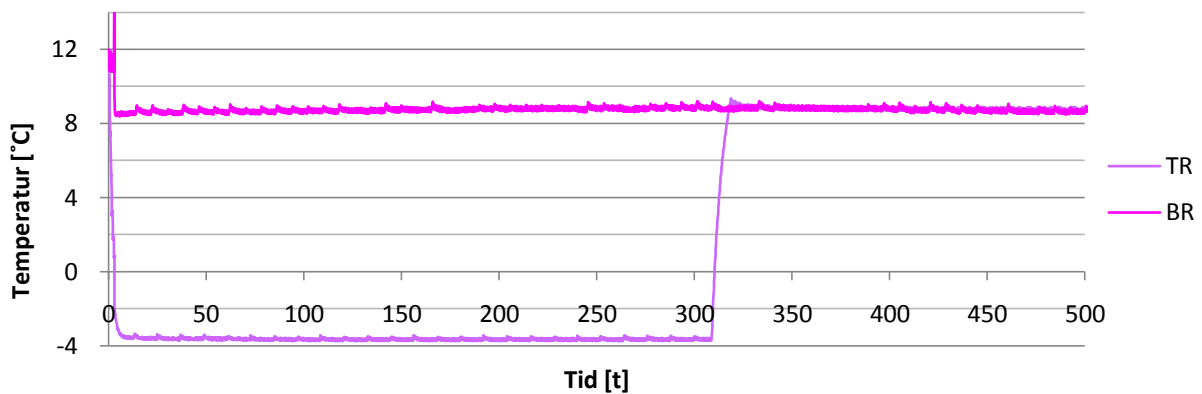
Før forsøkene startet ble temperaturen Bergrommet og Tunnelrommet stilt likt, slik at temperaturen i Støren-granitten skulle bli jevn. Loggen viser at temperaturen ikke var helt lik i alle målepunktene, men at temperaturen varierte med  $\pm 0,25$  °C.

I tillegg er det en viss usikkerhet i målingene som diskutert i Kapittel 3.4.1.

## 8.2 Resultat F-1

**Feil! Fant ikke referanseilden.** viser den loggede temperaturen i Tunnelrommet og Bergrommet under forøk F-1, der  $T_1 = 8,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = -3,6 \text{ }^\circ\text{C}$  og  $\Delta T_0 = -13 \text{ }^\circ\text{C}$ . Flere resultater kan sees i Vedlegg F.

For forsøk F-1 ble temperaturen i Tunnelrommet stilt til  $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ , og temperaturen i Bergrommet til  $+8 \text{ }^\circ\text{C}$ . Resultatet ble, som figuren viser, en temperatur på  $-3,6 \text{ }^\circ\text{C}$  i Tunnelrommet og  $+8,5 \text{ }^\circ\text{C}$  i Bergrommet. Merk at forsøk F-1 ble reversert etter 310 timer.



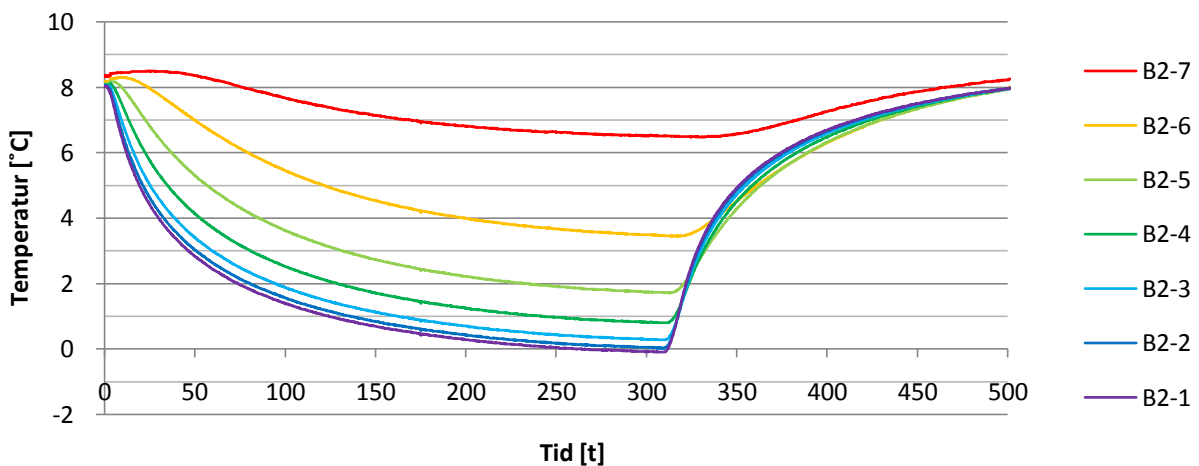
Figur 20: Temperaturen i Bergrommet og Tunnelrommet under forsøk F-1, der  $T_1 = 8,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = -3,6 \text{ }^\circ\text{C}$  og  $\Delta T_0 = -13 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Som figuren viser, øker temperaturen i Bergrommet fram mot  $t=310 \text{ t}$ , da forsøket reverseres. Det er snakk om en temperaturforskjell på  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  over denne perioden. Etter at forsøket er reversert, synker temperaturen igjen. Derfra og til forsøket avsluttes er det snakk om en temperaturforskjell på  $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Disse temperaturforskjellene har sannsynligvis ikke påvirket det totale resultatet i stor grad, siden forskjellen er så liten i forhold til størrelsen på steglaster. Rett etter oppstart er temperaturen i Bergrommet oppe i  $+13 \text{ }^\circ\text{C}$ . Det kan være en målefeil, men hvis den reelle temperaturen var så høy, vil den sannsynligvis ikke virke inn på det totale resultatet siden varigheten er så kort.

Etter oppstarten kommer temperaturen i Tunnelrommet kommer ned på  $-3,6 \text{ }^\circ\text{C}$  etter 3 timer, og holder seg stabil fram til reversering av forsøket. Etter reverseringen kommer temperaturen i Tunnelrommet opp i  $+8,5 \text{ }^\circ\text{C}$  etter sju timer, og denne temperaturen holder seg stabil til forsøket avsluttes. Hvis det hadde tatt lenger tid å endre temperaturen i Tunnelrommet kunne det ha påvirket resultatet, men siden det i dette forsøket er snakk om maks sju timer er temperaturendringene nesten perfekte steglaster.

Temperaturen i begge rommene svinger kontinuerlig gjennom forsøket. Disse svingningene er i størrelsesorden  $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  fra middelverdien over en representativ periode. Dette påvirker trolig heller ikke resultatet siden varigheten på hver svingning er så kort.

Figur 21 viser den loggede temperaturen for målepunktene 1-7 i blokken B2 under forsøk F-1.



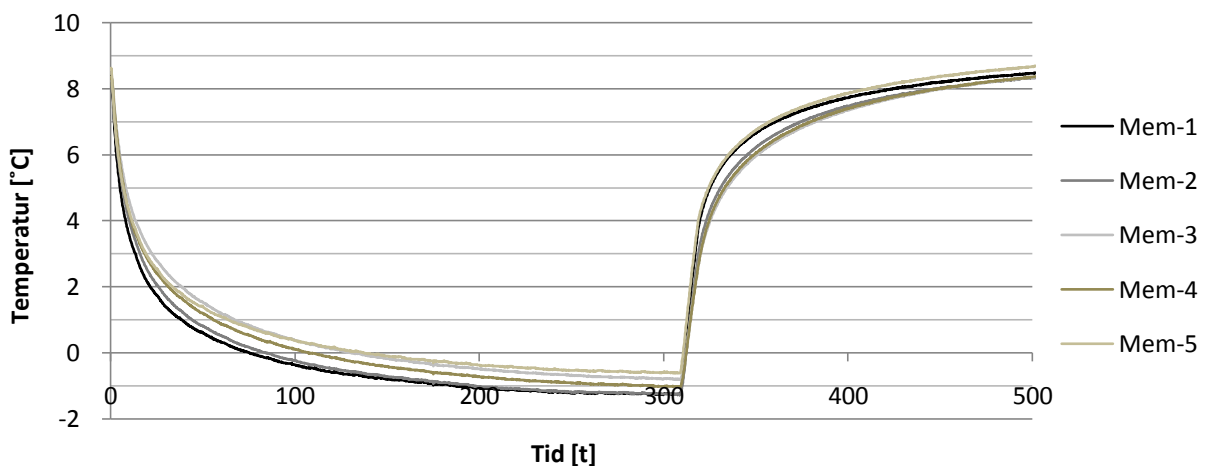
Figur 21: Resultater fra B2-blokken under forsøk F-1, der  $T_1 = 8,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = -3,6 \text{ }^\circ\text{C}$  og  $\Delta T_0 = -13 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Som figuren viser, ble det målt negative temperaturer i B2-1 etter 260 timer. Det er ikke målt negative temperaturer i noen av de andre målerne, men loggen for B2-2 viser temperaturer helt ned mot  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Dette betyr at frostfronten har nådd nesten fire cm inn i Støren-granitten. Laveste målte temperatur er  $-0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  i B2-1. Hvis forsøket hadde blitt kjørt lenger, hadde denne temperaturen vært lavere. Men som figuren viser, var temperaturen i ferd med å stabilisere seg da forsøket ble reversert, så den hadde ikke blitt veldig mye lavere enn  $-0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Etter at forsøket er reversert, viser figuren at kurvene faller sammen mot ei linje, med unntak av kurven for B2-7. Hvis forsøket hadde vært kjørt 100 timer til, hadde sannsynligvis kurven for B2-7 falt sammen med de andre linjene også. Det faktum at linjene faller sammen, er akkurat som forventet ut fra teorien presentert i Kapittel 4.

Den lille stigningen i temperatur i starten for målepunktene B2-4 til B2-7 skyldes trolig ujevne temperaturer i berget i det forsøket startet.

Figur 22 viser den loggede temperaturen for målepunktene bak membranen under forsøk F-1.



Figur 22: Resultater fra målerne bak membranen under forsøk F-1, der  $T_1 = 8,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = -3,6 \text{ }^\circ\text{C}$  og  $\Delta T_0 = -13 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Som figuren viser, er det små forskjeller mellom målepunktene, og alle ligger innenfor 0,75 °C, både ved t=310 timer og når forsøket avsluttes.

Den første måleren, Mem-1, måler negative temperaturer bak membranen etter 75 timer. Etter 150 timer måler alle målerne negative temperaturer. I det forsøket reverseres er laveste målte temperatur bak membranen -1,25 °C og høyeste målte temperatur er -0,6 °C.

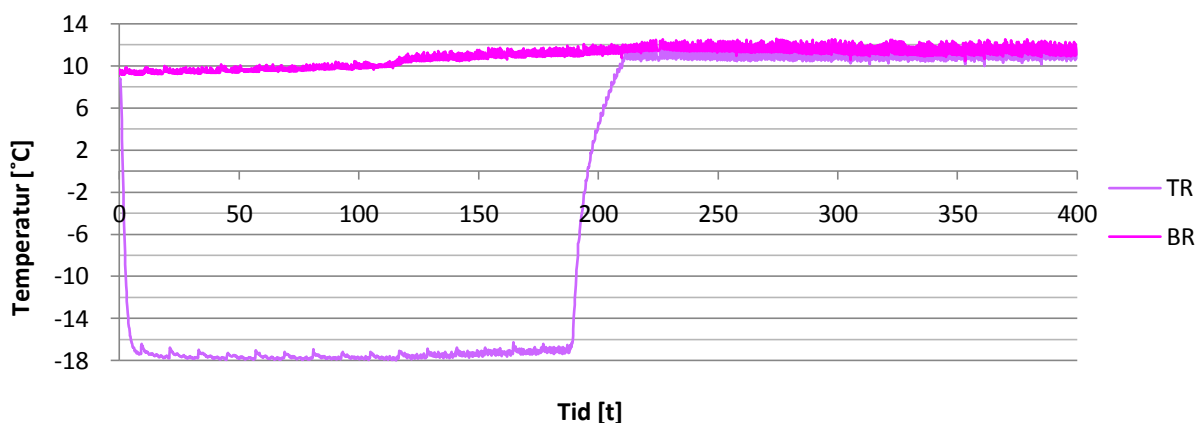
Kurvene for Mem-1 og Mem-2 faller og stiger litt raskere enn de tre andre målerne. Dette kan skyldes ujevnheter i Masterseal- og sprøytbetongtykkelsene. En annen forklaring kan være at forskjeller i luftstrømmer i Tunnelrommet. Mem-1 og Mem-2 er de målerne som ligger lengst unna kjøleaggregatet, og der kan luftstrømmen være annerledes enn den er nærmere kjøleaggregatet.

### 8.3 Resultat F-2

Siden forsøk F-1 ble kjørt to ganger og den siste gangen er presentert i denne masteroppgaven, ble forsøk F-2 kjørt før F-1. Underveis i forsøk F-2 ble det gjort utbedringer på temperaturmålerne i Tunnelrommet og Bergrommet, noe som resulterte i jevnere temperaturlogg. Det er derfor ikke sikkert at den faktiske temperaturforskjellen fra loggetidspunkt til loggetidspunkt er så stor som det som vises i loggen.

Figur 23 viser den loggede lufttemperaturen i Bergrommet og Tunnelrommet under forsøk F-2, der  $T_1 = 8,5$  °C,  $T_2 = -17,6$  °C og  $\Delta T_0 = -26,1$  °C. Flere resultater kan sees i Vedlegg G.

For forsøk F-2 ble temperaturen i Tunnelrommet stilt til -20 °C, og temperaturen i Bergrommet til +8 °C. Resultatet ble, som figuren viser, en temperatur på -17,5 °C i Tunnelrommet og +9,5 til +11,5 °C i Bergrommet. Merk at forsøk F-2 ble reversert etter 190 timer.



Figur 23: Temperaturen i Bergrommet og Tunnelrommet under forsøk F-2, der  $T_1 = 8,5$  °C,  $T_2 = -17,6$  °C og  $\Delta T_0 = -26,1$  °C.

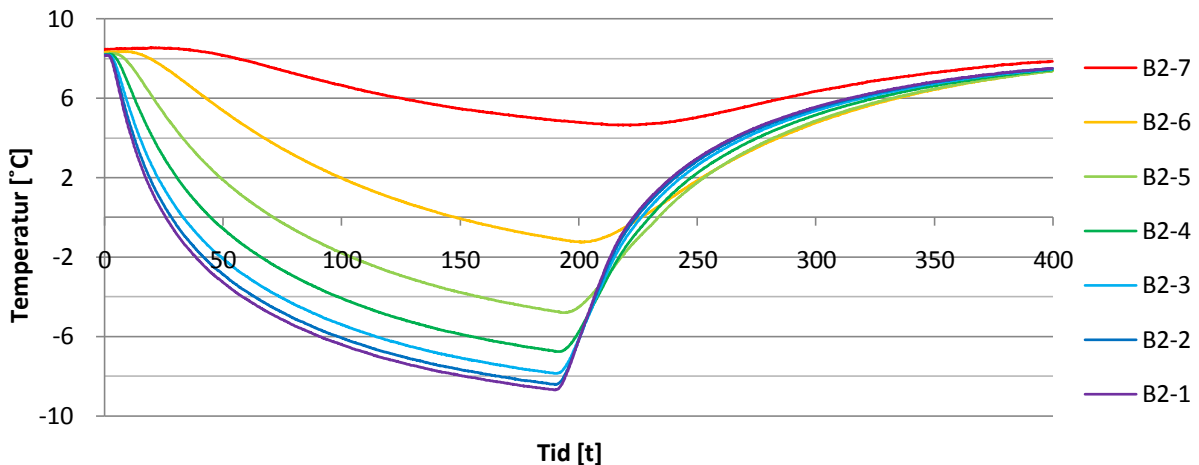
Som figuren viser, varierte temperaturene i Tunnelrommet og Bergrommet mer enn de gjorde under forsøk F-1. Temperaturen i Bergrommet stiger fra +9,5 °C til +10 °C i løpet av de første 110 timene. I løpet av de neste 100 timene øker temperaturen til +11,5 °C. Deretter holder temperaturen seg konstant. Fra starten av forsøket til slutten av forsøket varierer temperaturen med 2°C. Denne forskjellen er så stor at det sannsynligvis vil påvirke det endelige resultatet.

Etter oppstarten kommer temperaturen i Tunnelrommet ned i -17,5 °C etter fem timer, og den holder seg stabil i 125 timer. De neste 70 timene, fram til reverseringen av forsøket, stiger temperaturen med 0,5 °C, til -17 °C. Etter reverseringen tar det 20 timer før temperaturen er oppe i

+11 °C. Denne temperaturen holder seg konstant til forsøket avsluttes. Etter reverseringen av forsøket kan det totale resultatet ha blitt påvirket av den lange tiden det tok å få +11 °C i Tunnelrommet.

Temperaturen i begge rommene svinger kontinuerlig gjennom forsøket. Disse svingningene er i størrelsesorden  $\pm 0,3$  °C fra middelveien over en representativ periode. Dette påvirker trolig heller ikke resultatet siden varigheten på hver svingning er så kort.

Figur 24 viser den loggede temperaturen for målepunktene 1-7 i blokken B2 under forsøk F-2.



Figur 24: Resultater fra B2-blokken under forsøk F-2, der der  $T_1 = 8,5$  °C,  $T_2 = -17,6$  °C og  $\Delta T_0 = -26,1$  °C.

Som figuren viser, ble det målt negative temperaturer i B2-1 etter 25 timer, og i M-6 etter 150 timer. Det er ikke målt negative temperaturer i B2-7. Dette betyr at frostfronten går mer enn 64 cm inn i Støren-granitten. Laveste målte temperatur er -8,7 °C i B2-1. Hvis forsøket hadde blitt kjørt lenger, hadde denne temperaturen vært lavere. Som figuren viser, hadde ikke temperaturen stabilisert seg da forsøket ble reversert, så temperaturen kunne blitt en god del lavere enn -8,7 °C. Laveste målte temperatur i B2-6 er -1,1 °C.

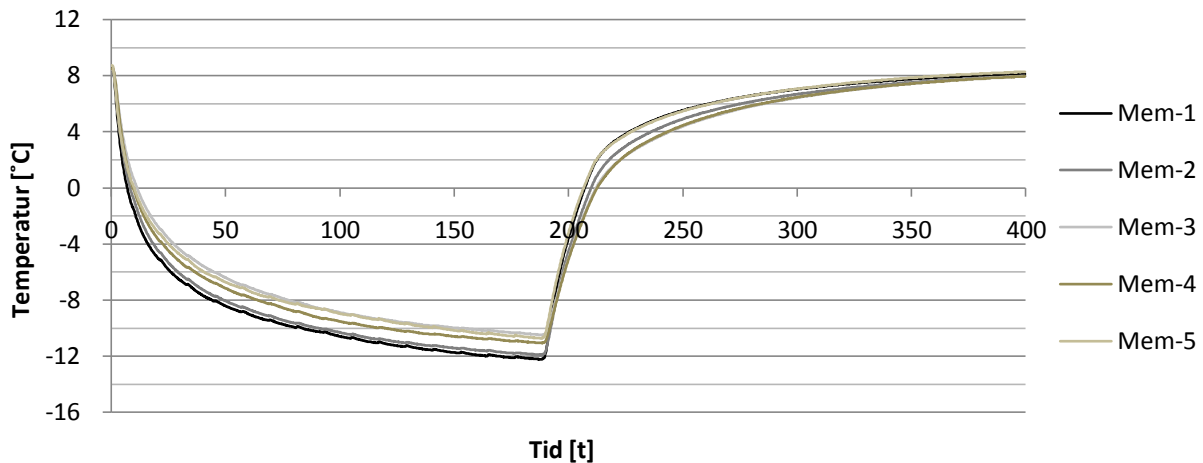
Etter at forsøket er reversert, viser figuren at kurvene ikke faller like godt sammen som de gjorde for forsøk F-1. Dette skyldes trolig de ujevne temperaturene, både i Bergrommet og i Tunnelrommet og den lange tiden det tok å øke temperaturen i Tunnelrommet ved reversering av forsøket. Men figuren viser at kurvene faller fint sammen helt på slutten av forsøket. Det endelige resultatet er derfor ikke veldig påvirket.

Den lille stigningen i temperatur i starten for målepunktene B2-4 til B2-7 skyldes trolig ujevne temperaturer i berget i det forsøket startet.

Figur 25 viser den loggede temperaturen for målepunktene bak membranen under forsøk F-2. Som figuren viser, er det små forskjeller mellom målepunktene også for forsøk F-2. Forskjellen mellom målepunktene underveis i forsøket er derimot litt større enn det var i forsøk F-1. Underveis ligger alle målerne innenfor 1,7 °C, men alle målerne innenfor 0,3 °C når forsøket avsluttes.

Den første måleren, Mem-1, måler negative temperaturer bak membranen etter 7 timer. Etter 12 timer måler alle målerne negative temperaturer. I det forsøket reverseres er laveste målte temperatur bak membranen  $-12,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  og høyeste målte temperatur er  $-10,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Også for for dette forsøket, faller og stiger kurvene for Mem-1 og Mem-2 faller litt raskere enn de tre andre målerne. Dette bekrefter inntrykket fra forsøk F-1 om at det er forskjeller i lagtykkelser eller forskjeller i luftstrømmer.

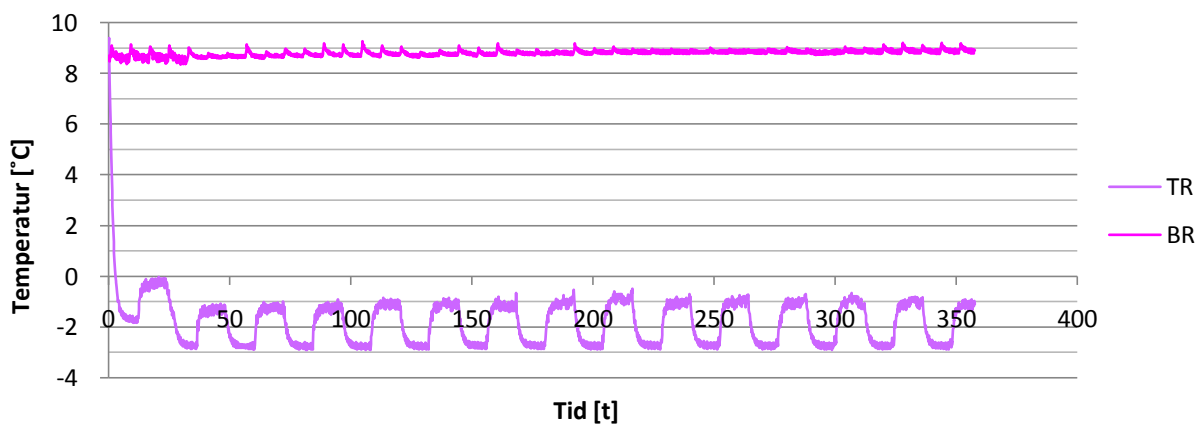


Figur 25: Resultater fra målerne bak membranen under forsøk F-2, der  $T_1=8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_2=-17,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  og  $\Delta T_0=-26,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 8.4 Resultat F-3

Figur 26 viser den den loggede lufttemperaturen i Bergrommet og Tunnelrommet under forsøk F-3, der steglasterne var på  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , starttemperaturen  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  og første steglasteren var negativ. Flere resultater for blokkene kan sees i Vedlegg H.

For forsøk F-3 ble temperaturen i Bergrommet stilt til  $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , og temperaturen i Tunnelrommet til å variere mellom  $-1$  og  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Resultatet etter den første steglasteren viste seg å bli  $0$  og  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Temperaturen i Tunnelrommet ble derfor korrigert til  $0$  og  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Resultatet ble, som figuren viser, en temperatur på  $-8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  i Bergrommet og  $-1$  til  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  i Bergrommet.



Figur 26: Temperaturen i Bergrommet og Tunnelrommet under forsøk F-3, der  $T_m = -1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta T_0 = \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  og den første steglasteren var negativ.

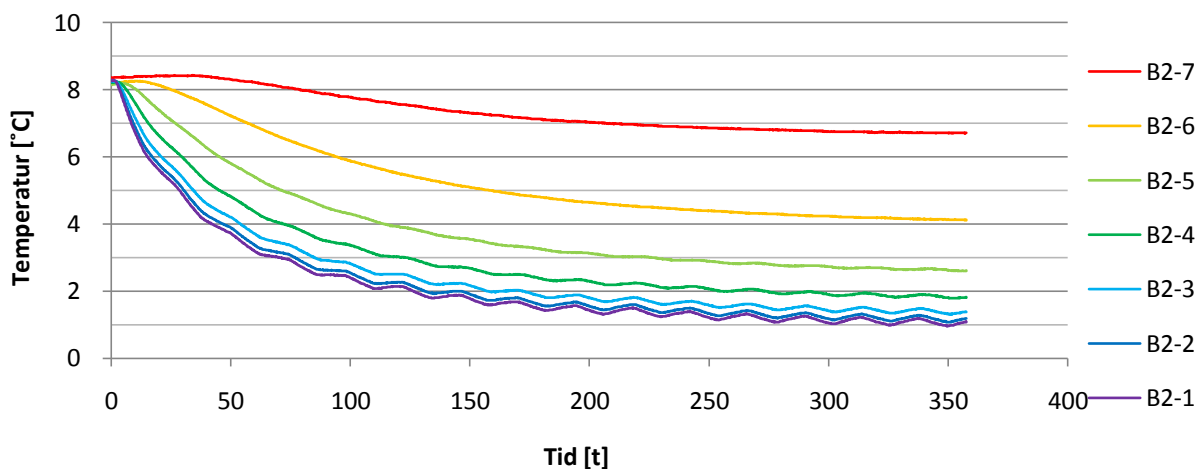


Som figuren viser, stiger temperaturen i Bergrommet med 0,5 °C, fra 8,5 til 9 °C, under forsøket. Denne forskjellen vil trolig ikke påvirke det endelige resultatet.

Etter oppstarten tar det ti timer før temperaturen i Tunnelrommet er nede i -1,9 °C. Som figuren viser endres temperaturen i Tunnelrommet med en gang temperaturen blir stilt opp eller ned. Dette gir gode steglaster, noe som er positivt med tanke på gode resultater. I tillegg har kurven nesten lik form gjennom hele forsøket. Dette er også positivt med tanke på det endelige resultatet.

Temperaturen i begge rommene svinger kontinuerlig gjennom forsøket. Svingningene i temperaturen i Bergrommet er størst rett etter oppstart av forsøket. Da er svingningene i størrelsesorden  $\pm 0,4$  °C fra middelveien over en representativ periode. Svingningene blir mindre utover i forsøket. Siden disse svingningene faller sammen med steglasterne før justeringen av temperaturen, vil de trolig ikke virke inn på det totale resultatet. Etter 50 timer er disse svingningene i størrelsesorden  $\pm 0,2$  °C fra middelveien over en representativ periode i begge rommene. Dette påvirker trolig heller ikke resultatet siden varigheten på hver svingning er så kort.

Figur 27 viser den loggede temperaturen for målepunktene 1-7 i blokken B2 under forsøk F-3.



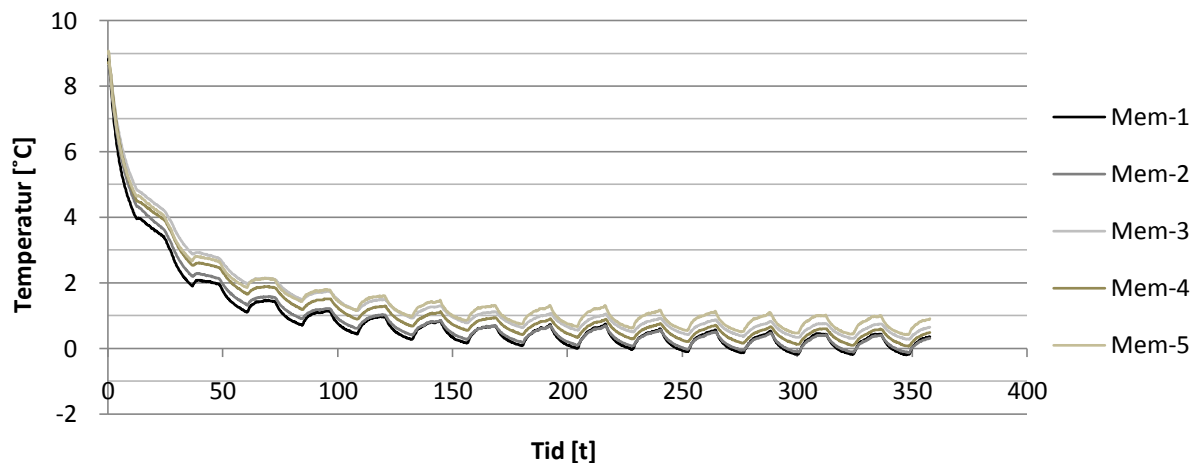
**Figur 27: Resultater fra B2-blokken under forsøk F-3, der  $T_m = -1$  °C,  $\Delta T_0 = \pm 2$  °C og den første steglaster var negativ.**

Som figuren viser, ble det ikke målt negative temperaturer i noen av målepunktene B2-1 til B2-7 under forsøket. Laveste målte temperatur er +1,05 °C i B2-1 da forsøket ble avsluttet. Som figuren viser, var temperaturen i ferd med å stabilisere seg da forsøket ble avsluttet. Hvis forsøket hadde blitt kjørt lenger, hadde laveste temperatur blitt litt lavere, men det hadde ikke blitt målt negative temperaturer.

Figuren viser også at målepunktene B2-6 og B2-7 ikke registrerer de gjentatte endringene i temperatur, men har jevne kurver. Målepunkt B2-5 registrerer bare små endringer. Dette betyr at utslagene fra middeltemperaturen ikke har noen innvirkning 0,5 meter inn i Støren-granitten, og at det er middeltemperaturen som er avgjørende for temperaturen lenger inn i Støren-granitten.

Den lille stigningen i temperatur i starten for målepunktene B2-4 til B2-7 skyldes trolig ujevne temperaturer i berget i det forsøket startet.

Figur 28 viser den loggede temperaturen for målepunktene bak membranen under forsøk F-3.



**Figur 28:** Resultater fra målerne bak membranen under forsøk F-3, der  $T_m = -1$  °C,  $\Delta T_0 = \pm 2$  °C og den første steglasten var negativ.

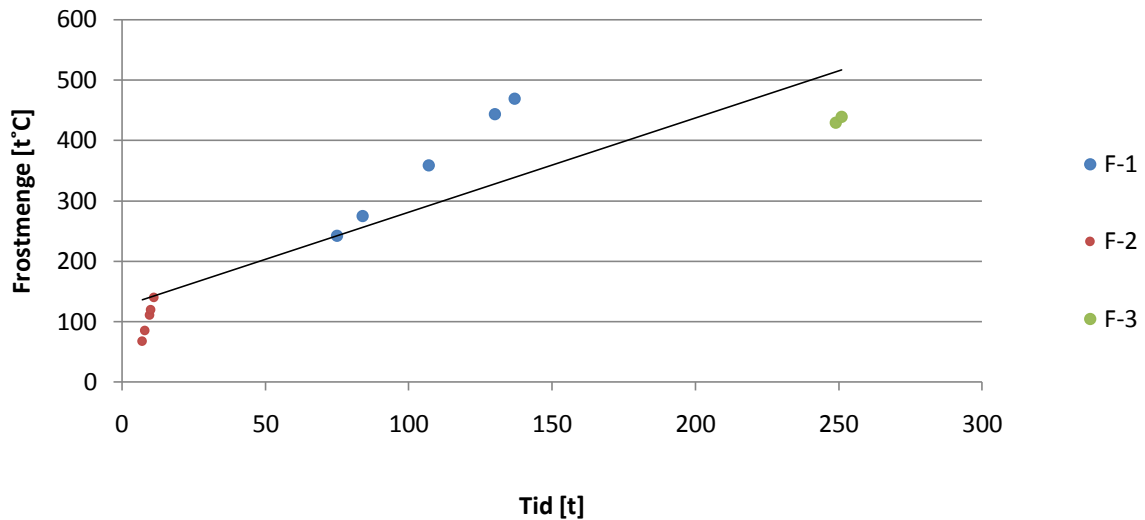
Som figuren viser, er det små forskjeller mellom målepunktene også for forsøk F-3. Alle målerne er samlet innenfor 0,75 °C under hele forsøket. Etter hvert som tiden øker, ser det ut som om forskjellen mellom målepunktene blir mindre.

Den første måleren, Mem-1, måler negative temperaturer bak membranen etter 225 timer. Etter 250 timer måler måleren Mem-2 også negative temperaturer. De andre målerne måler ikke negative verdier. Laveste målte verdi bak membranen er -0,2 °C i Mem-1. Av målerne Mem-3 til Mem-5 er det Mem-4 som måler den laveste verdien. Den er på 0,08 °C.

Mem-1 og Mem-2 skiller seg ikke like mye fra de andre som de gjorde under forsøkene F-1 og F-2, og forskjellen er størst i starten av forsøket. Dette kan indikere at luftstrømmen har innvirkning på temperaturen. Under forsøk F-3 ble temperaturen endret to ganger i døgnet. Fryseaggregatet måtte derfor jobbe oftere for å omstille temperaturen enn det måtte under forsøkene F-1 og F-2. Dette kan ha forårsaket andre luftstrømmer enn under F-1 og F-2.

## 8.5 Frostmengde

Ser en på den frostmengden sprøytebetongen og Mastersealen er utsatt for i det de første målte temperatuere bak membranen blir negativ kan en få en pekepinn på om frostmengden er et godt mål på hvor mye vann- og frostsikringen tåler.



**Figur 29:** Tidspunkt for første negative temperatur bak membran plottet mot den totale frostmengden på det samme tidspunktet.

Figur 29 viser tidspunktet for første negative temperatur bak membranen plottet mot den totale frostmengden på det samme tidspunktet for alle målepunktene bak membranene under forsøk F-1, F-2 og F-3. For å kunne si med sikkerhet om frostmengde er et godt begrep må det kjøres flere tester slik at datagrunnlaget blir større, men ut fra disse få resultatene ser det ikke ut som om frostmengde er et godt begrep.

## 9 Numerisk modellering

For å forutse effektene av et arbeid kan en enten bruke ren erfaring eller gjøre en numerisk analyse av problemet. Bergarbeider har hele tiden vært basert på erfaring, og numeriske analysemodeller for ingeniørgeologi og bergteknikk ble først tatt i bruk på begynnelsen av 70-tallet (Nilsen, 2001). Fra da av har bruken av slike modeller for å forutsi virkningen av bl.a. bygging i berg økt jevnt. Ikke minst for å støtte opp under de erfaringene som er gjort gjennom mange år.

Det er både fordeler og ulemper med numeriske modeller som en bør ha tenkt gjennom før en begynner å bruke dem. Det er relativt lett å endre de ulike parametrene, enten én og én eller flere samtidig, i forhold til en fysisk modell. I tillegg går beregningene forholdsvis hurtig, noe som gjør at en raskt kan kjøre mange beregninger med mange ulike parametre. For å få med seg betydningen av hver enkelt parameter er det viktig at en ikke endrer verdien for mer en én parameter i gangen. Ved å endre flere samtidig, kan en gå glipp av viktige effekter ved én av dem. Det er også viktig å være kritisk, både til parametrene som brukes i modellen og resultatene.

Ved å kombinere numeriske modeller, erfaring og kunnskap om bergmassen og dens egenskaper, kan numeriske modeller enten bekrefte eksisterende ideer og teorier, eller være utgangspunkt for nye.

### 9.1 Numeriske modeller

Numeriske modeller kan være diskontinuerlige eller kontinuerlige. I kontinuerlige modeller betrakter man bergmassen som et kontinuerlig medium, mens i diskontinuerlige modeller ser man på enkelblokker, eller enkeltstykker avgrenset av sprekker.

De kontinuerlige modellene kan videre deles inn i to grupper. Dersom modellen er et avgrenset område akkurat rundt bergrommet betegnes det som en integralmodell. Hvis også området i en større avstand fra bergrommet er tatt med i modellen, betegnes det som differensialmodeller. Det er igjen to typer differensialmetoder, én endelig differansemetode og én endelig elementmetode (Myrvang, 2001). Det er mulig å benytte både implisitte og eksplisitte løsninger for begge typer. Implisitte løsninger innebærer at løsningen i én node avhenger av løsningen fra forrige tidssteg, mens eksplisitte løsninger ikke benytter løsningene fra forrige tidssteg.

#### 9.1.1 Endelig elementmetoden

Ved bruk av den endelige elementmetoden betraktes berget som et kontinuerlig medium, og det er et definert område som skal modelleres. Det definerte område deles inn i et endelig antall elementer som knyttes sammen gjennom felles hjørner som betegnes noder. Elementene er tre-, fire- eller mangekantet, etter ønske fra bruker. Egenskapene til berget forutsettes uforandret innen disse elementene (Myrvang, 2001). Elementtettheten avgjør hvor nøyaktige beregningene blir. Temperaturen i en enkelt node antas å påvirke de nodene som ligger rundt, og under beregningene settes det opp likevektslikninger som uttrykker sammenhengen mellom alle nodene.

## 10 Oppbygging av modellen i TEMP/W

### 10.1 Temp/W

TEMP/W er en del av modelleringsverktøyet GeoStudio, og er utviklet av GEO-SLOPE international. I tillegg til TEMP/W er det også SLOPE/W, SEEP/W, SIGMA/W, QUAKE/W, CTRAN/W, AIR/W og VADOSE/W. Programmene er i hovedsak utviklet for modellering av løsmasser, men de er fullt brukbare også for bergmasser.

TEMP/W er en endelig elementmetode som benytter Fouriers konduksjonslov til beregning av temperatur (Krahn, 2004). Programmet tar hensyn til latent varme som frigjøres når vann fryser ved at vanninnhold og materialegenskaper tas inn som funksjon av temperatur.

Programmet er satt opp med et sett med standardinnstillinger som vil gi tilfredsstillende resultater i de aller fleste situasjoner (Krahn, 2004).

Det er to måter å gjøre beregningene i TEMP/W på. Den ene måten resulterer i en stabil tilstand. Da kjører programmet beregninger helt til det oppstår en stabil temperaturfordeling i den definerte modellen, uavhengig av hvor lang tid det tar å oppnå denne tilstanden. Den andre måten er en tidsavhengig beregning. Da beregnes temperaturfordelingen fram til et forhåndsbestemt tidspunkt, uavhengig av om det har blitt en stabil tilstand eller ikke. TEMP/W kan bruke resultatet fra en stabil tilstandsanalyse som utgangspunkt for en tidsavhengig analyse.

Input i TEMP/W er materialegenskaper, grensebetingelser og geometrisk utforming av modellen, inkludert inndeling i elementer. I tillegg er det noen standardinnstillinger. Standardinnstillinger geometrisk utforming, inndeling i elementer, materialegenskaper og noen av grensebetingelser er felles for alle beregningene gjort i TEMP/W. De grensebetingelsene som er spesifikke for de enkelte beregningene er presentert i eget kapittel.

### 10.2 Planlagte beregninger i TEMP/W

Tabell 5 viser de planlagte beregningene i TEMP/W.

Tabell 5: Planlagte beregninger i TEMP/W.

Test nr	Temp i Bergrommet	Temp i Tunnelrommet	Varighet
T-1	Lik resultatene fra test F-1	Lik resultatene fra test F-1	Lik resultatene fra test F-1
T-1	Lik resultatene fra test F-2	Lik resultatene fra test F-2	Lik resultatene fra test F-2
T-3	8 °C	Steglast, se Figur 16.	3000 t
T-4	8 °C	Sinusvariasjon, se Figur 16.	3000 t
T-5	Lik resultatet fra test F-3	Lik resultatet fra test F-3	Lik resultatet fra test F-3

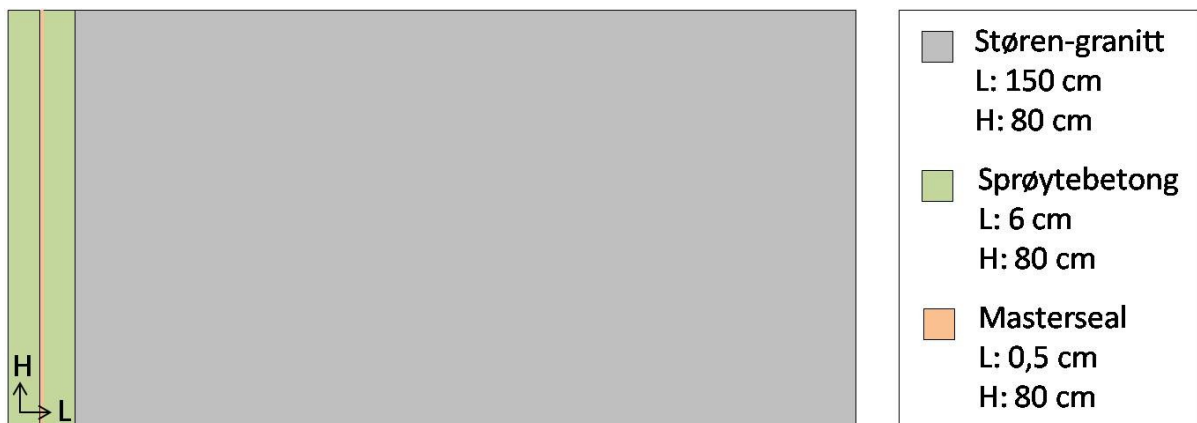
Temperaturmålingene i Tunnelrommet, Bergrommet og målepunktene i blokk B2 (se Figur 1) fra testene F-1, F-2 og F-3 skal brukes som grensebetingelser i for beregninger av tilsvarende steglaster i TEMP/W. Måler fire bak membranen, M-4, er også valgt som grensebetingelse.

### 10.3 Standardinnstillinger

TEPM/W har noen standardinnstillinger for blant annet antall itterasjoner, toleransegrad og integrasjonsorden. Disse er brukt for alle beregningene gjort i TEMP/W. Vedlegg I viser en oversikt over verdier for standardinnstillingene.

### 10.4 Geometri og inndeling i elementer

For at resultatene fra de fysiske forsøkene og de numeriske modellene skal være sammenlignbare må den numeriske modellen skal være mest mulig lik den fysiske modellen. I riggen er det snakk om varmeledning gjennom vannsikringen bestående av sprøytebetong, Masterseal og sprøytebetong, og inn i Støren-granitt. Under bygging av riggen ble vegger, gulv og tak, samt overflatene mot Støren-granitten, isolert slik at varmestrømmen gjennom dem skal være tilnærmet lik  $0 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ . På grunn av de små volumene i både Tunnelrommet og Bergrommet vil temperaturene der være like i hele volumet. Det betyr at varmestrømmen gjennom de ulike blokkene i teorien skal gå horisontalt, og være lik for alle blokkene. Den numeriske modellen består derfor bare av én blokk med vannsikring. Som i riggen er sprøytebetonglagene 6 cm tykke, Mastersealen 0,5 cm tykk og Støren-granitten 150 cm. Alle lagene er 80 cm høye. Dette er vist i Figur 30.

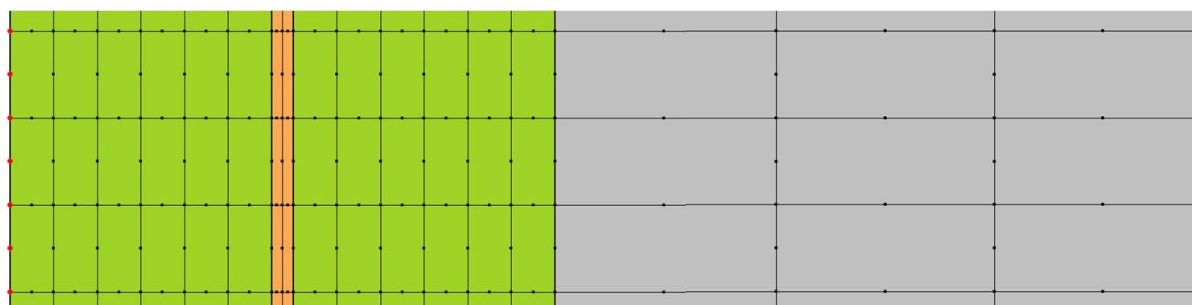


Figur 30: Skisse av modellen i TEMP/W.

Modeller med rektangulære elementer blir mer nøyaktig enn modeller med tre- eller manglekantede elementer (Krahn, 2004). Siden modellen er rektangulær er det derfor naturlig å benytte rektangulære elementer. Som nevnt tidligere forutsettes det at forholdene er like innenfor ett element. Dette betyr at elementtettheten avgjør hvor nøyaktig beregningene blir. Hvis elementene blir for små, vil de derimot redusere nøyaktigheten (Krahn, 2004). I forbindelse med testing av vann- og frostsikring er det mest interessant å se hvordan temperaturen endrer seg i vann- og frostsikringen. Det er derfor hensiktsmessig med mindre elementer i vann- og frostsikringen enn i Støren-granitten. I modellen er det derfor ulike elementlengder for de ulike lagene. For å øke nøyaktigheten er det i tillegg er det brukt sekundære noder for alle materialene. Det vil si at avstanden mellom beregningene halveres. Elementstørrelsene er vist i Tabell 6, og et utsnitt fra modellen er vist i Figur 31.

Tabell 6: Elementstørrelser for modellen i TEMP/W.

Materiale	Elementhøyde [cm]	Beregningsintervall [cm]	Elementlengde [cm]	Beregningsintervall [cm]
Masterseal	2	1	0,25	0,125
Sprøytebetong	2	1	1	0,5
Støren-granitt	2	1	5	2,5



Figur 31: Utsnitt fra modellen i TEMP/W som viser inndeling i elementer i de ulike materialene.

## 10.5 Materialelegenskaper

Både konduktiviteten og varmekapasiteten til et materiale er avhengig av vanninnholdet, og mengden ufrossent vann når materiale er frossent. I TEMP/W kan konduktiviteten og mengde ufrossent vann legges inn som funksjon av temperatur, og konduktiviteten kan gis to verdier, en for frossen tilsand og en for tint tilstand. I Norge er den effektive porøsiteten for bergarter i størrelsesorden 0-1 %. Dette medfører at den største andelen med vann opptrer i sprekker og riss (Broch & Nilsen, 2001). Siden dette volumet er så lite i forhold til det totale volumet er det ikke tatt hensyn til dette vannet i modellen, hverken i berget eller i vann- og frostsikringen. Dette medfører at konduktiviteten og kapasiteten har én verdi på begge sider av 0°C, og at det volumetriske vanninnholdet er satt lik 0 for alle materialene.

Alle egenskapene benyttet i modellen er oppsummert i Tabell 7. Merk at enhetene i TEMP/W er satt til *meter*, °C, *t* og *J*, og at egenskapene er oppgitt med de samme enhetene. En forklaring på de valgte verdiene kommer i Kapittel 10.5.1 og 10.5.2.

Tabell 7: Materialelegenskaper brukt for modellering i TEMP/W.

Materiale	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	C [J/m <sup>3</sup> *°C]	$\lambda$ [J/t m°C]	W <sub>vol</sub> [%]	W <sub>uf</sub> -1°C [%]
Masterseal	420 <sup>1)</sup>	421 000 <sup>1)</sup>	468 <sup>1)</sup>	0	0
Sprøytebetong	2245	2 245 000	4350	0	0
Støren-granitt	2700	2 700 000	10500	0	0

1) Utregnet verdi ut fra testresultatene.

### 10.5.1 Varmeledning

Støren-granitten er tidligere testet med tanke på varmeledningsevne (Broch & Nilsen, 2001). Resultatet fra denne testen er benyttet som varmeledningstall for Støren-granitten i modellen.

På grunn av stor usikkerhet med tanke på varmeledningsevne for sprøytbetongen og Masterseal ble det bestilt tester for å finne varmeledningsevnen. Testingen har blitt utført av Helge Johansen ved SINTEF Energi, avdeling for energiprosesser. Det er kjørt tester på kjerner av sprøytebetong, test 1-3, og kjerner med sprøytebetong og Masterseal, test I -III. Testene er utført på kjerner med diameter 50 mm og høyde 29 mm. Det er ca 3 mm Masterseal mellom like store lag med sprøytebetong. Testresultatene er vist i Tabell 8.

Tabell 8: Testresultater for prøver av kun sprøytbetong og prøver med både sprøytbetong og Masterseal.

Prøver med kun sprøytbetong					Prøver med sprøytbetong og Masterseal				
Nr	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$T_{\text{snitt}}$ [°C]	$\lambda$ [W/m°C]	R [m°C/W]	Nr	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$T_{\text{snitt}}$ [°C]	$\lambda$ [W/m°C]	R [m°C/W]
1	2226,6	10,5	1,302	0,768	I	2096,6	9,9	0,731	1,368
2	2266	10,5	1,180	0,848	II	2056,1	10,4	0,538	1,859
3	2214,3	10,5	1,139	0,878	III	2015,4	10,1	0,695	1,439
Snitt	2244,6	10,5	1,207	0,831	Snitt	2056,0	10,1	0,655	1,555

Varmeledningstallet til sprøytbetongen i modellen er satt lik snittverdien fra testene 1-3. Ved å benytte Formel ( 10.1) kan en regne ut varmeledningstallet til Masterseal,  $\lambda_{MS}$ . Resultatet, når  $\lambda_{SB}$  er lik snittverdien fra testene, og tykkelsen på Mastersealen er 3 mm er vist i Tabell 7.

$$\lambda_{MS+SB} = \frac{x_{tot}}{\frac{x_{SB}}{\lambda_{SB}} + \frac{x_{MS}}{\lambda_{MS}}} \quad (10.1)$$

Hvor:

x = tykkelsen av lagene [m]

### 10.5.2 Varmekapasitet

Varmekapasiteten til et materiale er lik egenvekten,  $\rho$ , ganger 1000 J/kg °C (Standard Norge, 2007). Denne formelen er benyttet for å finne varmekapasiteten til materialene i modellen.

Egenvekten til Støren-granitt er kjent fra tidligere tester, og egenvekten til sprøytbetongen er kjent fra testene 1-3, nevnt ovenfor. Egenvekten til Masterseal kan regnes ut ved å benytte Formel ( 10.2). Resultatet, når  $\rho_{SB}$ ,  $\rho_{TOT}$  og  $\lambda_{SB}$  er lik snittverdiene fra testene og tykkelsen på Mastersealen er 3 mm, er vist i Tabell 7.



$$\rho_{MS} = \frac{m_{MS}}{V_{MS}} = \frac{(\rho_{TOT} * V_{TOT}) - (\rho_{SB} * V_{SB})}{\pi * (\frac{d}{2})^2 * x_{MS}} \quad (10.2)$$

Hvor:

$\rho$  = egenvekten [kg/m<sup>3</sup>]

V= volumet [m<sup>3</sup>]

d = diameter på kjernen [m]

x = tykkelsen [m]

### 10.5.3 Behov for testing av materialer

Tabell 9: Noen materialelegenskaper fra utvalgt litteratur.

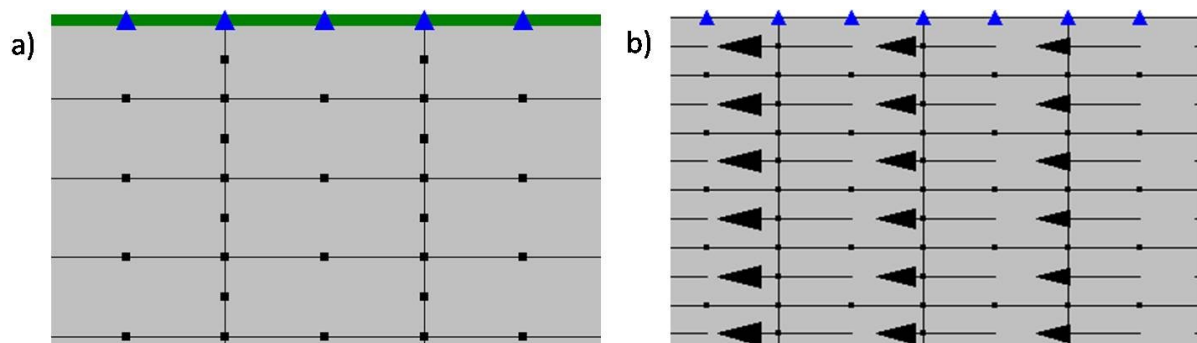
Materiale	$\lambda$ [J/t*m*°C]		C [J/m <sup>3</sup> *°C]		Kilde	
	min	maks	min	maks		
MS	Polyvinylacetat	360			(3)	
	Polyacetat	1080		2000000	(7)	
SB	Lettbetong	2660		1600000	(1)	
	Betong	3200		2000000	(1)	
	Sementmørtel	2600	5000	1500000	2000000	(3)
	Betong	1500	3200	1900000	2300000	(4)
	Lettbetong	360	3600			(6)
	Betong	5400	12600			(6)
	Betong, middels egenvekt	4140		1800000		(7)
	Betong, lav egenvekt			1600000	240000	(7)
S-G	Granitt	6120	14400	2200000		(1)
	Støren-granitt	10500		2700000		(2)
	Granitt	10000		2000000		(3)
	Dioritt	9700				(5)
	Krystalin stein	12600		2800000		(7)
	Granitt	10000		2500000	2700000	(7)

- 1) (Andersland & Ladanyi, 2003)
- 2) (Broch & Nilsen, 2001)
- 3) (Incropera, DeWitt, Bergman, & Lavine, 2007)
- 4) (Ljungkrantz, Möller, & Petersons, 1994)
- 5) (Midttømme, Skarphagen, & Elvebakk, 2000)
- 6) (Nordal, 1998)
- 7) (Standard Norge, 2007)

Et søk i litteraturen på varmeledningstall og varmekapasitet for de ulike materialene gir store variasjoner i verdier. For at modellen i TEMP/W skal gi så gode resultater som mulig, er det viktig at materialegenskapene er så riktige som mulig. Det er spesielt viktig når en ønsker å se på frostbestandigheten til et vann- og frostsikringskonsept. Tabell 9 viser noen verdier fra utvalgt litteratur, og den viser store variasjoner, spesielt for sprøytebetongen. For senere tester av andre vann- og frostsikringskonsepter i fryselabben, er nå egenskapene til både Støren-granitten og sprøytebetongen kjent. Ved å benytte sprøytebetong med lik resept, fra samme leverandør, blir det kun egenskapene til vann- og frostsikringen som er ukjent. Når det er kun ett materiale med ukjente egenskaper, er det lettere å prøve seg fram med ulike verdier i TEMP/W. Litteratursøk kan gi en pekepinn på verdiene. Hvis en ønsker å optimalisere modellen kan eventuelt vann- og frostsikringen testes i labben.

## 10.6 Grensebetingelser som er felles for alle beregninger

For å gjenskape forholdene i riggen, er en varmestrøm  $q = 0 \text{ J/t} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  satt som grensebetingelsen for topplinja og bunnlinja i modellen. Dette gjelder både for den stabile tidsanalysen og den tidsavhengige analysen. Dette er vist i Figur 32.



Figur 32: A) Blå trekkanter angir  $q = 0 \text{ W/m}^2$ . B) Resultatet viser en horisontal varmestrøm gjennom hele modellen.

Nodene på grenseflatene mellom Tunnelrommet og sprøytebetongen samt Bergrommet og Støren-granitten har fått status som grensenoder. Det innebærer at de kan knyttes opp mot forhåndsbestemte temperaturvariasjoner.

## 10.7 Spesielle grensebetingelser

Alle beregningene i TEMP/W, T-1 til T-5, har individuelle temperaturforløp. Det innebærer at de har forskjellige utgangstemperaturer i de stabile tidsanalysene, og forskjellige temperaturforløp for de tidsavhengige analysene.

### 10.7.1 Utgangstemperatur for de stabile tidsanalysene

Tabell 10 viser utgangstemperaturer i bergmassen for de stabile tidsanalysene. Merk at punktet "Masterseal" refererer til sjiktet der målepunktene er plassert i fryselabben. Temperaturene for T-1, T-2 og T-5 er hentet direkte fra resultatene fra forsøkene i fryselabben.

**Tabell 10: Grensebetingelser for de stabile tidsanalysene i TEMP/W.**

Lokalitet	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5
Grenseflate mot Tunnelrommet	8,5 °C	8,5 °C	8,0 °C	8,0 °C	8,5 °C
~Membran	8,4 °C	8,5 °C	8,0 °C	8,0 °C	8,7 °C
~M-1	8,0 °C	8,2 °C	8,0 °C	8,0 °C	8,3 °C
~M-2	8,0 °C	8,2 °C	8,0 °C	8,0 °C	8,3 °C
~M-3	8,0 °C	8,2 °C	8,0 °C	8,0 °C	8,3 °C
~M-4	8,0 °C	8,2 °C	8,0 °C	8,0 °C	8,2 °C
~M-5	8,1 °C	8,2 °C	8,0 °C	8,0 °C	8,2 °C
~M-6	8,2 °C	8,3 °C	8,0 °C	8,0 °C	8,2 °C
~M-7	8,4 °C	8,5 °C	8,0 °C	8,0 °C	8,4 °C
Grenseflate mot Bergrommet	8,5 °C	9,2 °C	8,0 °C	8,0 °C	8,5 °C

### 10.7.2 Temperaturforløp for de tidsavhengige analysene

Tabell 11 viser hvilke temperaturforløp som kobles mot grensenodene i modellen. Temperaturene for T-1, T-2 og T-5 er hentet direkte fra resultatene fra forsøkene i fryselabben, men er forenklet en del siden TEMP/W ikke kan ta inn temperaturfilen som input. Detaljerte temperaturforløp kan sees i Vedlegg J.

**Tabell 11: Grensebetingelser for de stabile tidsanalysene i TEMP/W.**

Test	Temperatur Tunnelrommet	Temperatur Bergrommet
T-1	Samme som resultatet fra forsøk F-1	Samme som resultatet fra forsøk F-1
T-2	Samme som resultatet fra forsøk F-2	Samme som resultatet fra forsøk F-2
T-3	Steglast som presentert i kapittel 7.2	Kontinuerlig 8 °C
T-4	Sinusvariasjon som presentert i kapittel 7.2	Kontinuerlig 8 °C
T-5	Samme som resultat fra forsøk F-3	Samme som resultat fra forsøk F-3

### 10.7.3 Varmeovergangstall

Som beskrevet i kapittel 4.2 er det nødvendig å ta hensyn til varmeovergangstallet når det er varmeledning ved konveksjon. Varmeovergangstallet for luft og betong ligger mellom 2 og 25 W/m<sup>2</sup>°K når det er litt bevegelse i lufta (Incropera, DeWitt, Bergman, & Lavine, 2007). Varmeovergangstallet ble bestemt etter prøveberegninger i TEMP/W med forskjellige verdier for varmeovergangstallet. Ut fra den beste prøveberegningen er det derfor brukt et varmeovergangstall på 14,1 W/m<sup>2</sup> °K for modellene i TEMP/W. Omgjort til enheter brukt i TEMP/W blir det 50 760J/t m<sup>2</sup> °C. Merk at det kun er benyttet varmeovergangstall i Tunnelrommet.

## 10.8 Tidsbetingelser

Tabell 12 viser en oversikt over tidsbetingelsene brukt for beregningene i TEMP/W. Merk at "Tilpassede tidssteg" er en innstilling i TEMP/W, der programmet selv velger størrelsen på tidsstegene. Dette er gunstig når modellen inneholder varmeovergangstall, for da må tidsstegene være kortere i begynnelsen, og mot slutten av returen.

Tabell 12: Tidsbetingelser for beregningene i TEMP/W.

Test	Antall tidssteg	Start-tid [t]	Initiell inkrement størrelse [t]	Ekspansjonsfaktor	Maks inkrementstørrelse [t]	Lagre multipler av
T-1	83	0	0,01	Tilpassede tidssteg	10	1
T-2	73	0	0,01	Tilpassede tidssteg	10	1
T-3	750	0	4	1	4	1
T-4	750	0	4	1	4	1
T-5	214	0	0,01	Tilpassede tidssteg	5	1

## 10.9 Noder som tilsvarer målepunktene i fryselabben

På grunna av den faste elementstørrelsen i modellen er ikke målepunktene i fryselabben representert med egne noder i modellen. De nodene som best representerer beliggenheten til målepunktene er derfor valgt som representasjonsnoder. Tabell 13 viser plasseringen til representasjonsnodene i forhold til målepunktene i fryselabben. Merk at alle mål er i meter fra sprøytebetongoverflaten i Tunnelrommet.

Tabell 13: Plasseringen til representasjonsnodene i forhold til målepunktene i fryselabben.

	Membran [m]	1 [m]	2[m]	3[m]	4[m]	5[m]	6[m]	7[m]
Fryselabb	0,065	0,145	0,165	0,205	0,285	0,445	0,765	1,405
TEMP/W	0,065	0,150	0,175	0,225	0,275	0,450	0,775	1,425
$\Delta x$	0,000	0,005	0,010	0,020	-0,010	0,005	0,010	0,020

## 10.10 Feilkilder

Det er noen potensielle feilkilder, som kan påvirke resultatene i begge retninger, som må tas i betraktning når resultatene vurderes. Disse vil bli diskutert kort nedenfor.

Som nevnt, og begrunnet tidligere er det ikke tatt med noe vann i modellen. Sannsynligvis vil en estimering av vanninnholdet utgjøre en større feilkilde for resultatet, enn det gjør å utelate det.

Modellen består av en isotrop bergmasse av Støren-granitt, uten sprekker eller andre variasjoner i bergarten. Sannsynligvis er blokkene som er brukt i fryselabben uskadd og relativt homogen med tanke på egenskaper. I en tunnel vil det derimot være både sprekker og skifter i bergarter og

bergartsegenskaper. Resultatene fra modellen kan derfor avvike fra eventuelle tester i virkelige tunneler.

I modellen er vann- og frostsikringen helt tett, mens det i virkeligheten kanskje er små hull, eller variasjoner i tykkelse, enten Mastersealen eller sprøytebetongen. Dette kan virke inn på de isolerende egenskapene til vann- og frostsikringen.

Alle modellene er kjørt med en utgangstemperatur i bergmassen på rundt 8 °C. For steglastene spiller dette ingen rolle, da  $\Delta T$  bare blir større. Men for sinussvingningene burde gjennomsnittstemperaturen i lufta vært lik temperaturen i bergmassen for å unngå en steglast i tillegg til sinussvingningene. Denne feilkilden minimeres ved å kjøre svingninger over lang tid.

Det er ikke gjort kontinuerlige beregninger. Dette betyr at det kan være maksimal- og minimalverdier som faller bort fordi de ligger mellom tidspunktene der det er beregninger.

Ved å måle lufthastigheter i Tunnelrommet kunne varmeovergangstallet blitt bestemt nøyaktig.

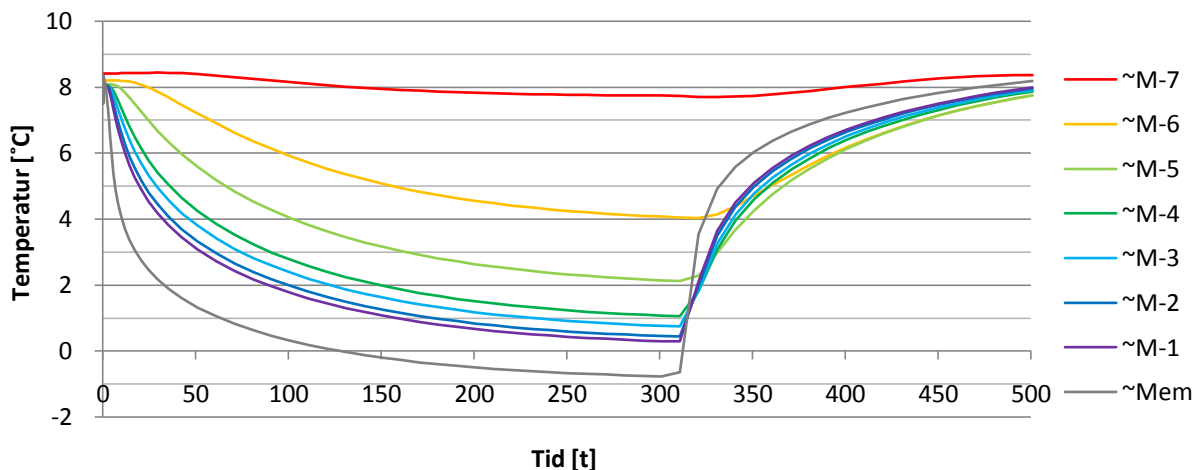
## 11 Resultater Temp W

### 11.1 Faktorer som kan påvirke resultatene

Alle innstillinger og verdier brukt i modellen i TEMP/W er, som beskrevet i Kapittel 10, forsøkt tilpasset forholdene i fryselabben best mulig. Dette betyr at noen av de feilkildene som ble diskutert for resultatene fra fryselabben gjelder for resultatene fra beregningene i TEMP/W også. Dette gjelder ujevn temperatur i Støren-granitten og den ujevne temperaturen i Bergrommet og Tunnelrommet. I tillegg ligger det en usikkerhet i bruken av varmeovergangstallet.

### 11.2 Resultat T-1

Figur 33 viser resultatet fra beregning T-1 i TEMP/W, som tok utgangspunkt i resultatene fra F-1.

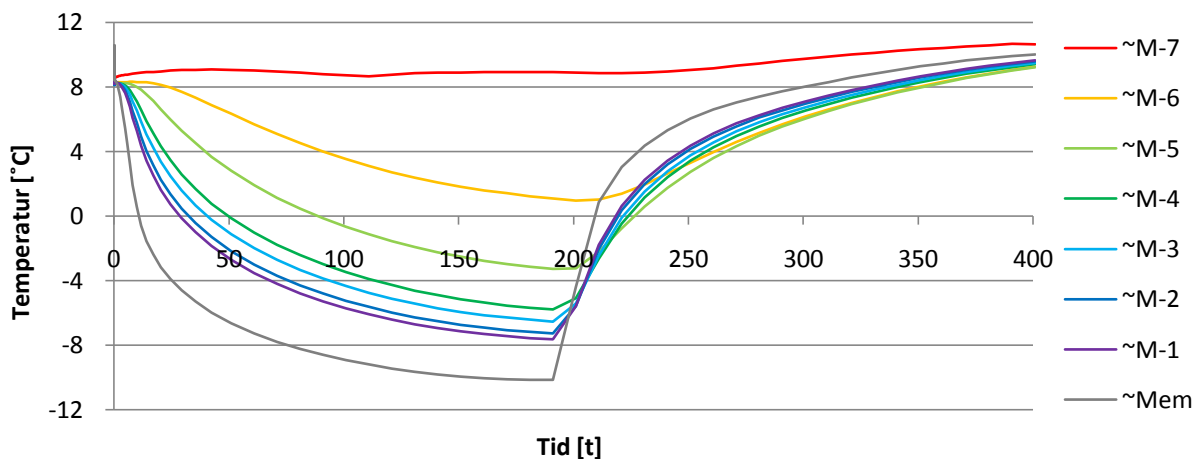


Figur 33: Resultater fra beregning T-1, som tok utgangspunkt i resultatene fra forsøk F-1.

Som figuren viser, er det beregnet negative temperaturer i ~Mem etter 190 timer. Det er ikke beregnet negative verdier i noen av målepunktene ~M-1 til ~M-. Dette betyr at frostfronten er beregnet til et punkt mellom membranen og to cm inn i Støren-granitten. Laveste beregnede temperatur er  $-0,64\text{ }^{\circ}\text{C}$  i ~Mem når steglasteren reverseres.

### 11.3 Resultat T-2

Figur 34 viser resultatet fra beregning T-2 i TEMP/W, som tok utgangspunkt i resultatene fra F-2.

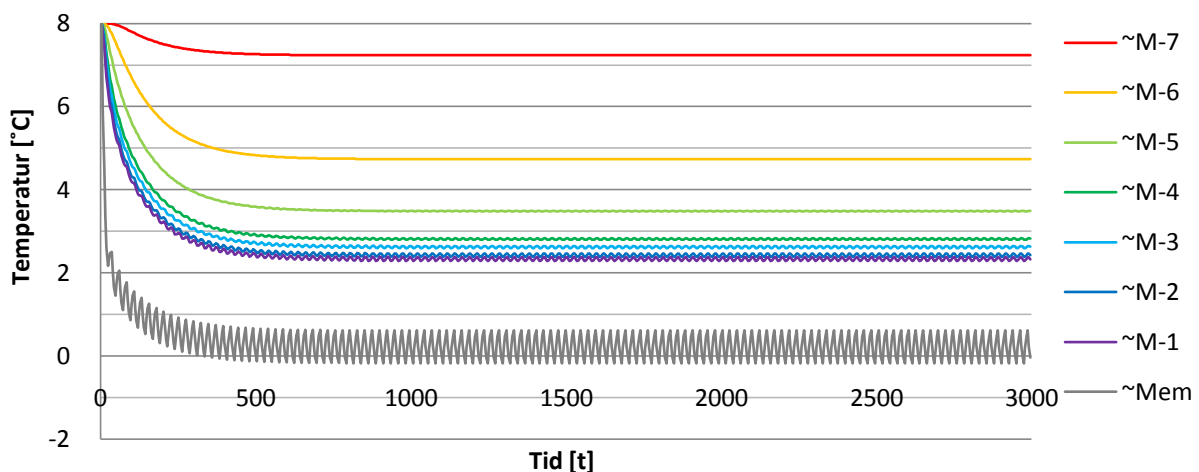


Figur 34: Resultater fra beregning T-2, som tok utgangspunkt i resultatene fra forsøk F-2.

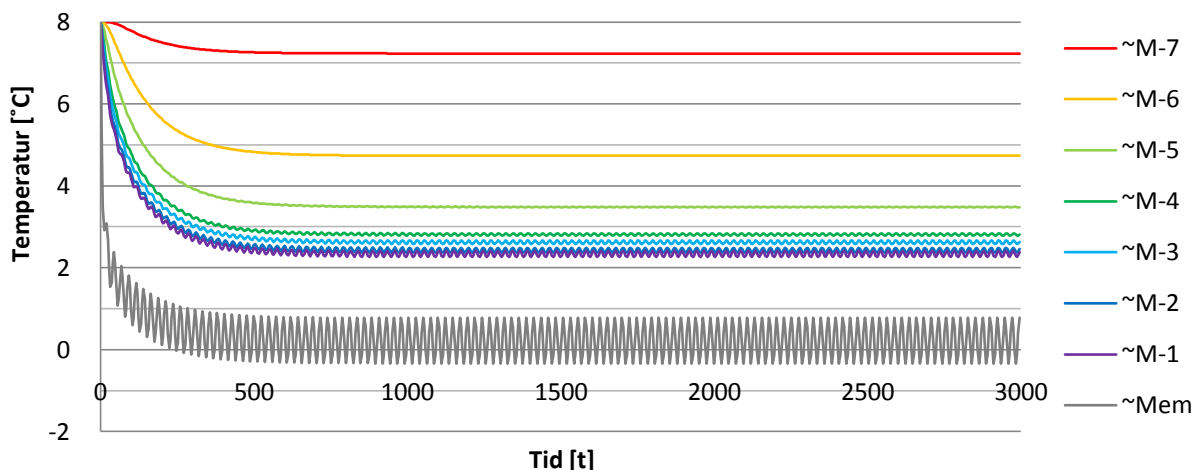
Som figuren viser, er det beregnet negative temperaturer i ~Mem etter 10 timer. For målepunkt ~M-1 er det beregnet negative temperaturer etter 30 timer, og for ~M-5 etter 90 timer. Det er ikke beregnet negative temperaturer for målepunktene ~M-6 og ~M-7. Dette betyr at frostfronten er beregnet til å gå ca 0,5 meter inn i Støren-granitten. Laveste beregnede temperatur er  $-9,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  i ~Mem når steglasteren reverseres. Laveste beregnede verdi i ~M-5 er  $-3,25\text{ }^{\circ}\text{C}$  etter 200 timer.

### 11.4 Resultat T-3 og T4

Figur 35 viser beregningen i TEMP/W, T-3, med gjentatte steglaster, der steglasterne var på  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , starttemperaturen  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  og første steglaster negativ. Figur 36 viser beregningene i TEMP/W, T-4, med sinusvariasjoner. Middelttemperaturen var  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  og utslaget fra likevektslinja var  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Figur 35: Resultatet av beregning T-3, med gjentatte steglaster, der der  $T_m = -1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta T_0 = \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  og den første steglaster var negativ.

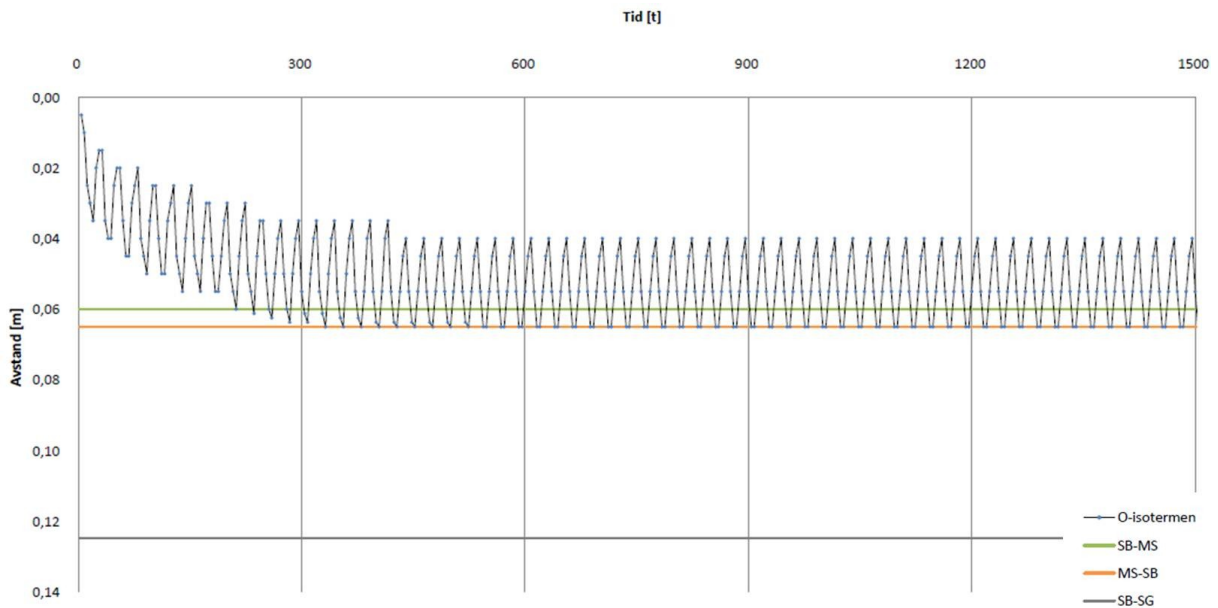


Figur 36: Resultatet av beregning T-4, med sinusvariasjoner, der  $T_m = -1\text{ }^{\circ}\text{C}$  og  $A = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

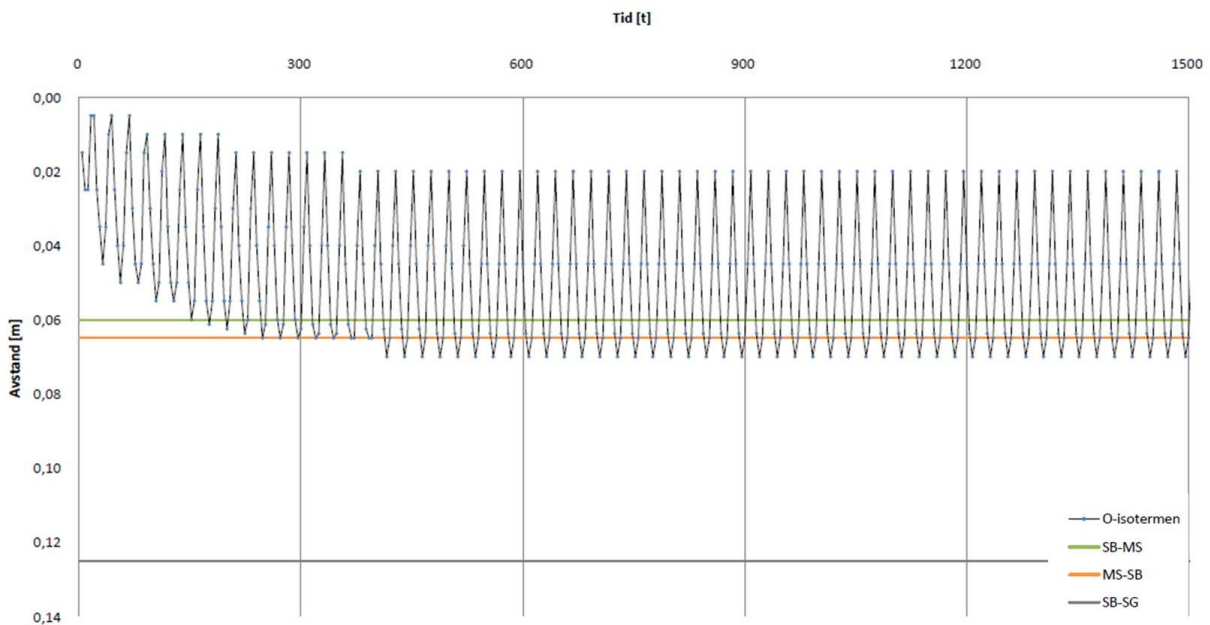
Som figurene viser er det ikke beregnet negative temperaturer i noen av punktene ~M-1 til ~M-7 for beregningene T-3 og T-4. For membranen er det beregnet negative temperaturer etter 360 timer for T-3 og 270 timer for T-4. Laveste beregnede temperatur er  $-0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  for T-3 og  $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  for T-4.

Figuren viser også at variasjonen i temperatur ikke synlig for målepunktene ~M-6 og ~M-7, og nesten ikke synlig for ~M-5.

Figur 37 viser frostfrontens bevegelser under beregning T-3, og Figur 38 viser frostfrontens bevegelse under beregning T-4. Merk at grafene bare går til  $t=1500$  t, mens beregningene er gjort til  $t=3000$  t.



**Figur 37: Frostfrontens bevegelse under beregning T-3, med gjentatte steglaster, der  $T_m = -1$  °C,  $\Delta T_0 = \pm 2$  °C og den første steglaster var negativ.**



**Figur 38: Frostfrontens bevegelse under beregning T-4, med sinusvariasjoner der  $T_m = -2$  °C og  $A=2$  °C.**

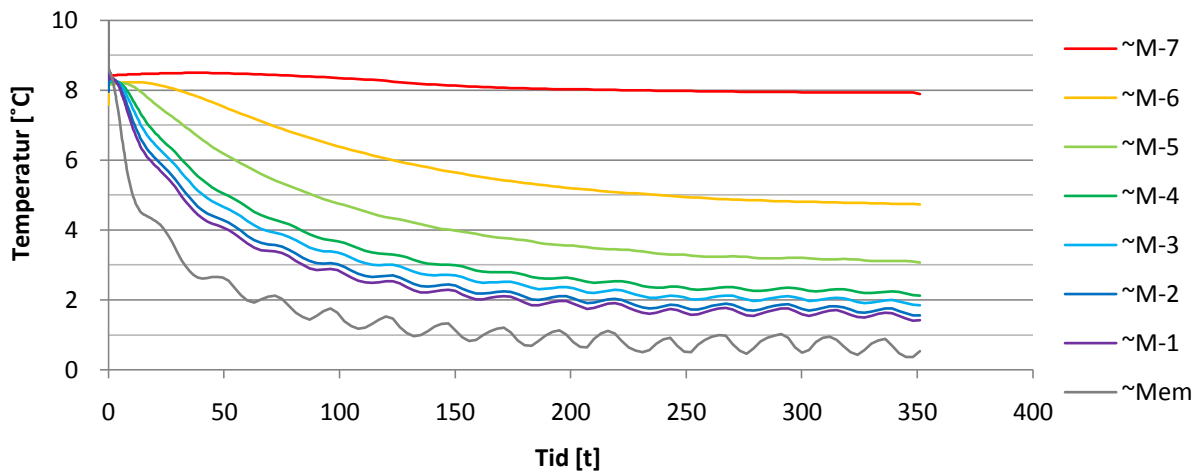
Som figurene viser er frostfronten beregnet å gå rett innenfor membranen for T-3 og ca 0,5 cm lenger inn for T-4.

Samlet sett er forskjellen i beregnede resultater for T-3 og T-4 så liten at det kan forsvares å kjøre tester i fryselabben med gjentatte steglaster som i T-3. De like resultatene skyldes sannsynligvis at de to konstruerte temperaturvariasjonene er forsøkt tilpasset naturlige variasjoner.



## 11.5 Resultat T-5

Figur 39 viser resultatet av beregning T-5 i TEMP/W, som tok utgangspunkt i resultatene fra T-3.



Figur 39: Resultat av beregning T-5, som tok utgangspunkt i resultatene fra forsøk F-3, der  $T_m = -1$  °C,  $\Delta T_0 = 2$  °C og den første steglaster var negativ.

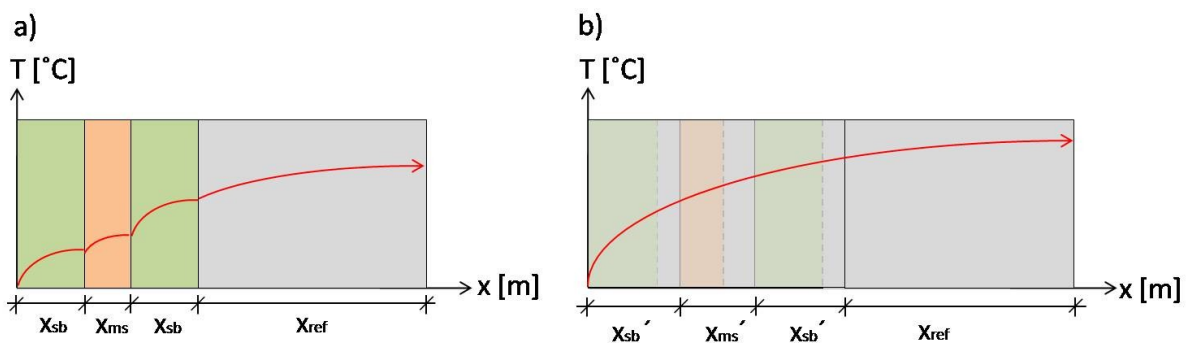
Beregningene viser at det ikke vil være frost innenfor membranen i løpet av de 350 timene beregningene er gjort for. Laveste temperatur for ~Mem er beregnet til 0,35 °C. Figuren viser også at variasjonen i temperatur ikke synlig for målepunktene ~M-6 og ~M-7, og nesten ikke synlig for ~M-5.

## 12 Dimensjonsløse resultater

For å kunne sammenligne resultater fra fryselabben og TEMP/W, resultater fra tester med forskjellige steglaster eller amplituder for sinussvingninger, og etter hvert også tester med ulike vann- og frostsikringer, er det nødvendig med dimensjonsløse resultater. For å få til det, må vann- og frostsikringen og Støren-granitten gjøres om til ett, homogent medium. Nedenfor følger en beskrivelse av dette.

### 12.1 Teori for omgjøring til et homogent medium

Varmeledning ligningen for et vilkårlig homogent materiale med en gitt tykkelse og termiske egenskaper er gitt ved Formel ( 4.4). I fryselabben er det en enhet bestående av lag med berg og vann- og frostsikring. For å finne den totale responsen i en slik enhet, må varmeledning ligningen benyttes for hvert enkelt lag. Løsningen for det første laget utgjør startbetingelsen for det andre laget og så videre. Fordi egenskapene til de ulike lagene er forskjellige, vil en grafisk framstilling av temperaturresponsen gjennom enheten ha en trappe-form. Temperaturresponsen for en enhet bestående av sprøytebetong, Masterseal og Støren-granitt ved tiden  $t$  er illustrert i Figur 40a. For å unngå denne trappe-formen på responsen, må de ulike lagene konverteres om slik at det blir en homogen enhet. Dette gjøres ved å velge et av materialene som referansemateriale, og deretter finne ut hvor mye av referansematerialet de andre lagene tilsvarer,  $x'$ . Når alle lagene er omgjort til referansematerialet, summeres alle tykkelsene, inkludert tykkelsen av referansematerialet. Deretter kan temperaturresponsen gjennom den nye homogene enheten berignes ved hjelp av varmeledning ligningen, Formel ( 4.4). Prinsippet med et referansemateriale og nye tykkelser,  $x'$ , for en enhet bestående av sprøytebetong, Masterseal og Støren-granitt er vist i Figur 40b. På figuren er Støren-granitten brukt som referansemateriale



Figur 40: A) Temperaturforløp i et sammensatt medium etter tiden  $t$ . B) Temperaturforløp i et homogenisert medium etter tiden  $t$ .

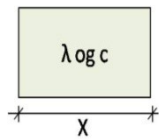
For å regne ut hvor mye av referansematerialet et enkelt lag utgjør,  $x'$ , må en innføre en faktor  $f$  som sier noe om forholdet mellom den opprinnelige og den nye tykkelsen. Dette forholdet er vist i Formel ( 12.1).

$$x' = f * x \quad (12.1)$$

Figur 41 viser et lag med tykkelsen  $x$  og egenskapene  $\lambda$  og  $c$  før og etter omgjøringen til referansematerialet. I tillegg er varmeledning ligningene for de to tilfellene vist ved siden av, Formel

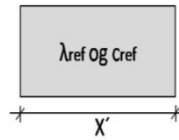
( 12.2) og Formel ( 12.3). Merk at det er varmeledningstallet og varmekapasiteten til referansematerialet som benyttes sammen med den nye tykkelsen,  $x'$ , i Formel ( 12.3).

a)



$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\lambda}{c} * \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (12.2)$$

b)



$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\lambda_{ref}}{c_{ref}} * \frac{\partial^2 T}{\partial (x')^2} = 0 \quad (12.3)$$

**Figur 41: A) Lag med tykkelsen  $x$  og egenskapene  $\lambda$  og  $c$  som skal gjøres om til referansematerialet, samt varmeledningstiligningen for laget. B) Det samme laget omgjort til referansematerialet med en tykkelse  $x'$  og egenskapene  $\lambda_{ref}$  og  $c_{ref}$ , samt varmeledningstiligningen for det omgjorte laget.**

Ved å sette inn Formel ( 12.1) i varmeledningstiligningen for det omgjorte materialet, Formel ( 12.3), blir resultatet som vist i Formel ( 12.4).

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\lambda_{ref}}{c_{ref}} * \frac{1}{f^2} * \frac{\partial^2 T}{\partial (x)^2} = 0 \quad (12.4)$$

Formel ( 12.4) er nå på samme form som Formel ( 12.2), og de to kan derfor settes lik hverandre. Dette er vist i Formel ( 12.5).

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\lambda_{ref}}{c_{ref}} * \frac{1}{f^2} * \frac{\partial^2 T}{\partial (x)^2} = \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\lambda}{c} * \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (12.5)$$

Ved å benytte at den termiske diffusiviteten,  $\alpha$ , er lik  $\lambda/c$ , blir formelen for omregningsfaktoren  $f$  som vist i Formel ( 12.6).

$$f = \sqrt{\frac{\alpha_{ref}}{\alpha}} \quad (12.6)$$

Ved å sette formel ( 12.6) settes inn i formel ( 12.1), blir formelen for den omgjorte tykkelsen som vist i formel ( 12.7).

$$x' = \sqrt{\frac{\alpha_{ref}}{\alpha}} * x \quad (12.7)$$

Siden Støren-granitt vil være fellesnevneren ved senere tester av andre konsepter for vann- og frostsikring i fryselabben, er Støren-granitt brukt som referansemateriale i denne masteroppgaven.

For vann- og frostsikring vil de nye tykkelsene være større enn de opprinnelige på grunn av større isolasjonsevne enn Støren-granitt, men for andre materialer kan de nye tykkelsene være mindre enn de opprinnelige tykkelsene.

## 12.2 Omgjøring til homogent medium

Tabell 14 viser uregningen av nye tykkelser,  $x'$ , når Støren-granitten brukes som referansemateriale. Legg merke til at vann- og frostsikringen ikke utgjør mer enn 5,5 cm Støren-granitt.

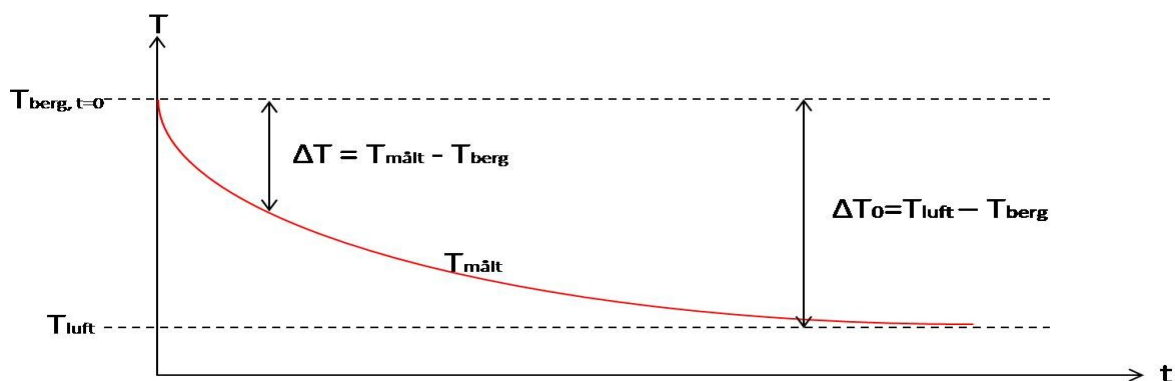
Tabell 14: Utregning av nye tykkelser  $x'$  med Støren-granitt som referansemateriale.

x [cm]	$\Delta x$ [cm]	materiale	K [W/m°C]	C [J/tm <sup>3</sup> °C]	$\alpha$ [m <sup>2</sup> /s]	$\alpha_{sg}/\alpha$	f	$\Delta x'$ [cm]	$x'$ [cm]
0	6	sb	4350	2245000	0,001937	2,007024	1,416694	8,500169	8,50
6									
6	0,5	ms	500	421000	0,001187	3,274444	1,809542	0,904771	9,40
6,5									
6,5	6	sb	4350	2245000	0,001937	2,007024	1,416694	8,500169	17,91
12,5									
12,5	2	sg	10500	2700000	0,003888	1	1	2	19,91
14,5									
14,5	2	sg	10500	2700000	0,003888	1	1	2	21,91
16,5									
16,5	4	sg	10500	2700000	0,003888	1	1	4	25,91
20,5									
20,5	8	sg	10500	2700000	0,003888	1	1	8	33,91
28,5									
28,5	16	sg	10500	2700000	0,003888	1	1	16	49,91
44,5									
44,5	32	sg	10500	2700000	0,003888	1	1	32	81,91
76,5									
76,5	64	sg	10500	2700000	0,003888	1	1	64	145,91
140,5									
140,5	22	sg	10500	2700000	0,003888	1	1	22	167,91
162,5									

## 12.3 Dimensjonsløs plotting

For at dataene skal bli direkte sammenlignbare, må de plottes dimensjonsløst. Ved å samle alle temperaturleddene i Formel ( 4.8) på venstre side av likhetstegnet, blir uttrykkene på begge sider av likhetstegnet dimensjonsløse. Utrykket på venstre side blir lik  $(T(x,t) - \Delta T_{0c}) / \Delta T_0$ . Ved å innføre karakteristiske dimensjoner, som beskrevet i Kapittel 4.1, ser en at forholdet mellom  $x$  og  $t$  er gitt ved  $\psi = \sqrt{\alpha^* t}$ , eller  $\psi^2 = \alpha^* t$ , der  $\psi$  og  $\tau$  er de karakteristiske dimensjonene. Temperaturen kan derfor plottes som en funksjon av enten  $t/x^2$  eller  $x/\sqrt{t}$ . I denne masteroppgaven er temperaturene plottet

som funksjon av tid. Det betyr at forholdet  $\Delta T/\Delta T_0$  er plottet som en funksjon av  $t/x'^2$ , der  $x'$  er den nye  $x$ -verdien etter at sprøytebetongen og Mastersealen er omgjort til Støren-granitt. Figur 42 viser definisjonene av  $\Delta T$  og  $\Delta T_0$ . Merk at  $T_{\text{luft}}$  er temperaturen i Tunnelrommet.



Figur 42: Definisjoner og størrelser brukt for å plote resultatene dimensjonsløst.

### 12.3.1 Ny $x$ -verdi for målepunkter i fryselabben og TEMP/W

Etter at pakkene med sprøytbetong, Masterseal og Støren-granitt er omgjort til et homogent medium av Støren-granitt, har også målepunktene i fryselabben og referansenodene i TEMP/W fått nye  $x$ -verdier. Tabell 15 viser den nye  $x$ -verdien for målepunktene i fryselabben og i TEMP/W. Det er disse verdiene som er benyttet for den dimensjonsløse plottingen av resultatene.

Tabell 15: Nye  $x$ -verdier for målere i fryselabben og referansenodene i TEMP/W.

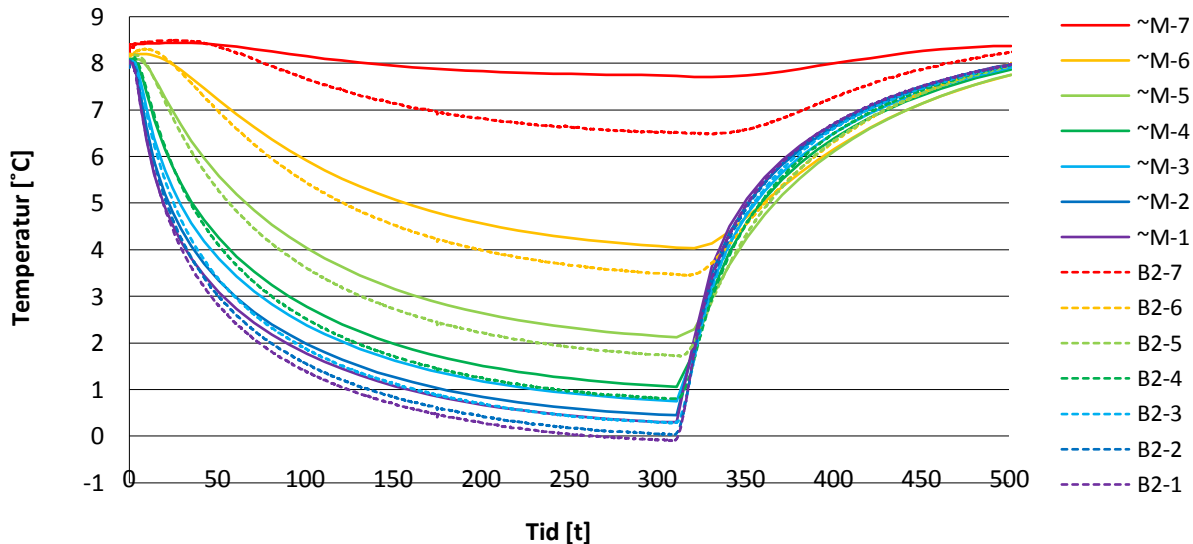
	Membran	1	2	3	4	5	6	7
Fryselabben	0,094	0,199	0,219	0,259	0,339	0,499	0,819	1,459
TEMP/W	0,094	0,204	0,229	0,279	0,329	0,504	0,829	1,479

## 13 Direkte sammenligning mellom numerisk modell og praksis

Før de dimensjonsløse resultatene blir presentert, vil de loggede temperaturer og de beregnede temperaturer vises sammen. Eventuelle avvik mellom loggede og beregnede temperaturer vil bli diskutert kort.

### 13.1 Sammenligning F-1 mot T-1

Figur 43 viser de loggede temperaturer i fryselabben for målerne i blokk B-2 i forhold til de beregnede verdiene i TEMP/W.

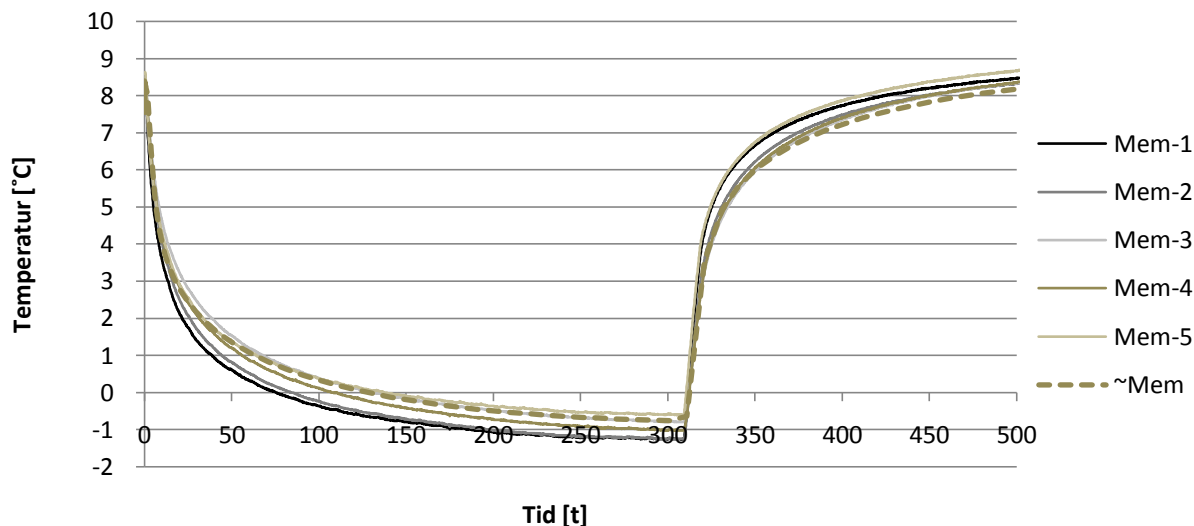


Figur 43: Resultater for målepunktene 1-7 fra forsøk F-1 og beregningene T-1, der  $T_1=+8,5$  °C og  $T_2=-3,6$  °C.

Figur 43 Figuren viser at de beregnede verdiene for temperaturen innover i Støren-granitten avviker litt fra de loggede verdiene når steglaster reverseres. Forskjellen er minst for målepunktene med lavt nummer, mens den er litt større for punktene som ligger nærmere Bergrommet. Forskjellen mellom ~M-1 og B2-1 er ca 0,4 °C, mens den er ca 1,1 °C mellom ~M-7 og B2-7. Økende forskjell mellom den beregnede og den loggede temperaturen med stigende målnummer kan skyldes at temperaturen i Bergrommet ikke er helt riktig gjengitt i TEMP/W, eller at varmeovergangstallet i Bergrommet også skulle vært tatt med i TEMP/W. Det kan også skyldes unøyaktige termiske egenskaper for Støren-granitten, Mastersealen og sprøytbetongen eller unøyaktig varmeovergangstall i Tunnelrommet.

Ser en på temperaturene ved avslutningen av forsøket er forskjellen mellom målepunktene ~M-1 og B2-1 til ~M-6 og B2-6 mindre enn 0,3 °C. For ~M-7 og B2-7 er forskjellen enda mindre. Dette tyder på at varmeovergangstallet i Tunnelrommet er rimelig, men at de termiske egenskapene til ett eller flere av materialene er unøyaktige.

Figur 44 viser den beregnede temperaturen i målepunktet bak membranen i forhold til de loggede temperaturer fra forsøket i fryselabben.

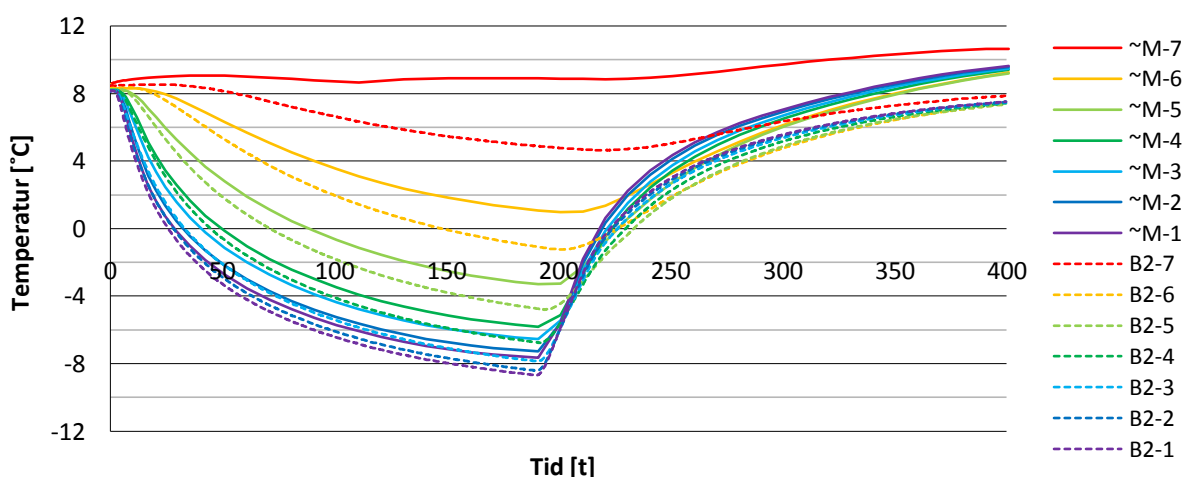


Figur 44: Resultater for målepunktene bak membranen fra forsøk F-1 og beregningene T-1, der  $T_1=+8,5\text{ °C}$  og  $T_2=-3,6\text{ °C}$ .

Som Figur 44 viser, er det bra samsvar mellom den beregnede verdien for målepunktet bak membranen og de loggede resultatene. Den beregnede slutt-temperaturen ligger litt lavere enn de loggede, men den største forskjellen er ikke større enn  $0,5\text{ °C}$ . Avviket fra snittverdien av de loggede temperaturene er  $0,2\text{ °C}$ . Denne feilen kan skyldes forskjeller i temperaturen i Tunnelrommet under forsøket i fryselaabben, og den tilpassede temperaturen benyttet i TEMP/W. Den kan også skyldes unøyaktig varmeovergangstall i TEMP/W, eller ujevne lagtykkelser for sprøytebetongen og Mastersealen i fryselaabben.

### 13.2 Sammenligning F-2 mot T-2

Figur 45 viser de loggede temperaturene i fryselaabben for målerne i blokk B-2 i forhold til de beregnede verdiene i TEMP/W.



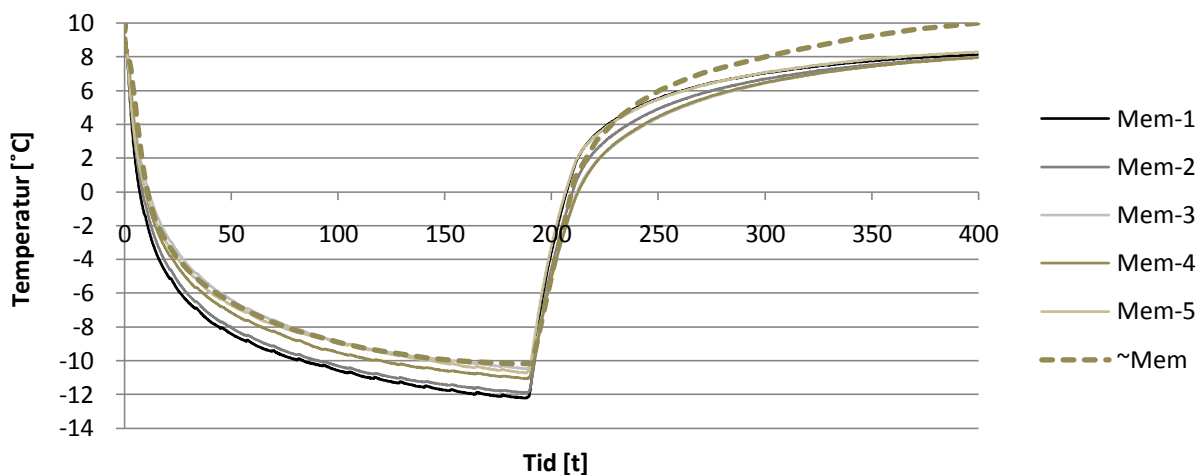
Figur 45: Resultater for målepunktene 1-7 fra forsøk F-2 og beregningene T-2, der  $T_1=+8,5\text{ °C}$  og  $T_2=-17,6\text{ °C}$ .

Figuren viser at de beregnede verdiene stemmer best før steglasteren reverseres. Når steglasteren reverseres er forskjellen mellom ~M-1 og B2-1  $0,8\text{ °C}$ , mens forskjellen er  $4\text{ °C}$  for ~M-7 og B2-7. Denne tendensen med økende forskjell med økende målernummer ser ut til å gjelde også for denne steglasteren. Siden forskjellen mellom den beregnede og den målte temperaturen er større for F-2/T-2

enn for F-1/T-1 kan det tyde på at de termiske egenskapene til ett eller flere av materialene er litt unøyaktige.

Ser en på temperaturene ved avslutningen av forsøket er det en forskjell på 1,8 °C for alle målepunktene unntatt ~M-7 og B2-7, der forskjellen er 2,4 °C. Disse forskjellene skyldes trolig unøyaktig gjengiving av temperaturen i Bergrommet og Tunnelrommet i TEMP/W.

Figur 46 viser den beregnede temperaturen i målepunktet bak membranen i forhold til de loggede temperaturene fra forsøket i fryselabben.



Figur 46: Resultater for målepunktene bak membranen fra forsøk F-2 og beregningene T-2, der  $T_1=+8,5$  °C og  $T_2=-17,6$  °C.

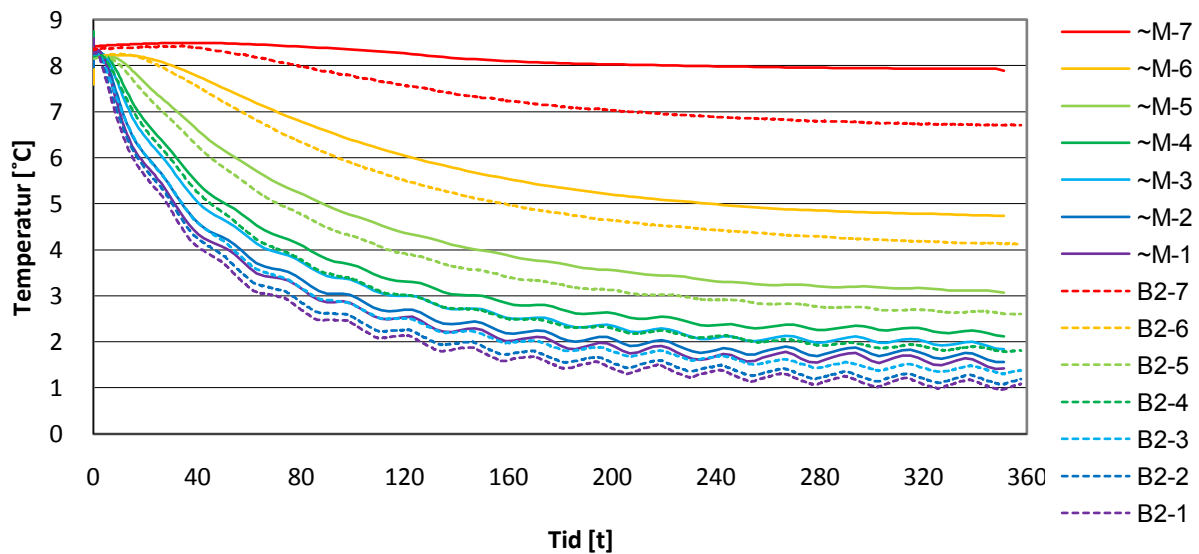
Som figuren viser, er det bra samsvar mellom den beregnede verdien for målepunktet bak membranen og de loggede resultatene. Den beregnede temperaturen ligger litt høyere enn de loggede når steglaster reverseres. Den største forskjellen er ca 2 °C. Avviket fra snittverdien av de loggede temperaturene er 0,7 °C. Denne feilen kan skyldes forskjeller i temperaturen i Tunnelrommet under forsøket i fryselabben, og den tilpassede temperaturen benyttet i TEMP/W. Den kan også skyldes unøyaktig varmeovergangstall i TEMP/W, ujevne lagtykkelser for sprøytebetongen og Mastersealen i fryselabben eller en kombinasjon av disse tre tingene.

Ser en på temperaturene ved slutten av forsøket ligger den beregnede temperaturen 2 °C over den loggede. Dette bekrefter teorien om at temperaturen i Tunnelrommet er litt unøyaktig gjengitt i TEMP/W.



### 13.3 Sammenligning F-3 mot T-5

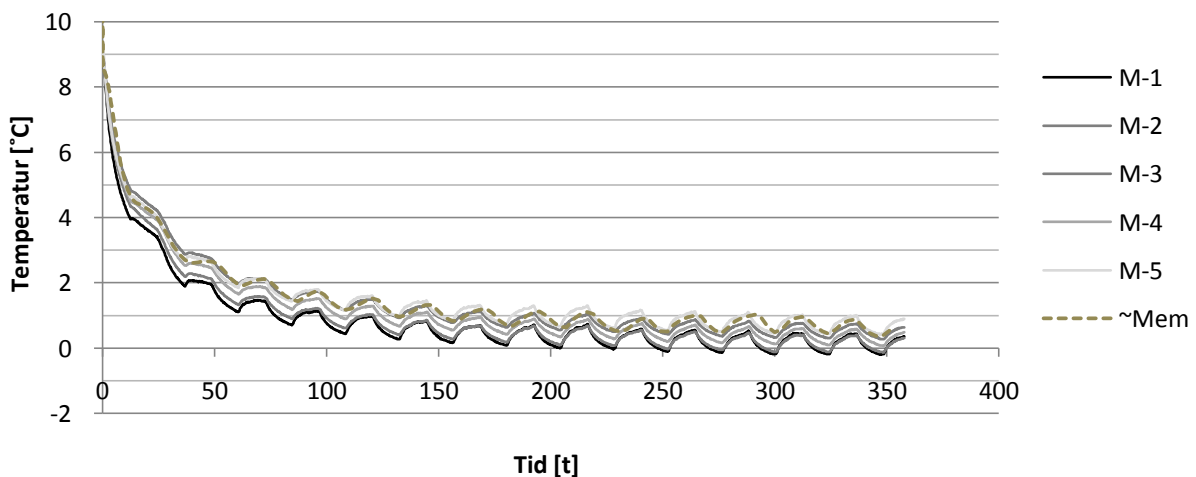
Figur 47 viser de loggede temperaturer i fryselabben for målerne i blokk B-2 i forhold til de beregnede verdiene i TEMP/W.



Figur 47: Resultater for målepunktene 1-7 fra forsøk F-3 og beregningene T-5, der  $T_m = -1\text{ °C}$ ,  $\Delta T_0 = 2\text{ °C}$  og den første steglaster var negativ.

Som figuren viser er det godt samsvar mellom de loggede og de beregnede temperaturer, men at forskjellen i temperatur øker med økende målnummer. Forskjellen mellom ~M-1 og B2-1 er ca 0,4 °C og mellom ~M-7 og B2-7 er den ca 1,2 °C. Dette bekrefter misstanken om at de termiske egenskapene er litt unøyaktige.

Figur 48 viser den beregnede temperaturen i målepunktet bak membranen i forhold til de loggede temperaturer fra forsøket i fryselabben.



Figur 48: Resultater for målepunktene bak membranen fra forsøk F-3 og beregningene T-5, der  $T_m = -1\text{ °C}$ ,  $\Delta T_0 = 2\text{ °C}$  og den første steglaster var negativ.

Som figuren viser, er det bra samsvar mellom den beregnede verdien for målepunktet bak membranen og de loggede resultatene. Den største forskjellen er ca 1 °C. Avviket fra snittverdien av de loggede temperaturene er ca 0,5 °C. Denne feilen kan skyldes unøyaktig varmeovergangstall i TEMP/W, ujevne lagtykkelser for sprøytebetongen og Mastersealen i fryselabben, unøyaktig gjengivelse av temperaturen i Tunnelrommet eller en kombinasjon av disse.

### **13.4 Oppsummering**

Ut fra den dirkede sammenligningen av de loggede og de beregnede temperaturene kan en trekke noen slutninger. Den beregnede temperaturen bak membranen ser ut til å stemme rimelig bra med de loggede temperaturene for alle de tre forsøk/beregning-parene, F-1/T-1, F-2/T-2 og F-3/T-5. Dette tyder på at varmeovergangstallet benyttet i Tunnelrommet for TEMP/W er rimelig.

Alle de tre sammenligningene viser at forskjellen mellom de loggede og de beregnede temperaturene øker innover i Støren-granitten, og denne forskjellen ser ut til å øke jo større steglaster er. Dette kan indikere at varmeledningstallet og/eller varmekapasiteten til ett eller flere av materiale ikke er helt korrekt. Sannsynligvis er det de termiske egenskapene til Støren-granitten som ikke er helt korrekt, og at det er varmeledningsevnen som er satt litt for høy. Dette kan skyldes at blokkene benyttet i fryselabben har litt andre egenskaper enn de prøvestykkene testene ble utført på, eller det kan skyldes mikrosprekker eller forurensninger i blokkene.

De store avvikene på slutten av beregning T-2 skyldes trolig unøyaktig gjengiving av temperaturen i Bergrommet og Tunnelrommet.

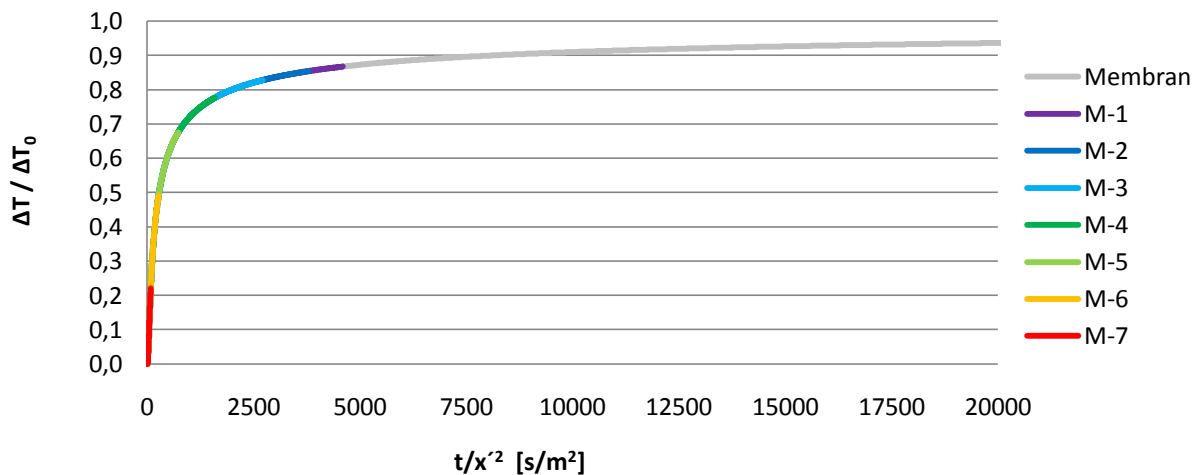
## 14 Dimensjonsløse resultater

Nedenfor følger de dimensjonsløse resultatene fra forsøkene i fryselabben og beregningene i TEMP/W. Merk at det er  $x'$  som blir brukt, det vil si den nye  $x$ -verdien etter at sprøytebetongen og Mastersealen er konvertert om til Støren-granitt.

Det er resultatene fra fryselabben som er brukt som  $T_1$  og  $T_2$  for både forsøkene og beregningene. Dette betyr at alle målepunktene har individuelle  $T_1$ , men at de har felles  $T_2$ . Dette kan påvirke resultatet noe, men dette er bemerket der det er aktuelt. For plottene fra returen av forsøkene har alle målepunktene felles  $T_1$  og  $T_2$ , og er deretter forskjøvet slik at startverdien  $\Delta T/\Delta T_0$  for alle målepunktene blir lik 0. Dette er gjort for å gjøre dem direkte sammenlignbare.

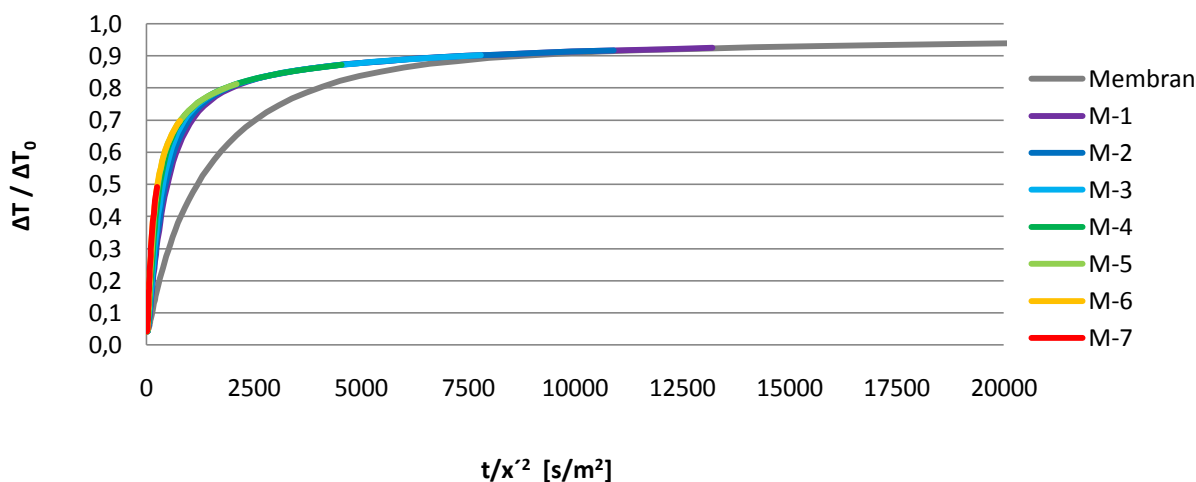
### 14.1 Analytiske beregninger

Figur 49 viser den analytisk beregnede respons i steglast i Støren-granitt, der  $T_1 = +8,5$  °C,  $T_2 = -3,6$  °C og  $t=300$  t, ved hjelp av Formel ( 4.8). Målepunktene har samme plassering som i fryselabben. Som figuren viser, ligger alle kurvene oppå hverandre, og  $\Delta T/\Delta T_0$  går mot 1,0. Denne formelen gjelder, som beskrevet i Kapittel 4.5, i et uendelig medium og det er ikke tatt hensyn til varmeovergangstall. En kan derfor ikke forvente at kurvene fra forsøkene og beregningene ser lik ut. Verdiene for  $\Delta T/\Delta T_0$  vil ligge lavere, og kurvene vil ikke overlape hverandre så perfekt.



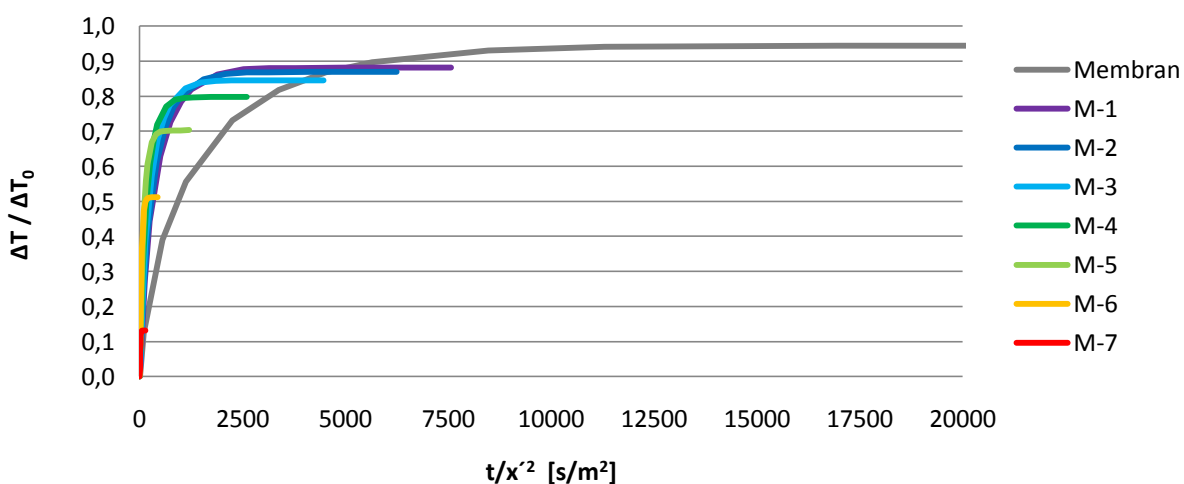
Figur 49: Analytisk beregnet respons på steglast, der  $T_1 = +8,5$  °C,  $T_2 = -3,6$  °C og  $t=300$  t, presentert dimensjonsløst.

Figur 50 viser den analytisk beregnede responsen under samme forhold som beskrevet ovenfor, men ved hjelp av Formel ( 4.10) som tar hensyn til varmeovergangstallet. Som figuren viser går  $\Delta T/\Delta T_0$  mot 1,0 også når en tar hensyn til varmeovergangstallet, men kurvene for de forskjellige målepunktene er forskjøvet mot venstre med økende målnummer. Målepunktet bak membranen skiller seg klart fra de andre punktene. Denne tendensen kan en forvente for kurvene fra forsøkene og beregningene også. Men siden også denne formelen gjelder for et uendelig medium vil verdiene for  $\Delta T/\Delta T_0$  være litt høyere enn hva en kan forvente for forsøkene og beregningene.



Figur 50: Analytisk beregnet respons på stegløst når en tar hensyn til varmeovergangstallet, der  $T_1 = +8,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = -3,6 \text{ }^\circ\text{C}$  og  $t=300 \text{ t}$ , presentert dimensjonsløst.

Figur 51 viser den analytisk beregnede responsen under samme forhold som beskrevet ovenfor, men ved hjelp av Formel ( 4.11) som gjelder for et endelig medium, og som tar hensyn til varmeovergangstallet. Som figuren viser går  $\Delta T/\Delta T_0$  mot 1,0 for målepunktet bak membranen, og mot lavere verdier for de andre målepunktene. Også denne figuren viser at de forskjellige målepunktene er forskjøvet mot venstre med økende målnummer, og at målepunktet bak membranen skiller seg klart fra de andre punktene. Denne tendensen kan en forvente for kurvene fra forsøkene og beregningene også. En kan forvente at resultatene fra forsøkene i fryselabben og beregningene i TEMP/W skal ligne på kurvene i denne figuren, og at det gjelder for både beregningen T-1 og T-2 og forsøkene F-1 og F-2.



Figur 51: Analytisk beregnet respons på stegløst i et endelig medium når en tar hensyn til varmeovergangstallet, der  $T_1 = +8,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = -3,6 \text{ }^\circ\text{C}$  og  $t=300$ , presentert dimensjonsløst.

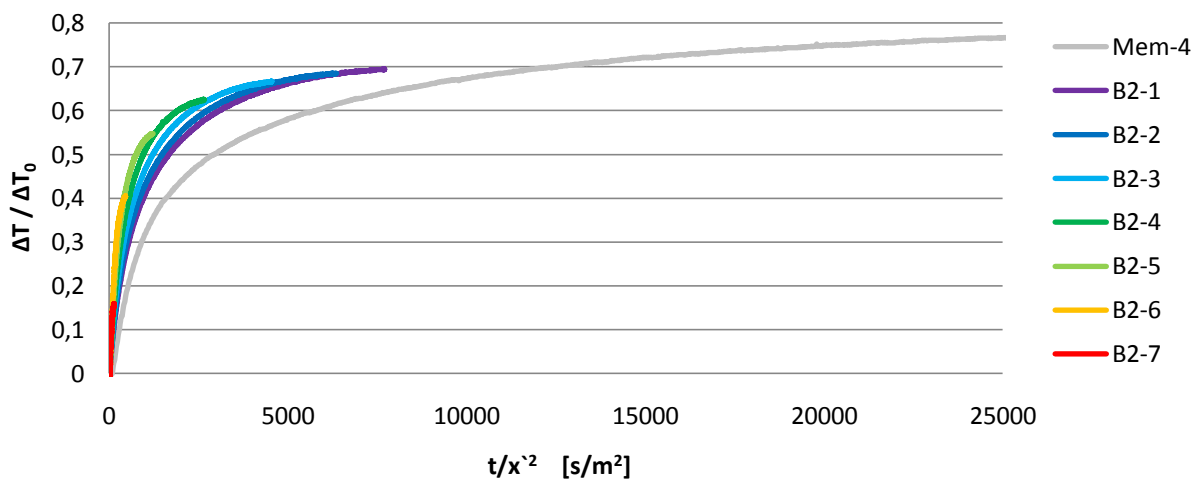
## 14.2 Negativ stegløst

Resultatene fra forsøkene og beregningene presenteres som to delforsøk, én del med den negative stegløsten og én del med reverseringen av forsøket, altså den positive stegløsten. Nedenfor følger resultatene for den negative stegløsten.

Dimensjonsløse resultater for hvert enkelt målepunkt for første del av beregningene T-1, T-2 og forsøkene F-1 og F-2 er vist i Vedlegg K.

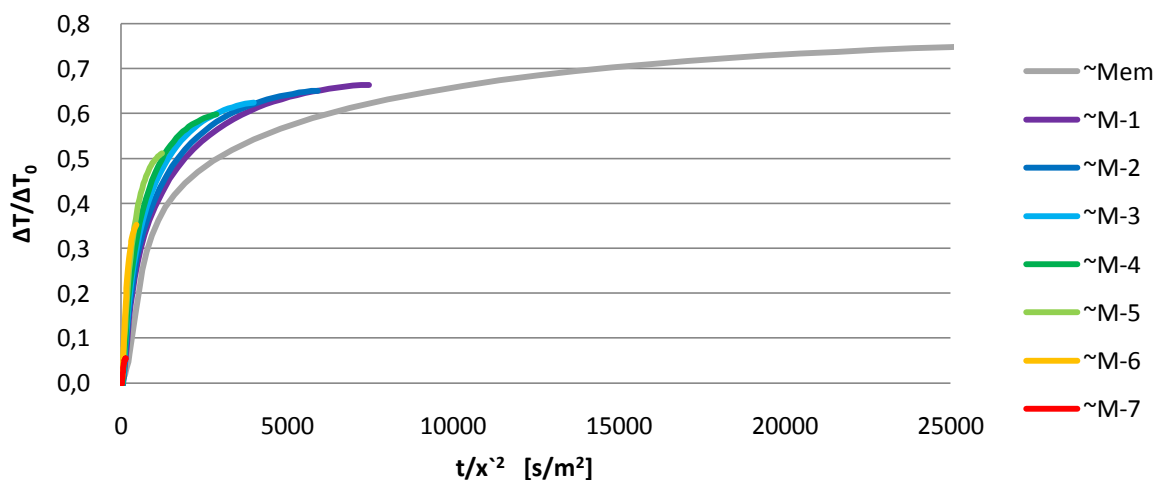
### 14.2.1 Negativ stegløst F-1 og T-1

Figur 52 viser de dimensjonsløse resultatene fra forsøk F-1, der  $T_1=+8,5$  °C og  $T_2=-3,6$  °C. Som figuren viser, skiller målepunktet bak membranen seg klart fra de andre målepunktene, akkurat som forventet. Kurvene for målnummer 1 til 7 er også forskjøvet mot venstre med økende nummer. Som nevnt under kapittelet om de analytiske beregningene, ligger alle alle kurvene litt lavere enn for de analytiske beregningene. For målepunktet bak membranen går  $\Delta T/\Delta T_0$  mot 0,8 når tiden øker. For målnummer 1 til 7 flater ikke kurvene like tydelig ut som de gjør for den analytiske beregningen, men det er likevel klart at de flater ut mot en konstant verdi for  $\Delta T/\Delta T_0$ .



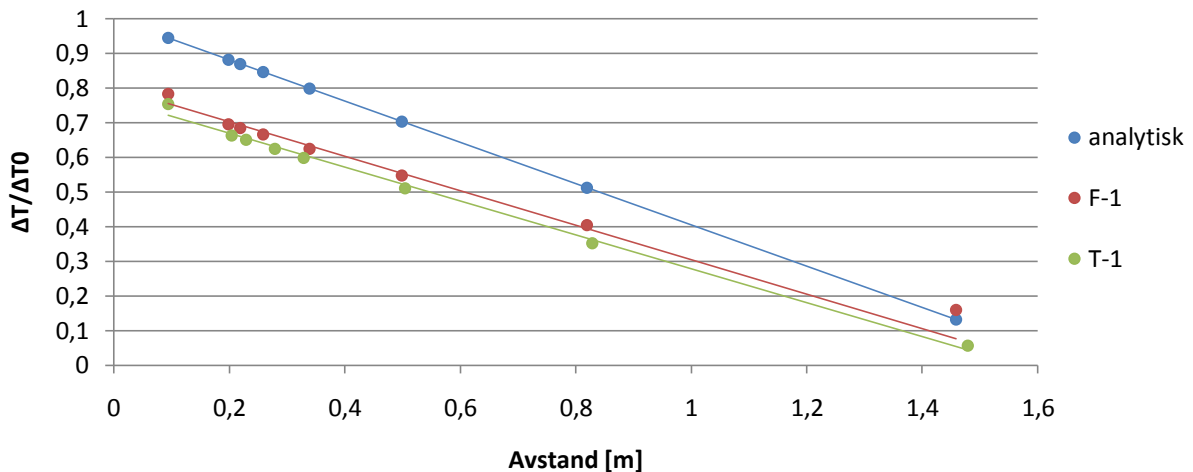
Figur 52: Dimensjonsløse resultater fra forsøk F-1, der  $T_1=+8,5$  °C og  $T_2=-3,6$  °C.

Figur 53 viser de dimensjonsløse resultatene fra beregning T-1, der  $T_1=+8,5$  °C og  $T_2=-3,6$  °C. Som figuren viser er trenden fra Figur 52 med lavere verdier for  $\Delta T/\Delta T_0$  enn for den analytiske beregningen og en forskyvning av kurvene mot venstre med økende målnummer tydelig også her. Verdiene for  $\Delta T/\Delta T_0$  ligger litt lavere enn for forsøk F-1.



Figur 53: Dimensjonsløse resultater fra beregning T-1, der  $T_1=+8,5$  °C og  $T_2=-3,6$  °C.

Hvis en plotter  $\Delta T/\Delta T_0$  som en funksjon av x-verdien til målepunktene når forsøket avsluttes, kan en forvente at punktene ligger på ei rett linje. Dersom den forløpte tiden er den samme, kan en i tillegg forvente at linjene ligger om ikke helt oppå hverandre, så i alle fall nære hverandre. Figur 54 viser et slikt plott for den negative steglaster med den analytiske beregningen, forsøket i fryselabben og den numeriske beregningen i TEMP/W. Som figuren viser skiller målepunkt B2-7 seg ut fra de andre målepunktene. Dette skyldes et missforhold mellom de temperaturene som er valgt som  $T_1$  og  $T_2$  og temperaturen i målepunktet da forsøket ble avsluttet. Dette målepunktet inngår derfor ikke som grunnlag for trendlinja.



**Figur 54: Sammenligning av terskelverdier for den analytiske beregningen, forsøket i fryselabben og den numeriske beregningen i TEMP/W for den negative steglaster.**

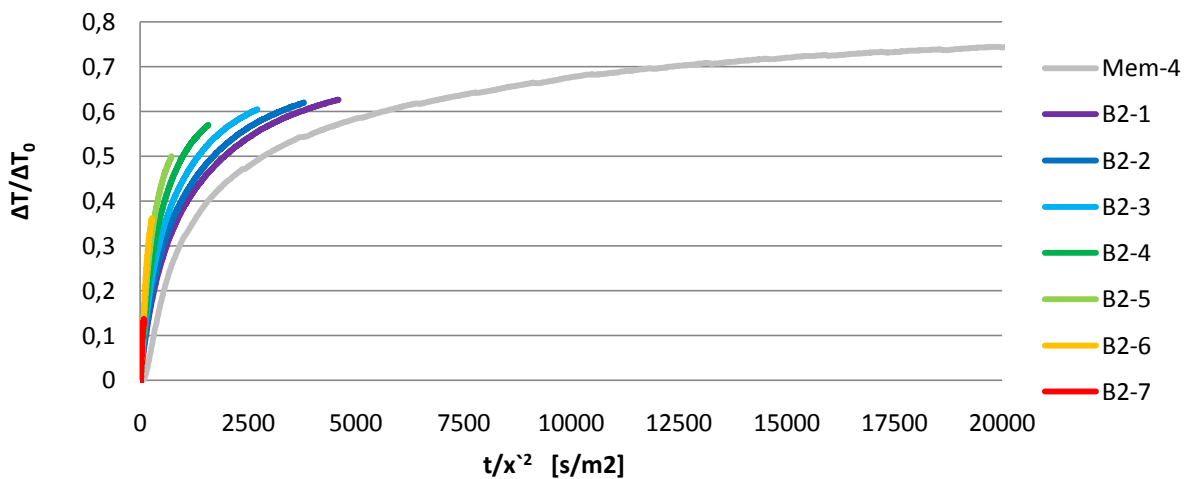
Ut fra figuren ser det ut som om forskjellen mellom den analytiske beregningen, forsøket i fryselabben og den numeriske beregningen blir mindre jo lenger inn i berget en kommer. I teorien skal punktene ligge på rette linjer som er parallelle. Én av grunnene til at linjene fra fryselabben og TEMP/W ikke er helt parallelle med den analytiske, er at steglasterne ikke er perfekte steglaster. I virkeligheten går det, som kommentert tidligere, litt tid før temperaturen er konstant lik den valgte temperaturen  $T_2$ . Andre medvirkende grunner til at linjene ikke er parallelle kan være detaljer rundt verdier for  $T_1$  og  $T_2$  brukt til plottingen, den varierende temperatur i Støren-granitten da forsøket startet eller de varierende temperaturene i Bergrommet og Tunnelrommet. En annen ting kan være at forsøket ikke er kjørt lenge nok til at temperaturen er helt stabilisert. Sannsynligvis er det en kombinasjon av alle disse faktorene.

Forskyvingen langs y-aksen kan skyldes flere ting. Som nevnt i kapittel 13.4 er sannsynligvis varmeledningsevnen til Støren-granitten litt for høy. Den analytiske beregningen er gjort for en homogen enhet bestående av Støren-granitt, som forklart i kapittel 12.2, og det er brukt samme egenskaper for Støren-granitten som i TEMP/W. Dette kan forklare hvorfor linja for den analytiske beregningen ligger såpass mye høyere enn de to andre. I tillegg kommer det faktum at den analytiske beregningen er en forenkling av forholdene i fryselabben, siden temperaturen i Tunnelrommet og Bergrommet i virkeligheten aldri er helt konstant. Den analytiske beregningen går ut fra en perfekt steglaster, noe som ikke er mulig i fryselabben og dermed også i TEMP/W. Det at steglasterne i fryselabben og TEMP/W ikke er perfekte steglaster kan også forklare hvorfor de linjene ligger lavere enn linja for den analytisk beregnede responsen. Noe av tiden går med til å kjøle ned Tunnelrommet, og ikke bare sprøytebetongen, Mastersealen og Støren-granitten.

Ut fra det tideligere resonnementet om varmeledningsevnen til Støren-granitten, burde linja for beregningene i TEMP/W ligge over linja for fryselabben. Som figuren viser, er dette ikke tilfelle. Dette kan skyldes små variasjoner i forløpt tid og at modellen i TEMP/W er en forenkling av virkeligheten.

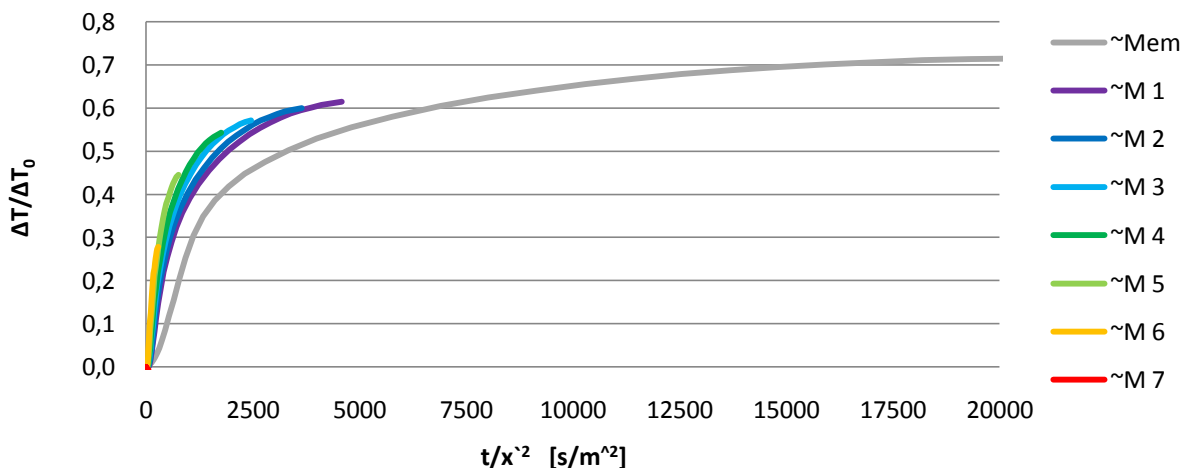
### 14.2.2 Negativ steglast F-2 og T-2

Figur 55 viser de dimensjonsløse resultatene fra forsøk F-2, der  $T_1=+8,5$  °C og  $T_2= -17,6$  °C. Som figuren viser, skiller målepunktet bak membranen seg klart fra de andre målepunktene, akkurat som forventet. Kurvene for målernummer 1 til 7 er også forskjøvet mot venstre med økende nummer. For forsøk F-2 ligger kurvene i samme område som for forsøk F-1, og  $\Delta T/\Delta T_0$  går mot 0,8 når tiden øker, også for F-2.



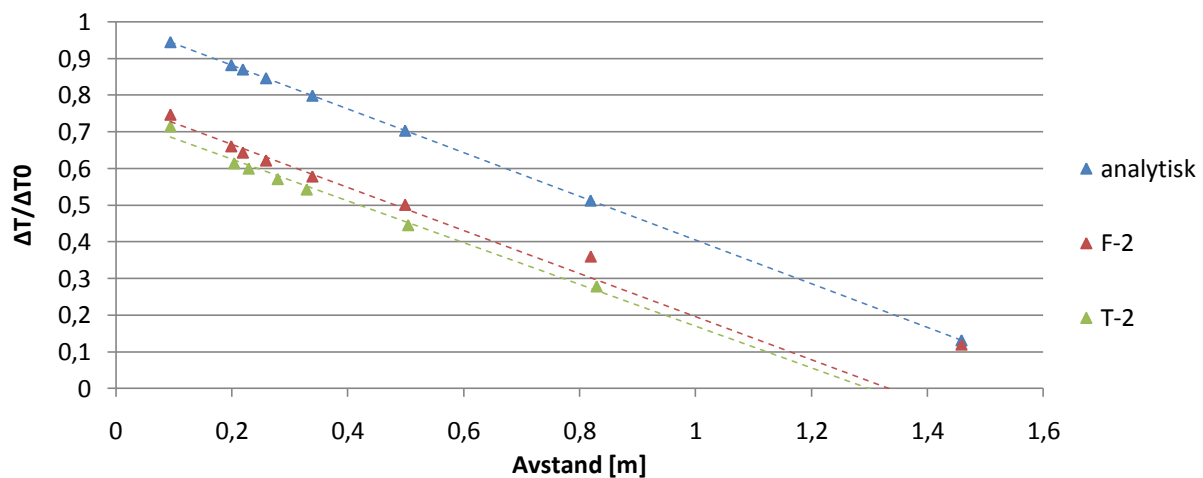
Figur 55: Dimensjonsløse resultater fra forsøk F-2, der  $T_1=+8,5$  °C og  $T_2= -17,6$  °C.

Figur 56 viser de dimensjonsløse resultatene fra beregning T-2, der  $T_1=+8,5$  °C og  $T_2= -17,6$  °C. Som figuren viser, er trenden fra forsøk F-1 og beregning T-1 med litt lavere verdier for  $\Delta T/\Delta T_0$  for de beregnede temperatuene enn for de målte, tydelig også her. Merk at verdiene for ~M-7 er negativ, se Figur K-16. Dette skyldes at for å få sammenlignbare kurver er det brukt samme  $T_1$  og  $T_2$  for begge plottene. Det er resultatene fra fryselabben som er lagt til grunn. Figur 45 viser at den beregnede temperaturen ligger godt over den loggede, noe som forklarer hvorfor  $\Delta T/\Delta T_0$  for ~M-7 blir negativ.



Figur 56: Dimensjonsløse resultater fra beregning T-2, der  $T_1=+8,5$  °C og  $T_2= -17,6$  °C.

Figur 57 viser  $\Delta T/\Delta T_0$  plottet mot målernes plassering for den analytiske beregningen, forsøket i fryselabben og den numeriske beregningen i TEMP/W. Som figuren viser skiller målepunkt B2-6 og B2-7 seg ut for dette forsøket. Som for F-1, skyldes dette et missforhold mellom de temperaturene som er valgt som  $T_1$  og  $T_2$  og temperaturen i målepunktet da forsøket ble avsluttet. Disse målepunktene inngår derfor ikke som grunnlag for trendkurven.



Figur 57: Sammenligning av terskelverdier for den analytiske beregningen, forsøket i fryselabben og den numeriske beregningen i TEMP/W for den negative steglaster.

Som figuren viser er linjene tilnærmet parallelle, slik som forventet. Noe av forskyvningen i y-retningen mellom linjene for forsøket i fryselabben og den numeriske beregningen skyldes en liten forskjell i forløpt tid mellom forsøket og beregningen. Denne tidsforskjellen er på ca 5 timer, og forklarer ikke alene forskyvningen. Andre grunner kan være som beskrevet for T-1 og F-1.

### 14.3 Positiv steglaster

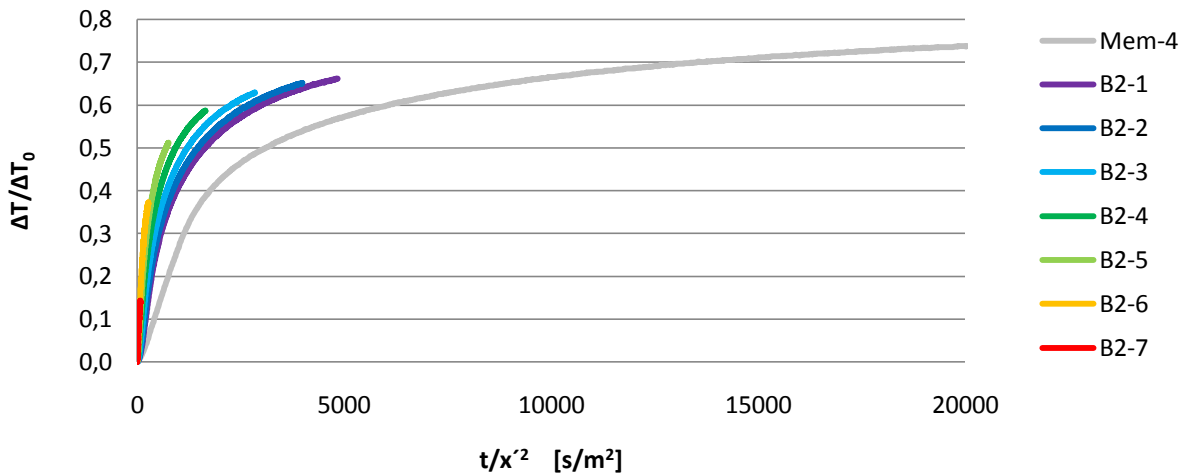
Resultatene fra forsøkene og beregningene presenteres som to delforsøk, én del med den negative steglaster og én del med reverseringen av forsøket, altså den positive steglaster. Nedenfor følger resultatene for den positive steglaster.

#### 14.3.1 Positiv steglaster F-1 og T-1

For den positive steglaster er temperaturen i Tunnelrommet da forsøket ble reversert brukt som felles  $T_1$ , og temperaturen i Bergrommet på er brukt som felles  $T_2$ . Deretter er kurvene forskyvnet slik at alle har startverdien  $\Delta T/\Delta T_0 = 0$ . Dette gjør at en kan forvente at kurvene for alle målepunktene ligner på kurvene for første del av forsøket.

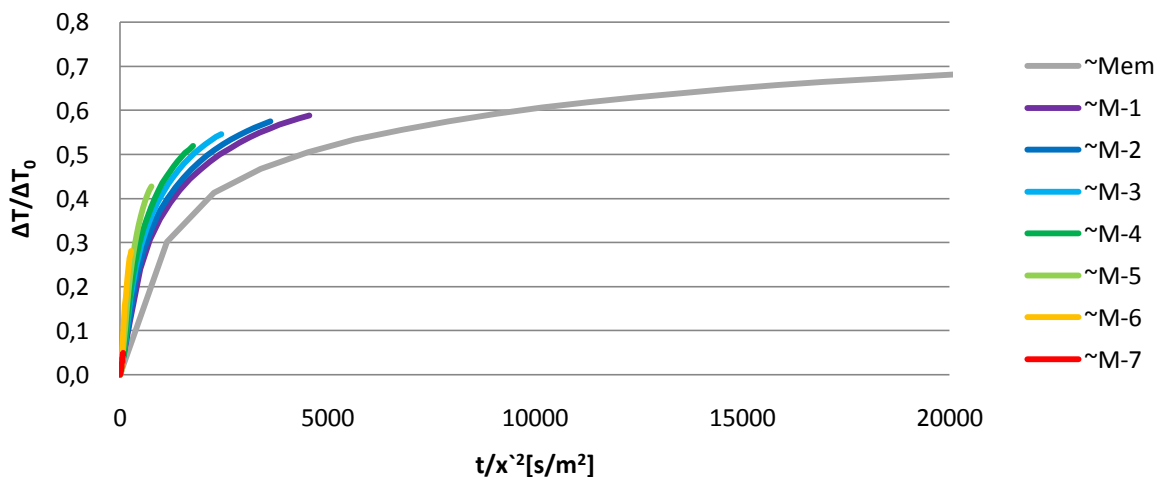
Figur 58 viser de dimensjonsløse resultatene for reverseringen av forsøk F-1, der  $T_1 = -3,6$  °C og  $T_2 = +8,5$  °C. Som forventet viser figuren at  $\Delta T/\Delta T_0$  for målepunktet bak membranen går mot 0,8. Også for returen skiller målepunktet bak membranen seg fra de andre kurvene og kurvene er forskyvnet mot venstre med økende målnummer, slik som forventet.





Figur 58: Dimensjonsløse resultater fra returen av forsøk F-1, der  $T_1=+8,5\text{ }^\circ\text{C}$  og  $T_2=-3,6\text{ }^\circ\text{C}$ .

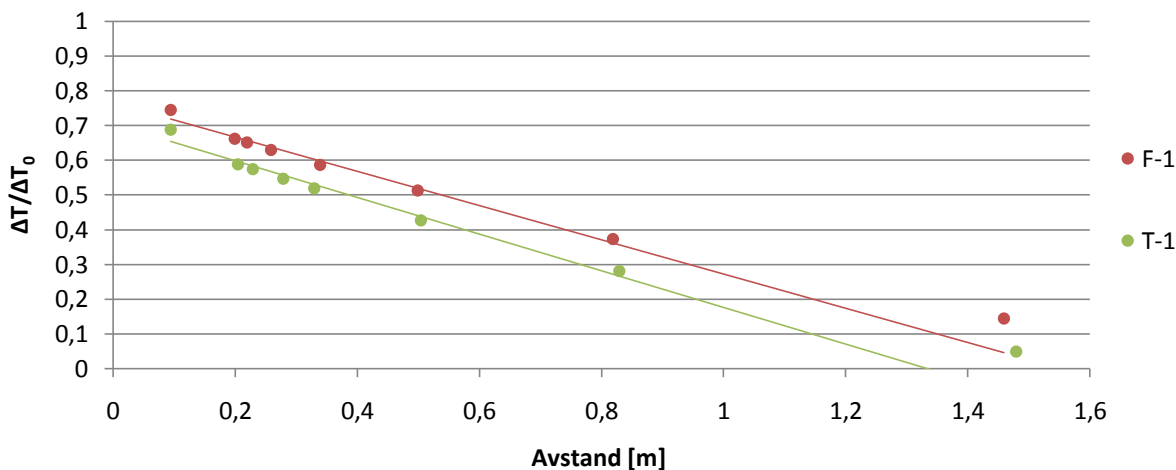
Figur 59 viser de dimensjonsløse resultatene for siste del av beregningen T-1, der  $T_1=-3,6\text{ }^\circ\text{C}$  og  $T_2=+8,5\text{ }^\circ\text{C}$ . Som for første del av beregning T-1 ligger kurvene for siste del av T-1 noe lavere enn for kurvene for returen av F-1. Kurvene er også forskjøvet mot venstre med økende målnummer, og målepunktet bak membranen skiller seg fra de andre.



Figur 59: Dimensjonsløse resultater fra returen av beregning T-1, der  $T_1=+8,5\text{ }^\circ\text{C}$  og  $T_2=-3,6\text{ }^\circ\text{C}$ .

Figur 60 viser  $\Delta T/\Delta T_0$  plottet mot målernes plassering for returen av forsøket i fryselabben og siste del av den numeriske beregningen i TEMP/W. Også for disse resultatene kan en forvente at punktene skal ligge på rette linjer som er parallelle. Som for de negative steglasterne skiller målepunktet B2-7 seg ut, og i tillegg ligger verdien for ~M-7 for høyt. Dette skyldes et missforhold mellom de temperaturene som er valgt som  $T_1$  og  $T_2$  og temperaturen i målepunktet da forsøket ble avsluttet. Disse målepunktene inngår derfor ikke som grunnlag for trendkurven.

Som figuren viser er linjene tilnærmet parallelle, men det er en forskyvning i y-reningen. Denne forskyvningen er litt større enn for første del av forsøk F-1 og beregning T-1. Denne forskjellen skyldes delvis at resultatene fra fryselabben er ti timer senere enn resultatene fra TEMP/W. Detaljer ved plottingen og unøyaktige egenskaper ved modellen i TEMP/W kan forklare resten av forskjellen.

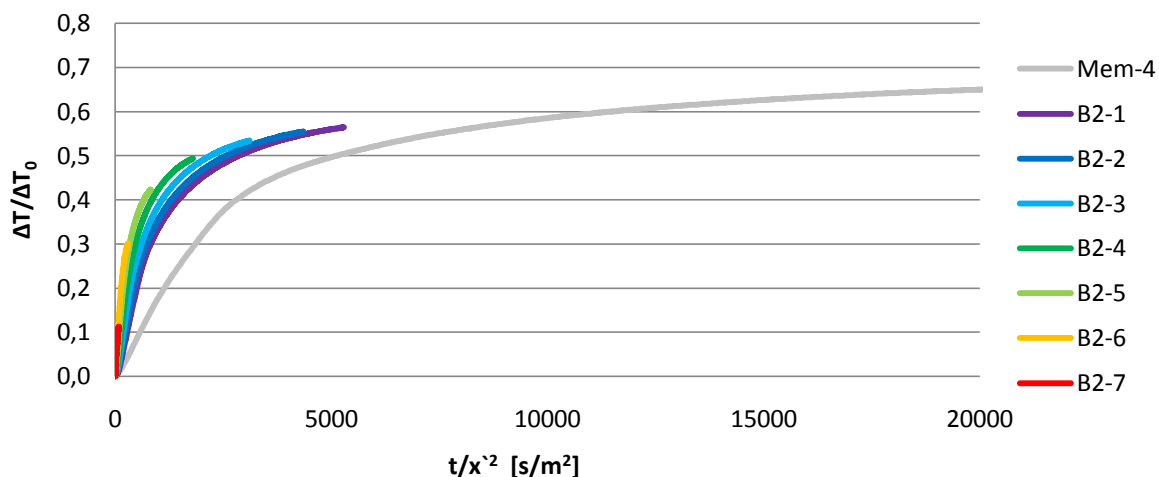


Figur 60: Sammenligning av terskelverdier for den analytiske beregningen, forsøket i fryselabben og den numeriske beregningen i TEMP/W for den positive steglaster.

### 14.3.2 Positiv steglaster F-2 og T-2

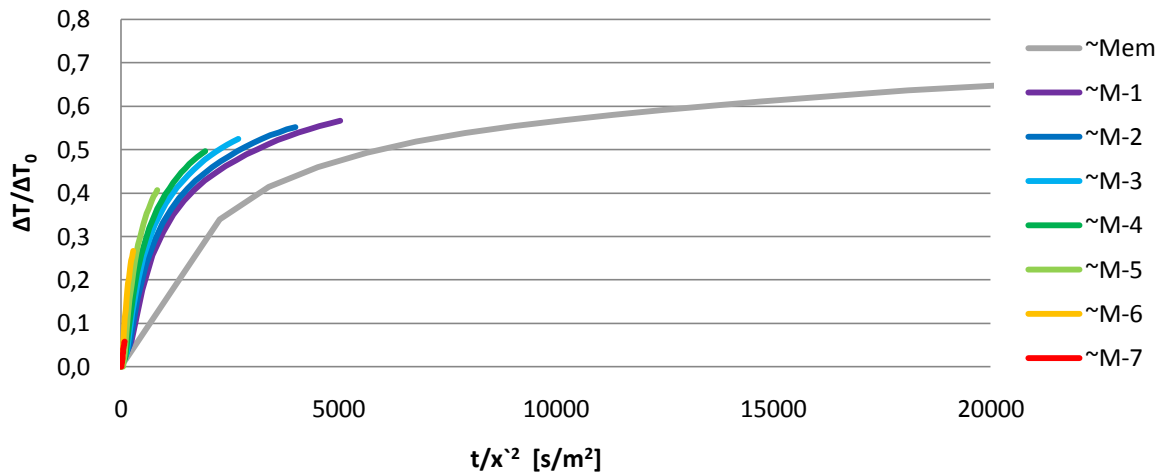
Som for F-1 og T-1 er temperaturen i Tunnelrommet da forsøket ble reversert brukt som felles  $T_1$ , og temperaturen i Bergrommet på er brukt som felles  $T_2$ . Dette gjør at en også for dette forsøket kan forvente at kurvene for alle målepunktene ligner på kurvene for første del av forsøket.

Figur 61 viser de dimensjonsløse resultatene for reverseringen av forsøk F-2, der  $T_1 = -17,6$  °C og  $T_2 = +8,5$  °C. Som figuren viser går verdien for  $\Delta T/\Delta T_0$  for målepunktet bak membranen mot 0,7 noe som er litt lavere enn for F-1. Men også for F-2 skiller målepunktet bak membranen seg fra de andre kurvene og kurvene er forskjøvet mot venstre med økende målnummer, slik som forventet.



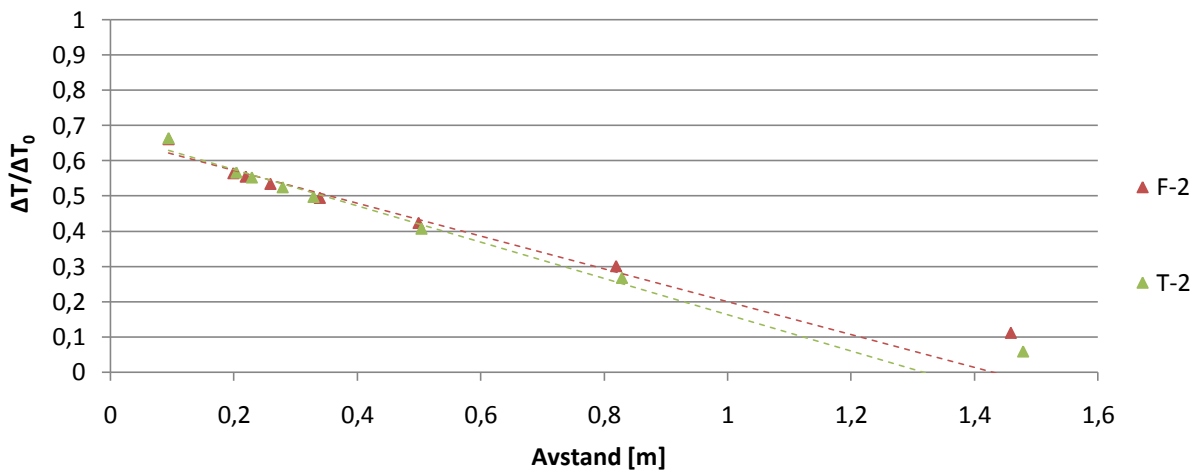
Figur 61: Dimensjonsløse resultater fra returen av forsøk F-2, der  $T_1 = +8,5$  °C og  $T_2 = -17,6$  °C.

Figur 62 viser de dimensjonsløse resultatene for siste del av beregningen T-2, der  $T_1 = -17,6$  °C og  $T_2 = +8,5$  °C. Som for den negative steglaster ligger kurvene for siste del av beregning T-2 noe lavere enn for returen av forsøk F-2. Men kurvene for siste del av T-2 ligger i samme område som kurvene for returen av F-2. Kurvene er også forskjøvet mot venstre med økende målnummer, og målepunktet bak membranen skiller seg fra de andre.



Figur 62: Dimensjonsløse resultater fra returen av beregning T-2, der  $T_1=+8,5\text{ }^\circ\text{C}$  og  $T_2= -17,6\text{ }^\circ\text{C}$ .

Figur 63 viser  $\Delta T/\Delta T_0$  plottet mot målerens plassering for returen av forsøket i fryselabben og siste del av den numeriske beregningen i TEMP/W. Som figuren viser, skiller punktene for ~M-7 og B2-7 seg fra de andre punktene. Figur 45 viser at disse målepunktene skiller seg klart fra de andre. Dette skaper et missforhold mellom faktisk temperatur i målepunktet og de valgte  $T_1$  og  $T_2$ . Disse punktene inngår derfor ikke som grunnlag for trendlinjene.



Figur 63: Sammenligning av terskelverdier for den analytiske beregningen, forsøket i fryselabben og den numeriske beregningen i TEMP/W for den positive steglasteren.

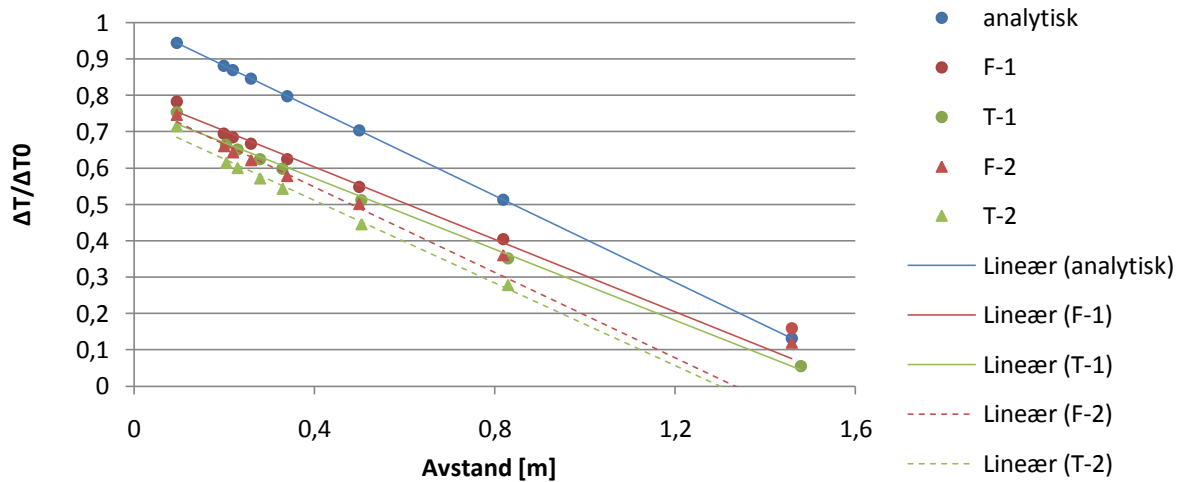
Ellers viser figuren at linjene nesten er parallelle, men i motsetning til resultatene fra F-1 og T-1 ligger de mye nærmere hverandre. Dette kan skyldes forhold rundt forsøket og beregningen, eller detaljer rundt plottingen.

#### 14.4 Oppsummering

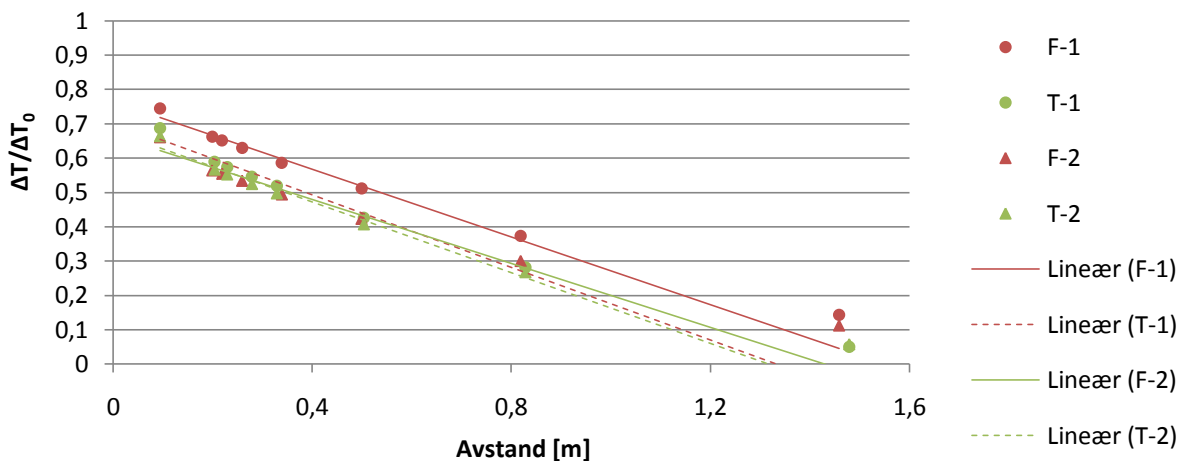
Figur 52, Figur 53, Figur 55 og Figur 56, samt figurene i Vedlegg K, viser at kurvene for den negative steglasteren forsøkene F-1 og F-2 følger hverandre meget bra. For beregningene i TEMP/W, T-1 og T-2, er det litt større avvik mellom kurvene, men også de er innenfor et avvik som en kan forvente.

Figur 58, Figur 59, Figur 61 og Figur 62, samt figurene i Vedlegg L, viser at kurvene for den positive steglaster i forsøkene F-1 og F-2 ikke følger hverandre like bra som for den negative steglaster. For siste del av beregningene T-1 og T-2 følger de derimot hverandre bedre.

Figur 64 viser en oppsummering av alle resultater for den negative steglaster, og Figur 65 viser en oppsummering av alle resultater for den positive steglaster.



Figur 64: Den analytisk beregnede responsen, resultatene fra forsøkene F-1 og F-2 og resultatene fra beregningene T-1 og T-2 for den negative steglaster.



Figur 65: Resultatene fra forsøkene F-1 og F-2 og resultatene fra beregningene T-1 og T-2 for den positive steglaster.

Figurene viser at alle linjene for den negative steglaster har stigningstall i området -0,59 for den analytiske, F-2 og T-2 til -0,49 for F-1 og T-1. For den positive steglaster er stigningstallet i området -0,52 for F-1 og F-2 til -0,47 for T-1 og T-2.

De like stigningstallene indikerer at sprøytebetongen, Mastersealen og Støren-granitten reagerer likt på temperaturendringer innenfor det temperaturintervallet som er brukt for disse forsøkene. Ujevn temperatur i Støren-granitten ved oppstart, varierende temperaturer i Tunnelrommet og Bergrommet underveis i forsøkene, for korte loggeperioder, ikke perfekte steglaster og detaljer rundt plottingen kan være forklaringen på avvikene. Plottingen er gjort likt for alle resultatene, og de resultatene som hører sammen er plottet med samme utgangspunkt.

Når det gjelder variasjonen i  $y$ -retningen skyldes den forskjeller i forløpt tid, ikke perfekte steglaster og sannsynligvis unøyaktigheter i varmeledningsevnen til Støren-granitten. De valgte  $T_1$  og  $T_2$  har også innvirkning på linjenes plassering i  $y$ -retningen. Det er derimot stigningstallet til linjene som er viktigst med tanke på sammenligning av resultatene.

## 15 Hypotese for varmeutveksling mellom berg og luft

Varmeovergang mellom luft og berg kan skje ved konveksjon og stråling. Konveksjonen kan enten være naturlig eller tvungen. Siden det er et fryseaggregat som styrer temperaturen i Tunnelrommet er det snakk om tvungen konveksjon.

Varmeovergangstallet ved tvungen konveksjon langs ei plan flate er gitt ved Formel ( 15.1) (Sass, Bouché, & Leitner, 1963)

$$h = 6,15 + 4,2 * v \quad (15.1)$$

Hvor:

h= varmeovergangstallet [W/m<sup>2</sup>K]

v = lufthastighet [m/s]

Lufthastigheten i Tunnelrommet er ikke målt, men det er grunn til å anta at den er ca 1 m/s (Skistad, pers med. vår 2010). Det gir et varmeovergangstall for tvungen konveksjon på 10,35 W/m<sup>2</sup>K.

Strålingsenergien per tidsenhet og flateenhet er gitt ved Stefan-Boltzmanns lov, Formel ( 15.2).

$$q = \varepsilon\sigma(T_{varm}^4 - T_{kald}^4) \quad (15.2)$$

Hvor:

q = Strålingsenergi [W/sm<sup>2</sup>]

ε = emisjonsevnen []

σ = Stefan-Boltzmann-konstanten = 5,6696 \* 10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>°K<sup>4</sup>

T = temperturen [°K]

Varmeovergangstallet er gitt ved strålingsenergien delt på ΔT. Dette er vist i Formel ( 15.3).

$$h = \frac{q}{T_{varm} - T_{kald}} \quad (15.3)$$

Ved å benytte en verdi for ε på 0,85 (Incropera, DeWitt, Bergman, & Lavine, 2007), og temperaturene fra forsøk F-1 og F-2, blir det totale varmeovergangstallet som vist i Tabell 16.

**Tabell 16: Verdier brukt for å finne det totale varmeovergangstallet.**

	T1 [°C]	T2 [°C]	T1 [°K]	T2 [°K]	σ [W/m <sup>2</sup> °K <sup>4</sup> ]	ε	h stråling	h tvungen konveksjon	h total
<b>F-1</b>	9,0	-3,6	282,15	269,55	5,6696 * 10 <sup>-8</sup>	0,85	3,97	10,35	14,32
<b>F-2</b>	8,5	-17,6	281,65	255,55	5,6696 * 10 <sup>-8</sup>	0,85	3,67	10,35	14,02

Dette viser at varmeovergangstallet benyttet i TEMP/W holder mål.

## 16 Konklusjon

På bakgrunn av resultatene presentert i denne masteroppgaven kan en trekke noen konklusjoner.

Ut fra testene kan en si at kombinasjonen av Masterseal og sprøytebetong er ikke veldig effektiv med tanke på beskyttelse mot frost. Selv med beskjedne temperaturer ble det målt negative temperaturer bak membranen. Når det gjelder vannsikringsegenskapene er disse som kjent ikke testet i fryselabben, og kan derfor ikke kommenteres her. Men hvis kombinasjonen av Masterseal og sprøytebetong forhindrer fritt vann i tunnelen vil det ikke bli noe problem med is i tunnelen. Et annet spørsmål i den sammenheng er om vann som fryser bakk vann- og frostsikringen kan ødelegge den eller berget på noen måte. Jernbaneverket må ta stilling til om det er tilfredsstillende at vannet fryser bak vann- og frostsikringen eller om de vil unngå det helt.

På mer generell basis kan en trekke noen konklusjoner med tanke på temperaturresponser i berg.

Resultatene fra fryselabben viser at det er godt samsvar mellom teorien for varmeutveksling i berg og resultatet av de fysiske testene. Dette gjør at en trygt kan bruke analytiske beregninger for å gjøre et raskt overslag over temperaturresponsen. Bergmasse er ingen homogen enhet, og variasjonene kan være store, selv innenfor et lite område. Da er det greit å kunne stole på enkle overslag.

Resultatene tyder også på at sprøytebetongen, Mastersealen og Støren-granitten oppfører seg likt innenfor det temperaturintervallet det er snakk om her. Dette gjør at erfaringene fra fryselabben, og senere også Gevingåsen jernbanetunnel, kan brukes i både andre steder i Norge og utlandet.

Ut fra de få testene som er kjørt så langt er det for tidlig å trekke en konklusjon på spørsmålet om frostmengde er et godt begrep på hvor mye et frostsikringskonsept tåler. Men kommende resultater fra fryselabben, og eventuelle målinger i Gevingåsen jernbanetunnel, kan bidra til å komme nærmere en konklusjon.

Når det gjelder varmeovergangstallet for luft til betong i Tunnelrommet viser beregninger og de numeriske beregningene at det er ca  $14,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Resultatene har også vist at det er mulig å bygge en frostlab til testing av vann- og frostsikringskonsepter, og at effektene av temperaturendringer kan dokumenteres. Dette er et viktig steg i retningen av bedre kunnskap og forståelse rundt dette temaet.

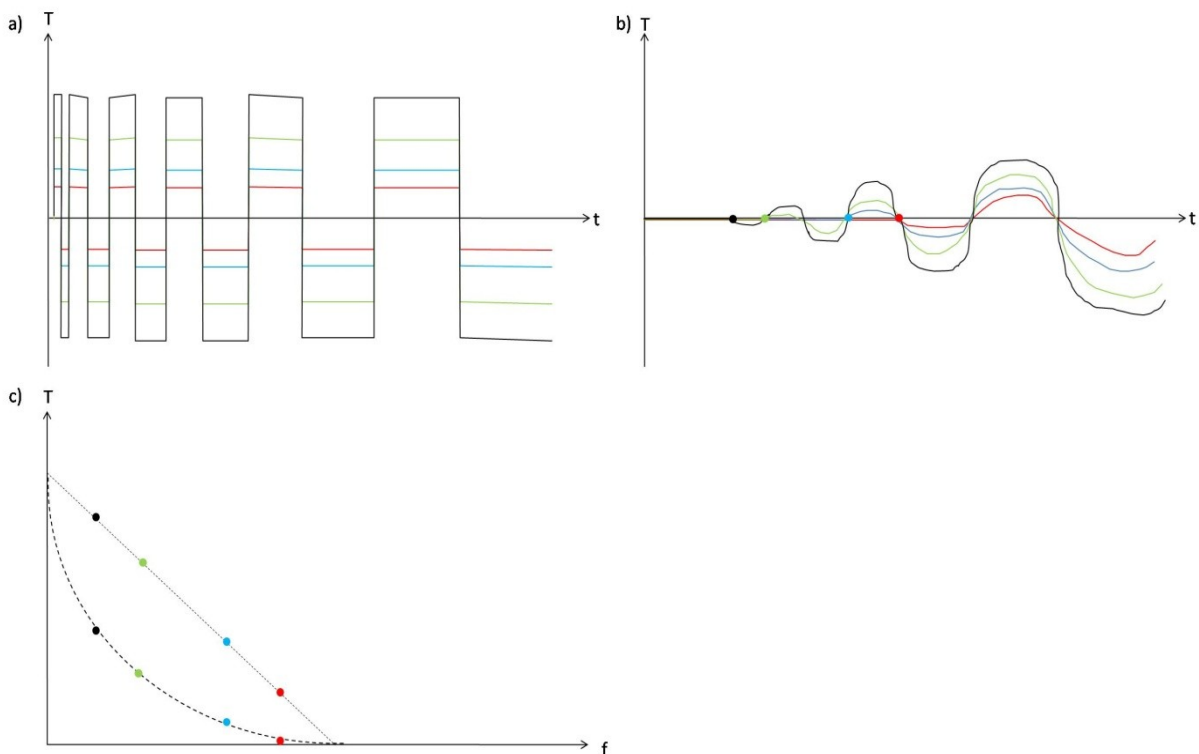
Sammenligningen av resultatene fra fryselabben og de beregnede resultatene i TEMP/W viser dessuten at det er mulig å lage gode modeller i TEMP/W. TEMP/W er et relativt enkelt program, både å lære og å bruke. Det tar heller ikke så lang tid å bygge modellen og å kjøre beregningene når en kjenner egenskapene til materialene. Det er derfor positivt at resultatene blir så gode. Det viser at det er et fornuftig verktøy til praktisk bruk da både er det er kvalitativt bra og kosteffektivt.

## 17 Videre arbeid

På grunna av tidsbegrensningen for denne masteroppgaven vil det ikke bli presentert flere konkrete planer for testing. Men nedenfor følger en beskrivelse av mulig videre arbeid.

Som diskutert tidligere er det en usikkerhet knyttet til både varmeovergangstallet i Tunnelrommet, og kanskje også Bergrommet, samt de termiske egenskapene til Støren-granitt. For å redusere denne usikkerheten bør det gjøres målinger av lufthastighet i både Tunnelrommet og Bergrommet, samt at Støren-granitten bør testes med tanke på termiske egenskaper.

Ved å studere klimastatistikk for et bestemt område kan en konstruere en test som går over litt lengre tid, og dermed få et litt bedre inntrykk av hvordan vann- og frostsikringen tåler temperaturendringer. Denne testen bør konstrueres slik at temperaturen er mest mulig lik en typisk vintermåned ved det aktuelle stedet, og hvor ofte temperaturen skal endres må sees i forhold til størrelsen på endringene. Disse testene kan kjøres i fryselabben, eller i TEMP/W. Hvis en velger å bruke TEMP/W kan en kjøre en beregning som går over flere år. Resultatene bør legges inn sammen med resultatene fra de testene som allerede er kjørt som vist i Figur 29. Flere tester, med både naturlige og unaturlige temperatursvingninger vil gi bedre grunnlag for å si om frostmengde er et godt mål på frostbestandigheten til et frostsikringskonsept.



**Figur 66: A) Økende amplitude og minkende frekvens. B) Eksempel på resultater innenfor membran. C) Mulige sammenhenger mellom frekvens og amplitude.**

For å få klarhet i hvilke temperatursvingninger som gir utslag bak vann- og frostsikringen kan en kjøre en test med fast amplitude og synkende frekvens. Deretter kan en kjøre flere tester med andre amplituder, men samme reduksjon i frekvens. Dette er illustrert i Figur 66a. Som kommentert tidligere må det være en naturlig sammenheng mellom frekvensen og amplituden for at en skal kunne definere en frostmengde et vann- og frostsikringskonsept skal tåle. Ved å kartlegge hvilke



amplituder og frekvenser som gir responser, se Figur 66b, kan en kanskje finne en sammenheng som en av de to mulighetene vist i Figur 66c. Hvis en finner en slik sammenheng vil det være lettere å konstruere temperaturendringer som gir realistiske responser fordi en vet mer om hvilke temperaturendringer som gir utslag.

Ettersom Masterseal og sprøytebetong er testet under så kontrollerte forhold som i fryselabben, hadde det vært ideelt om Gevingåsen ble instrumentert med temperaturmålere både på utsiden av og bak vann- og frostsikringen. Det er interessant å finne ut hvilke frostmengder det er snakk om innover i tunnelen, og temperaturen bak vann- og frostsikringen. Da kan en se om det er noen sammenheng mellom frostmengden utenfor vann- og frostsikringen og tiden det tar før frosten trenger gjennom vann- og frostsikringen. Disse resultatene kan så sammenlignes med de resultatene nevnt i et tidligere avsnitt. En detaljert plan for plassering av slike målere bør utarbeides før tunnelen eventuelt instrumenteres. Planen bør revideres hvis en eventuell plassering avviker fra den planlagte, slik at en kan finne igjen målerne.

## 18 Kilder

(u.d.). Hentet februar 2010 fra [www.sealtech.no](http://www.sealtech.no):

[http://www.sealtech.no/Customers/sealtech/documents/Membraner/Voltex/Produktdatablad\\_Voltex\\_DS\\_og\\_Voltex.pdf](http://www.sealtech.no/Customers/sealtech/documents/Membraner/Voltex/Produktdatablad_Voltex_DS_og_Voltex.pdf)

Andersland, O. B., & Ladanyi, B. (2003). *Frozen ground engineering, second edition*. John Wiley & Sons.

Aylward, G., & Findlay, T. (2001). *SI Chemical Data 5th edition*. John Wiley & Sons Australia.

Brandenberger, R., Holter, K., & Kothe, T. *Method statement MASTERSEAL®345*.

Broch, E., & Nilsen, B. (2001). *Ingeniørgeologi - Berg*. Institutt for geolog og bergteknikk, NTNU.

Byggforsk. (2006). *Håndbok 53 Trehus*. Norges Byggforskningsinstitutt.

Davidson, B. (2002). *Forelesningsnotater i instrumentering, Temperaturmålinger*. Høgskolen i Tromsø, avdeling for ingeniør- og økonomifag.

Følke, K. (pers.med. vår 2010). Bergingeniør SINTEF Byggforsk, infrastruktur.

Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer, sixth edition*. John Wiley & Sons.

Instones, A. (2005). Klimaendringer og konsekvenser for fundamentering og infrastruktur i kalde strøk. *Frost i jord 2005*, ss. 13-20.

Iversen, Edvard. (1997). *Intern rapport nr 1946 - Frostinntrengning i tunneler (Foreløpig sammendrag for 3 vintre)*. Veglaboratoriet, Vegdirektoratet, Statens Vegvesen.

Jernbaneverket. (2009). *Gevingåsen Jernbantunnel*.

Johansen, H. (pers.med. vår 2010). tekniker, SINTEF Energi, avd for energiprosesser.

Kittel, C., & Kroemer, H. (1980). *Thermal Physics, Second Edition*. W.H. Freeman and Company.

Krahn, J. (2004). *Thermal Modelling with TEMP/W, An Engineering Methodology*.

Kreyszig, E. (1999). *Advanced Engineering Mathematics 8th edition*. John Wiley & Sons.

Larsen, T. E. (pers. med. vår 2010). Senioringeniør SINTEF Byggforsk, Infrastruktur.

Ljungkrantz, C., Möller, G., & Petersons, N. (1994). *Betonghåndbok, utgåva 2*. Svensk Byggtjänst.

MacDonald, M. (2009). *Product evaluation of MASTERSEAL® 345*.

Marshak, S. (2005). *Earth, portrait of a planet, second edition*. W. W. Norton & Company, Inc.

Middtømme, K., Skarphagen, H., & Elvebakk, H. (2000). *NGU-rapport nr. 2000.091: Bruk av grunnvarme ved sentralsykehuset i Lørenskog - testboring, systemløsning og økonomiske bergninger*. NGU.

- Myrvang, A. (2001). *Bergmekanikk*. Institutt for geologi og bergteknikk, NTNU.
- Nilsen, B. (2001). *Numeriske analyser-Introduksjon. Forelesningsnotat i emne SIG0537 Ingeniørgeologi-Berg VK*.
- Nordal, R. S. (1998). *Frysedjup i vegkonstruksjonar, TBA 4217 Vegteknologi*. Institutt for veg- og jernbanebygging, NTNU.
- Nyberg, A. (2010, e-post 11. februar). Midt norsk sprøytebetong AS.
- Opstad, K., & Stensaas, J. (1998). *Håndbok i Branntekniske Analyser og -Beregninger*. SINTEF Bygg og Miljøteknikk - Norges branntekniske laboratorium.
- Pedersen, Knut Borge. (2002). *Intern rapport nr 2301 - Frostmengder i vegtunneler*. Vegteknisk avdeling, Vegdirektoratet, Statens Vegvesen.
- Prestvik, T. (2001). *Mineralogi, 2.utgave*. Vett og Viten A/S.
- Prestvik, T. (2001). *Petrologi og geokjemi*. Vett og Viten A/S.
- Sass, F., Bouché, C., & Leitner, A. (1963). *Dubbels Taschenbuch für den Maschinenbau 12*. Springer Verlag.
- Skistad, H. (pers med. vår 2010).
- Standard Norge. (2007). *NS-EN ISO 10456:2007 - Byggematerialer og -produkter. Hygrotermiske egenskaper, tabulerte dimensjonerende verdier og prosedyrer for bestemmelse av deklarererte og praktiske termiske verdier*. Standard Norge.
- Statens Vegvesen. (2006). *Håndbok 021 - Vegtunneler*. Statens Vegvesen.
- Statens Vegvesen. (2006). *Håndbok 163 - Vann- og frostsikring i tunneler*. Statens Vegvesen.
- Tipler, P. A., & Mosca, G. (2004). *Physics for scientists & engineers, extended version 5th edition*. W.H. Freeman & Company.
- Vassenden, F. (pers. med. høst 2009).
- Vassenden, S. (2009). *Prosjektoppgave - Frostinntrengning i norske vegtunneler*.
- www.met.no. (u.d.). *Norges meteorologiske institutt*. Hentet 22.10.2009 fra Klimastatistikk - Klimanormaler - Temperatur:  
<http://met.no/Klima/Klimastatistikk/Klimanormaler/?module=Articles;action=ArticleFolder.publicOpenFolder;ID=390>
- www.ngu.no. (u.d.). *Norges geologiske undersøkelse*. Hentet 26.10.2009 fra Georessurser - Bergvarme: <http://www.ngu.no/no/hm/Georessurser/Grunnvarme/Bergvarme/>

## Vedleggsliste

- Vedlegg A - Stegrespons i vann- og frostsikret berg
- Vedlegg B - Respons på steglast i et endelig medium
- Vedlegg C - Respons på sinussvingning i vann- og frostsikret berg
- Vedlegg D - Resymé av testteamets arbeid
- Vedlegg E - Beregning av temperaturvariasjoner for test i TEMP/W
- Vedlegg F - Resultater fra F-1
- Vedlegg G - Resultater fra F-2
- Vedlegg H - Resultater fra F-3
- Vedlegg I - Standardinnstillinger i TEMP/W
- Vedlegg J- Temperaturer til tester i TEMP/W
- Vedlegg K - Dimensjonsløse resultater for negativ steglast
- Vedlegg L - Dimensjonsløse resultater for positiv steglast

## Vedlegg A - Stegrespons i vann- og frostsikret berg

Dersom berget er beskyttet med frostsikring, vil responsen på en gitt steglaster, være annerledes enn når det er frostsikret. For å beregne denne responsen, kan en ta utgangspunkt i strøm og regler for den.

For strøm gjelder Ohms lov, som sier at spenningen i en krets er lik produktet av motstanden og strømmen i kretsen ( $U=R*I$ ). Dersom flere resistenser er koblet i serie vil den samlede motstanden være lik summen av de enkelte motstandene ( $R_{total}=R_1 +R_2$ ), og strømmen blir da den totale spenningen delt på den totale motstanden ( $I=U_{total}/ R_{total}$ ). Spenningen over én av motstandene i serien ( $R_1$ ) er gitt ved produktet av den ene motstanden og strømmen ( $U_{R1} = R_1 * I$ ). Hvis en overfører dette til varmestrøm i berg, kan en tenke at varmestrømmen tilsvarer strømmen, temperaturgradienten tilsvarer spenningen og varmeledningsevnen tilsvarer motstanden. Frostsikret berg kan sees på som to resistanser i serie, der frostsikringen har en større motstand mot varmestrøm enn berget. De deler strømmen, men får hver sin spenning. Ved å utnytte denne likheten, kan Ohms lov brukes til å beregne responsen av en steglaster på frostsikret berg (Byggforsk, 2006).

Motstanden mot varmegjennomgang i et materiale er gitt ved tykkelsen av laget delt på varmeledningsevnen,  $R=d/\lambda$ . Fordi tykkelsen av en gitt frostsikring er konstant, vil også motstanden være konstant. For berget vil motstanden øke etter hvert som frosten trenger lenger inn. Samtidig vil temperaturgradienten,  $dT/dx$ , bli mindre. Formelen for respons av steglaster, formel ( A.1), viser at avstanden frosten forflytter seg avhenger av  $\sqrt{4\alpha t}$ . Motstanden mot varmegjennomgang i berget er derfor gitt ved  $\sqrt{4\alpha t}/\lambda_{berg}$ . Med utgangspunkt i dette kan temperaturgradienten gjennom isolasjonen bestemmes. Nedenfor følger utledningen for hvordan en finner temperaturgradienten gjennom isolasjonslaget.

$$T(x, t) = [T_{T1=0^{\circ}C}(x, t) + \Delta T_{0^{\circ}C}] = \Delta T_0 * \left[ 1 - \operatorname{Erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4\alpha t}}\right) \right] + \Delta T_{0^{\circ}C} \quad (\text{A.1})$$

$$\Delta T_{total}(x, t) = \Delta T_{iso} + \Delta T_{berg} = T_{tunnelluft} - T_{berg} = \Delta T_0$$

$$R_{total} = R_{iso} + R_{berg} = \frac{d_{iso}}{\lambda_{iso}} + \frac{d_{berg}}{\lambda_{berg}} = \frac{d_{iso}}{\lambda_{iso}} + \frac{\sqrt{4\alpha t}}{\lambda_{berg}}$$

$$\Delta T_{iso} = \frac{\Delta T_{total}}{R_{total}} * R_{iso} = \frac{\Delta T_0 * \frac{d_{iso}}{\lambda_{iso}}}{\frac{d_{iso}}{\lambda_{iso}} + \frac{\sqrt{4\alpha t}}{\lambda_{berg}}}$$

Temperaturen i overgangen mellom isolasjon og berg,  $T_{iso/berg}$ , vil da være gitt ved formel ( A.2).

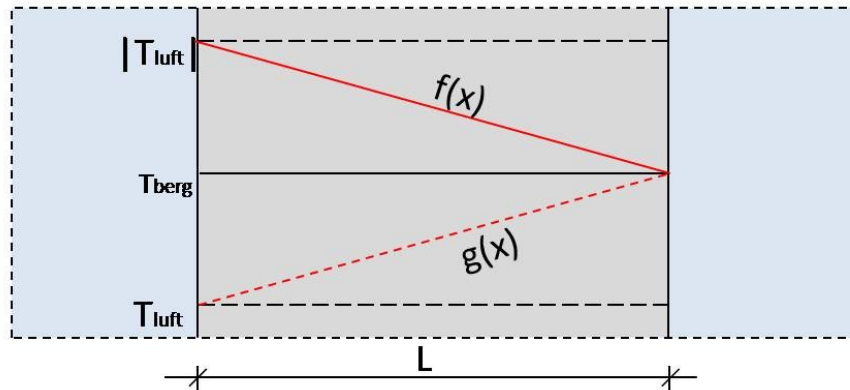
$$T_{iso/berg} = T_{tunnelluft} - \Delta T_{iso} \quad (\text{A.2})$$

Temperaturene funnet med Formel ( A.2) brukes så som utgangspunkt for formel ( A.1). Dette gir stegresponsen for berg som er vann- og frostsikret (Vassenden F. , pers. med. høst 2009).

## Vedlegg B - Respons på stegløst i et endelig medium

En generell løsning på varmeledning ligningen ( 4.4) er gitt i Formel ( B.1). Situasjonen med et endelig medium med konstante temperaturer på begge sider er vist i Figur B-1.  $g(x)$  er løsningen på Formel ( B.3) når  $t \rightarrow \infty$ . Hvis den løsningen legges sammen med  $f(x)$ , får en den endelige løsningen.

$$F(x) = A \cos px + B \sin px \quad p = \frac{n\pi}{L} \quad (\text{B.1})$$



Figur B-1: Situasjon med et endelig medium med konstante temperaturer på begge sider.

Med den gitte situasjonen er det løsninger der  $T=0$  for  $x=0$  og  $x=L$  en er ute etter. Det er derfor bare sinusleddet i Formel ( B.1) som er av interesse, da cosinusløsningen vil være lik 0. Løsningen av varmeledning ligningen ( 4.4) vil være en Fourier-rekke, der de enkelte leddene er gitt ved Formel ( B.2), og den endelige løsningen er gitt ved Formel ( B.3). Formelen for  $B_n$  er gitt i Formel ( B.4) (Kreyszig, 1999).  $f(x)$  og  $g(x)$  er gitt ved Formel ( B.5) og ( B.6).

$$k = \frac{\sqrt{\alpha} * n\pi}{L} \quad (\text{B.2})$$

$$u_n(x, t) = B_n \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) * e^{-k_n^2 t}$$

$$\alpha^2 = \frac{\lambda}{c}$$

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin\frac{n\pi x}{L} * e^{-\frac{\alpha(n\pi)^2}{L^2} t} \quad (\text{B.3})$$

$$B_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \sin\frac{n\pi x}{L} dx \quad (\text{B.4})$$

$$f(x) = Cx + D = \frac{T_{berg} - |T_{luft}|}{L} x + |T_{luft}| \quad (\text{B.5})$$

$$g(x) = \frac{T_{berg} - T_{luft}}{L} x + T_{luft} \quad (\text{B.6})$$

Ved å sette Formel ( B.5)inn i Formel ( B.4), og sette  $L=n\pi$ ,  $v=n\pi x/L$  og  $x=vL/n\pi$ , blir utledningen som vist under, og det endelige resultatet er vist i Formel ( B.7) .

$$B_n = \frac{2}{L} \frac{L}{n\pi} \int_0^{n\pi} \frac{CL}{n\pi} u \sin u + D \sin u \, du$$

$$B_n = \frac{2CL}{(n\pi)^2} [\sin u - u \cos u]_0^{n\pi} + \frac{2}{n\pi} [-D \cos u]_0^{n\pi}$$

$$B_n = \frac{2CL}{(n\pi)^2} n\pi (-1) \begin{cases} -1 & n = 1,3,5 \dots \\ +1 & n = 0,2,4 \dots \end{cases} + \frac{-2D}{n\pi} \begin{cases} -2 & n = 1,3,5 \dots \\ 0 & n = 0,2,4 \dots \end{cases}$$

$$B_n = \frac{2CL}{n\pi} [(-1)^n] - \frac{2D}{n\pi} [(-1)^n - 1] \quad (\text{B.7})$$

Deretter settes Formel ( B.7) inn i Formel ( B.3) og Formel ( B.6) legges til. C og D er som vist i Formel ( B.5). Løsningen er gitt i Formel ( B.8).

$$u(x, t) = \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{2 \left( \frac{T_{berg} - |T_{luft}|}{L} \right) L}{n\pi} [(-1)^n] - \frac{2|T_{luft}|}{n\pi} [(-1)^n - 1] \right) \sin \frac{n\pi x}{L} e^{-\frac{\alpha(n\pi)^2}{L^2} t} \right] + \left[ \frac{T_{berg} - T_{luft}}{L} x + T_{luft} \right] \quad (\text{B.8})$$

## Vedlegg C - Respons på sinussvingning i vann- og frostsikret berg

Dersom berget er beskyttet med frostsikring, vil responsen på en gitt stegløst, være annerledes enn når det er frostsikret. Temperaturforløpet gjennom kun vann- og frostsikring vil ha samme form som for kun berg, men siden motstanden mot varmestrøm er større i vann- og frostsikringen enn den er i berget vil temperatursvingningene dempes raskere. Dette gjør at temperaturen raskere går mot middeltemperaturen i kun vann- og frostsikring enn den gjør i berg. Dersom berget beskyttes med vann- og frostsikring, vil den dempe temperatursvingningene før de går inn i berget. Dette medfører at temperaturforholdene i berget rett innenfor frostsikringen er de samme som ved et *større* dyp i uisolert berg.

Formel ( C.1) viser løsningen for denne situasjonen.  $X_0$  er faseforskjellen mellom de to bølgene, og avhenger av diffusiviteten. Merk at det er ulike diffusivitetsverdier i de to tilfellene. Figur C-1 viser noen størrelser benyttet i Formel ( C.1).

$$T(x_{tot}, t) = T_m + A * e^{-x * \sqrt{\frac{\pi}{\alpha_{iso} * p}}} * \sin\left(\frac{2\pi}{p} * \sqrt{\frac{\alpha_{iso} * p}{\pi}} * t - x\right)$$

$$[0 < x_{tot} \leq d_{iso}]$$

$$T(x_{tot}, t) = T_m + A * e^{-(z+x_0) * \sqrt{\frac{\pi}{\alpha_{iso} * p}}} * \sin\left(\frac{2\pi}{p} * \sqrt{\frac{\alpha_{iso} * p}{\pi}} * t - (z + x_0)\right)$$

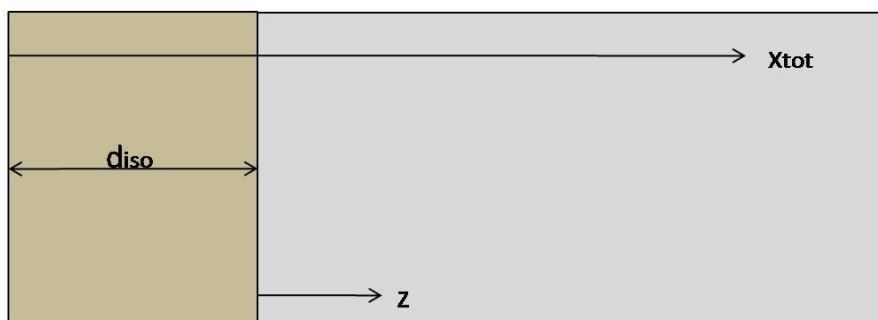
( C.1)

$$[x_{tot} \geq d_{iso}]$$

$$[z \geq 0]$$

$$x_0 = d_{iso} * \sqrt{\frac{\alpha_{berg}}{\alpha_{iso}}}$$

$$x_{tot} = z + d_{iso}$$



Figur C-1: Størrelser benyttet i Formel ( C.1).



## Vedlegg D - Resymé av testteamets arbeid

For å minimere sjansene for feil og mangler ved testresultatene, og dermed også misbruk av tid, hadde hele testteamet en grundig gjennomgang av hele fryselabben før testene ble planlagt. Byggeprosedyren, montering og egenskapene til temperaturmålerne og fryse- og kjøleaggregater ble kontrollert og evaluert. Alle frister og verdier med tanke på herdetid ble dobbelsjekket.

Etter at fryselabben var klarert for testing, begynte prosessen med å bestemme hvordan testene skulle kjøres. Utgangspunktet før oppstart av testingen var at JBV må ta et endelig valg av konsept for vann- og frostsikring il løpet av våren 2010 og at BASF er interessert å teste Masterseal med tanke på vanntrykk så fort som mulig. Begge parter ønsker derfor at testingen med tanke på frostbestandighet ikke skal ta for lang tid.

Etter en diskusjon omkring utgangstemperaturen i bergmassen og fornuftige størrelser på steglaster, ble de to første testene bestemt. Det ble også bestemt at resultatene skulle evalueres fortløpende, og at erfaringene fra de to første testene skulle avgjøre den videre testingen.

Den første testen ble en innkjøringstest, både for utstyr og mannskap. Gjennomgang av resultatene viste behov for bedre målinger av lufttemperaturen i Bergrommet og Tunnelrommet. Dette ble tatt opp med Anders Storler, og fikset umiddelbart. En gjennomgangs av resultatene etter at temperaturen var stilt tilbake til utgangstemperaturen viste en uregelmessighet i temperaturforløpet, og det startet en diskusjon rundt utlufting av Tunnelrommet i forbindelse med reversering av forsøkene. Det ble da bestemt at døren til Tunnelrommet skal holdes lukket under hele forsøket. Resultatene viste også ujevne temperatur i både Tunnelrommet og Bergrommet på grunn avstartproblemer med fryseaggregatet. Det ble derfor bestemt at det første forsøket skulle kjøres på nytt.

Etter to vellykkede tester var det på tide å bestemme neste test. En kontrollenhet for kjøring av sinusvariasjoner er tilgjengelig på markedet, men den er dyr. Spørsmålet var derfor om sinussvingninger kan erstattes av steglaster, der temperaturen kun stilles to ganger i døgnet. Testteamet ble enige om å kjøre en numerisk beregning av både sinussvingninger og steglaster i TEMP/W før den endelige avgjørelsen ble tatt. Resultatene fra de numeriske beregningene viste at det var liten forskjell mellom de to temperaturvariasjonene, og det var enighet i teamet om at første test blir med steglaster.

I avtalen mellom JBV og SINTEF står det at SINTEF gjør forsøkene for JBV, men at resultatene kan gjøres allment kjent. Som et ledd i å gjøre fryselabben bedre kjent og skape litt oppmerksomhet rundt temaet, holdt undertegnede en presentasjon av prosjektet på markeringen av 25-års jubileumet for SINTEFs fagmiljø for geologi og bergteknikk i midten av mars.

I midten av april ble det bestemt at materialene i fryselabben skal testes med tanke på varmeledningsevne. I samarbeid med Helge Johansen, SINTEF, og Karl-Gunnar Holter, BASF, ble det satt opp en prioritert testplan. Resultatene fra disse testene vil gi et endra bedre utgangspunkt for den numeriske modellen i TEMP/W.

Etter at testen med gjentatte steglaster var gjennomført begynte diskusjonen omkring neste test. På dette tidspunktet var modellen i TEMP/W så optimalisert som mulig med de kjente opplysningene, og en eventuell ny test må enten gi svar som kan optimalisere modellen enda mer, eller resultater

som er verdifulle i seg selv. Etter en diskusjon med Brede Nerموen og en student som har sett på klimadata for Hell og Hommelvik, ble det foreslått at neste test skal vare i fire uker, og følge temperaturvariasjonene i en gjennomsnittlig februar måned. Før testen begynner, skal temperaturen fryselabben senkes til en temperatur lik gjennomsnittstemperaturen for en typisk januar måned. Anders Storler har optimalisert styringssystemet for temperaturen i Tunnelrommet slik at temperaturen kan styres som ønsket. En slik test vil gi mer svar på hvordan vann- og frostsikringen reagerer på svigninger.

## Vedlegg E - Beregning av temperaturvariasjoner for test i TEMP/W

Tabell E-1 viser bakgrunnsdata for beregning av stegløst og sinusvariasjon for beregninger i TEMP/W. Formelen for sinussvingninger er vist i Formel ( E.1)

Tabell E-1: Bakgrunnsdata for beregning av stegløst og sinusvariasjon i TEMP/W.

Bakgrunn for temperaturvariasjoner til testing	
Total frostmengde	6000 t°C
Døgn med frost	125 døgn = 3000 t
Gjennomsnittstemperatur	-2 °C
Periode (P)	24 t
Frostmengde (F) pr periode	- 48 t°C

$$f(x) = A * \sin(Bx + C) + D \quad (\text{E.1})$$

Hvor:

A = Utslag fra likevektslinja

B = Sirkelfrekvens =  $2 * \pi / \text{Perioden}$

C = Faseforskyvning

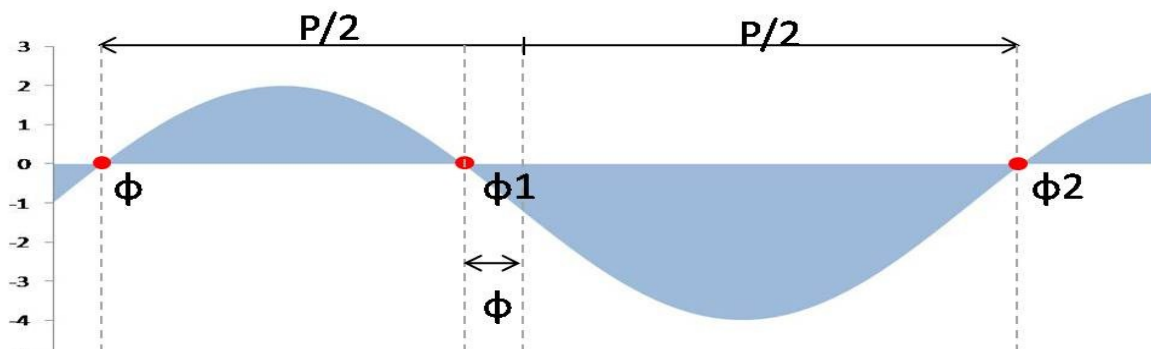
D = Middelvei

Som vist i kapittel 4.1 er frostmengden i løpet av en periode lik arealet av grafen under 0-linja. For en sinussvingning med middeltemperatur forskjellig fra 0 °C er det derfor nødvendig å finne verdiene av x da Formel ( E.1) er lik 0,  $\phi_n$ . Formelen for dette er vist i Formel ( E.2). Figur E-1 viser definisjonene av  $\phi$ .

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{-D}{A}\right) * \frac{1}{B} \quad (\text{E.2})$$

$$\varphi_1 = \frac{P}{2} - \varphi$$

$$\varphi_2 = P + \varphi$$



Figur E-1: Definisjon av nullpunktene  $\phi$ ,  $\phi_1$  og  $\phi_2$ .

Formelen for frostmengden blir da som vist i Formel ( E.3).

$$F = \int_{\phi_1}^{\phi_2} A \sin(Bx + C) + D dx = \left[ \frac{-A}{B} \cos(Bx) + Dx \right]_{\phi_1}^{\phi_2} \quad (\text{E.3})$$

Ved å sette Formel ( E.2) inn i Formel ( E.3), sette den lik den gitte frostmengden fra Tabell E-1, og løse ligningen med hensyn på A, finner en det riktige utslaget. Tabell E-2 viser resultatet av beregningen av gjort ved hjelp av målsøkingsfunksjonen i excel. Konstantene B, C og D og perioden må bestemmes på forhånd, resten er skrevet inn som formler.

Tabell E-2: Beregning av amplitude for sinusvariasjonen.

Beregning av amplitude for sinusvariasjonen:												
Konstanter					f(x)=0			[-A*1/B*cos(Bx)]		[Dx]		
A	B = 2π/P	C	D = gj.snitt T	P [t]	Φ	Φ 1	Φ 2	φ 2	φ 1	φ 2	φ 1	F
2,0	0,261	0	-2	24	5,824	6,175	29,82	-0,35	0,35	-59,64	-12,35	-48

Sinussvingningen uten faseforskyvningen er vist i Figur E-2a. Ved å legge inn en faseforskyvning lik  $\phi$  som er  $\frac{1}{4}$  av perioden, altså  $2\pi/4$ , blir sinussvingningen som vist i Figur E-2b. For testing i fryselabben er den mer hensiktsmessig å bruke i og med at temperaturen allerede er på vei ned når sinussvingningen begynner.

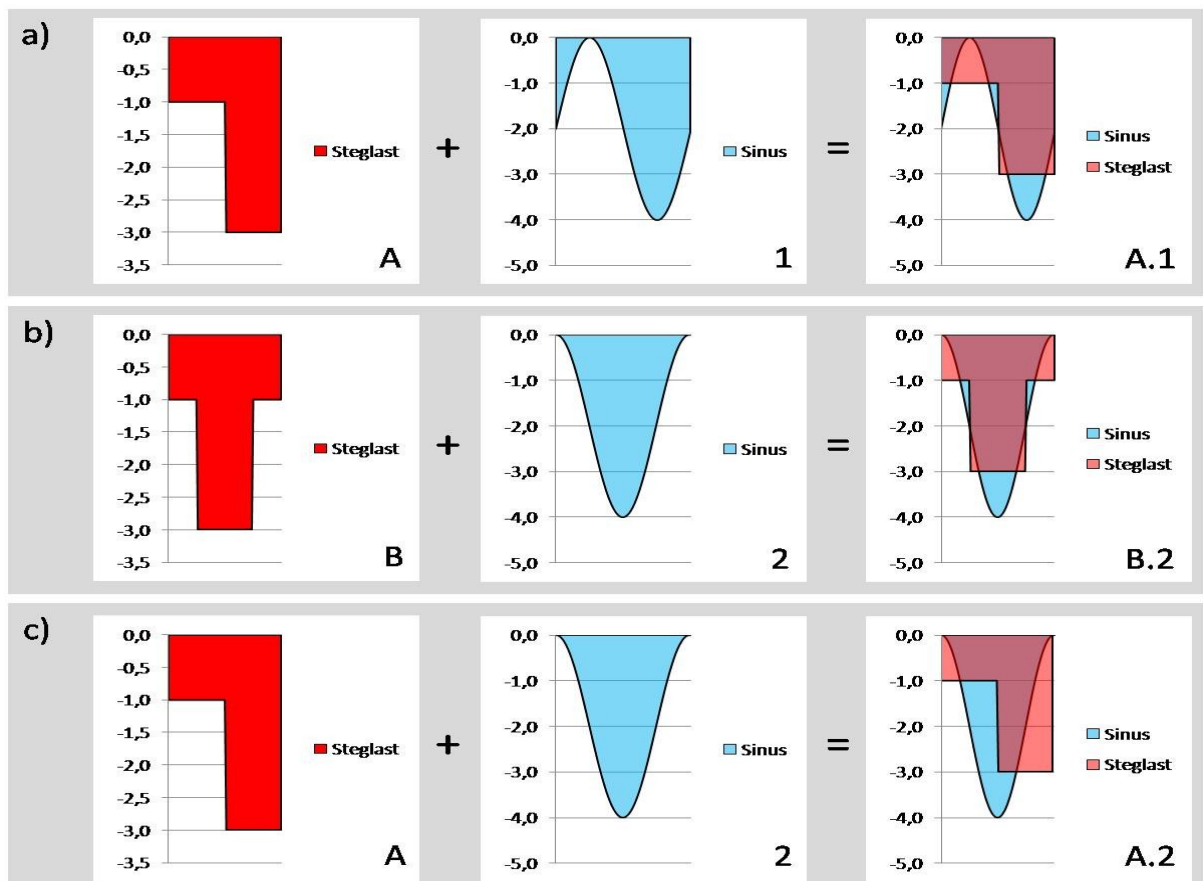
Arealet under en sinuskurve er lik  $(A/2 \pm \text{Middelverdien}) \cdot \text{tiden}$ . Den enkleste steglaster som gir samme frostmengde som sinussvingningen beskrevet ovenfor er en konstant steglaster på  $-2^\circ\text{C}$ , som er middelverdien i sinussvingningen. Men for at steglaster skal ligne mest mulig på sinussvingningen, må steglaster endres i løpet av døgnet. Steglasterkombinasjonen som best passer sammen med den faseforskjøvede sinussvingningen består av to perioder på 6t med  $-1^\circ\text{C}$  og én periode på 12 t med  $-3^\circ\text{C}$ . Dette er vist i Figur E-2b. For å forenkle styringen av steglaster litt, er det mer hensiktsmessig å brukes en steglasterkombinasjon som er tilpasset sinussvingningen som ikke er faseforskjøvet. Det innebærer 2 perioder på 12t med henholdsvis  $-1^\circ\text{C}$  og  $-3^\circ\text{C}$ . Dette er vist i Figur E-2a.

Den steglaster og sinussvingningen som er hensiktsmessig å bruke i fryselabben er vist i Figur E-2c. Formlene er vist i Formel ( E.4) og Formel ( E.5)

$$f(x) = 2 \sin\left(\frac{2\pi}{12}x + \frac{\pi}{2}\right) - 2 \quad x \in [0,24] \quad (\text{E.4})$$

$$f(x) = -1 \quad x \in [0,12] \quad (\text{E.5})$$

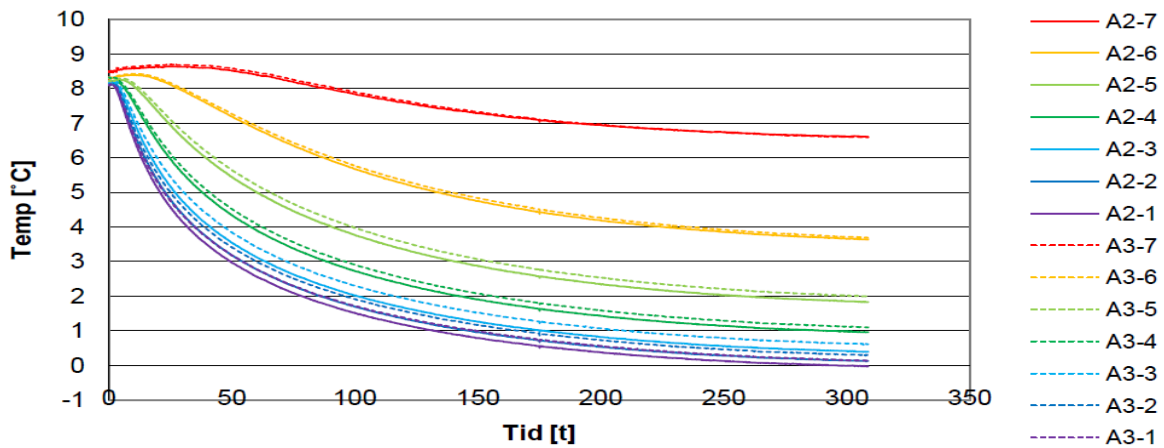
$$f(x) = -3 \quad x \in [12,24]$$



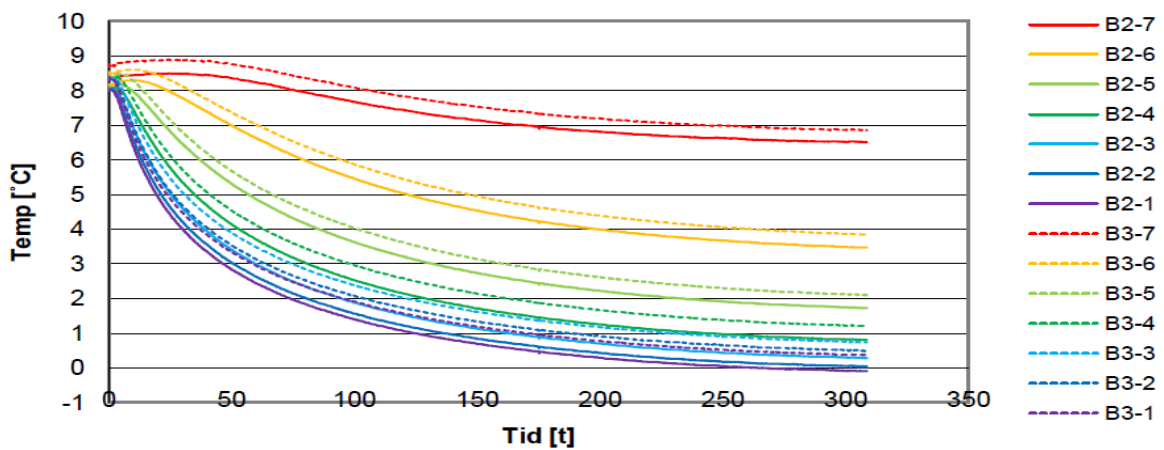
Figur E-2: Ulike kombinasjoner av steglaster og sinusvariasjon som tilfredsstiller kravet til frostmengde. Perioden er 24 timer. Endelig valg ble kombinasjonen A.2.

## Vedlegg F - Resultater fra F-1

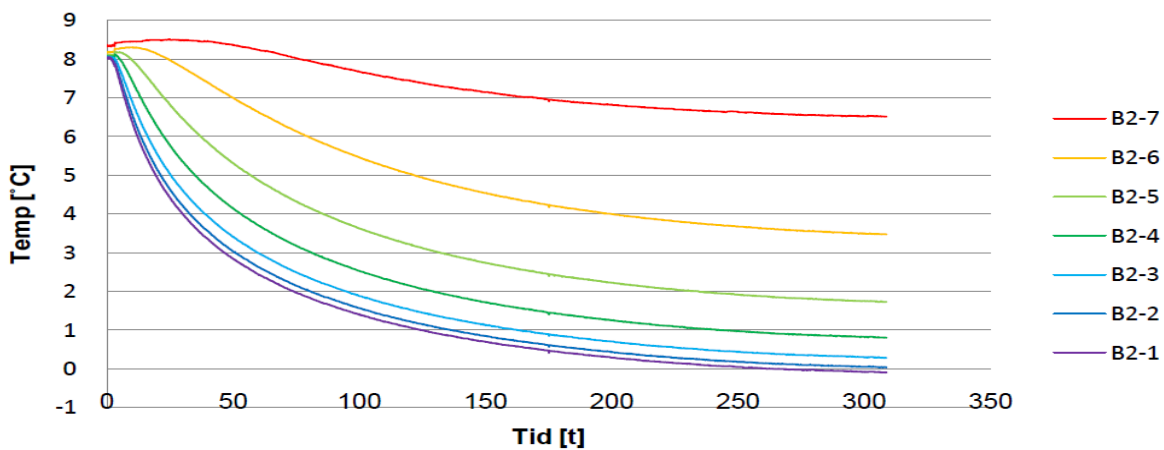
Nedenfor følger resultatene for blokkene A-2, A-3, B-2 og B-3 fra forsøket F-1, der steglasten var på  $-13^{\circ}\text{C}$ .



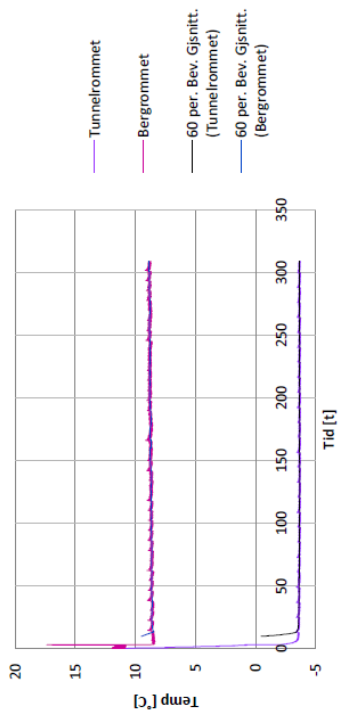
Figur F-1: Temperatur i A2 og A3 blokkene under F-1.



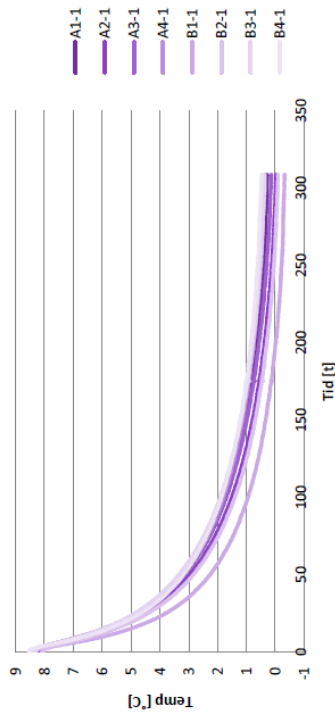
Figur F-2: Temperatur i B2 og B3 blokkene under F-1.



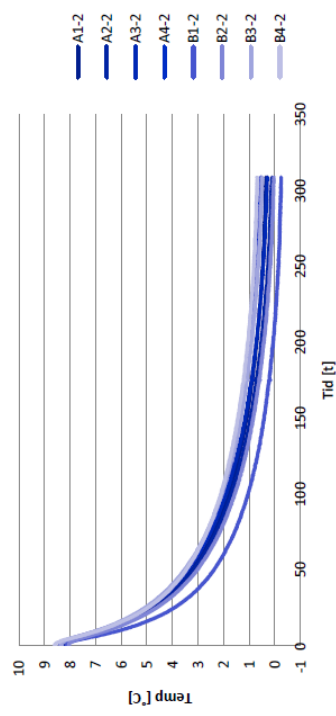
Figur F-3: Temperatur i B2 blokken under F-1.



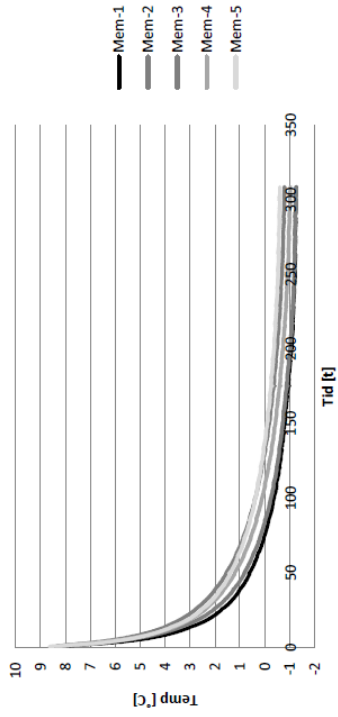
Figur F-7: Temperatur i Tunnelrommet og Bergrommet under F-1.



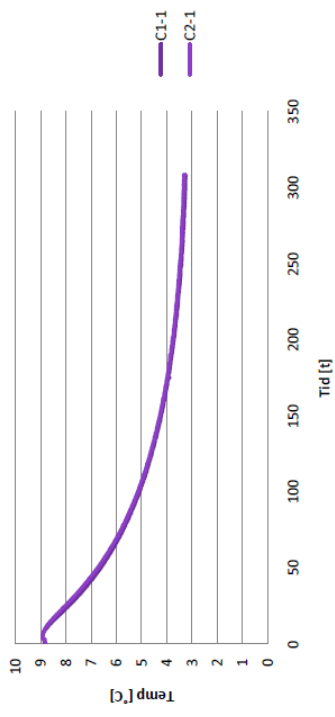
Figur F-8: Målt temperatur 2 cm inn i Støren-granitten under F-1.



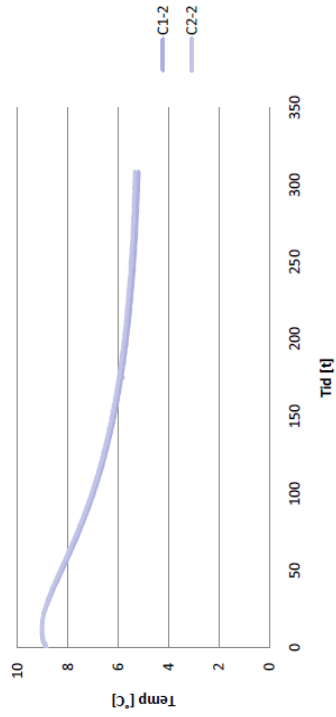
Figur F-9: Målt temperatur 4 cm inn i Støren-granitten under F-1.



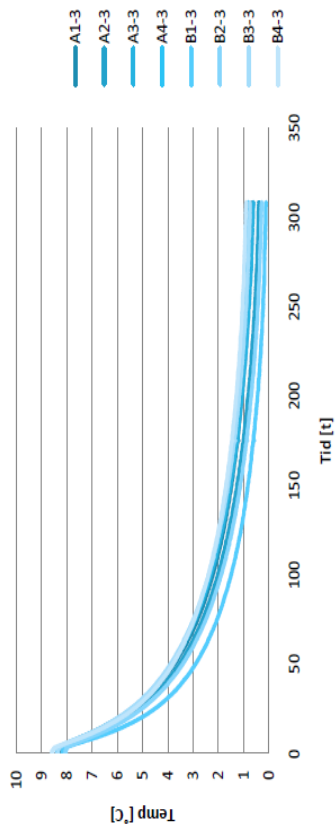
Figur F-4: Målt temperatur innenfor Mastersealen under F-1.



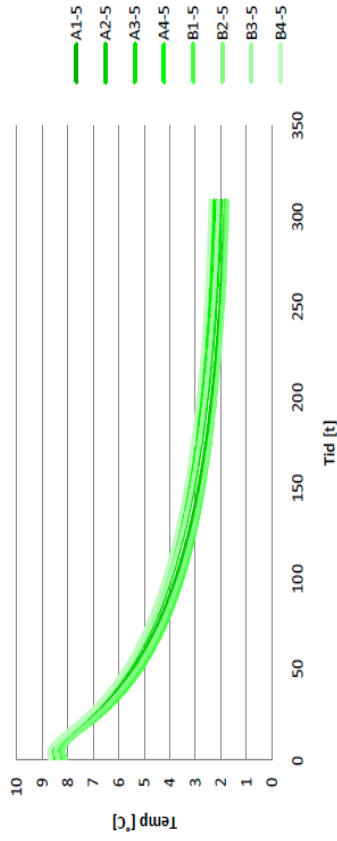
Figur F-5: Målt temperatur 40 cm inn i Støren-granitten i C2 og C3 under F-1.



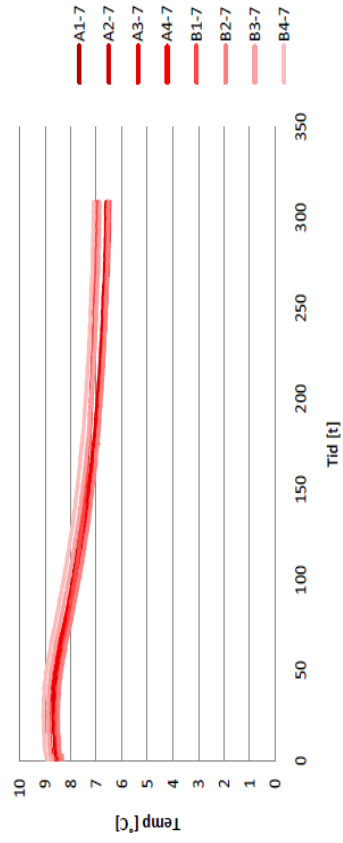
Figur F-6: Målt temperatur 80 cm inn i Støren-granitten i C2 og C3 under F-1.



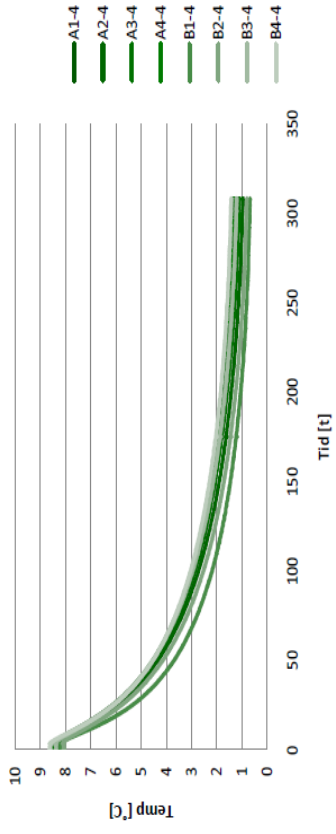
Figur F-12: Målt temperatur 8 cm inn i Støren-granitten under F-1.



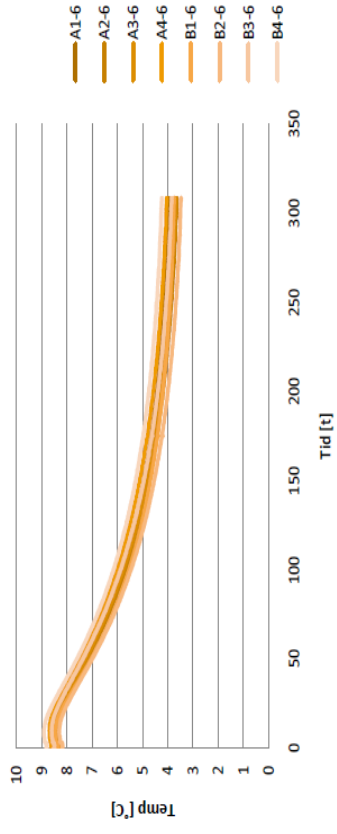
Figur F-13: Målt temperatur 32 cm inn i Støren-granitten under F-1.



Figur F-14: Målt temperatur 128 cm inn i Støren-granitten under F-1.



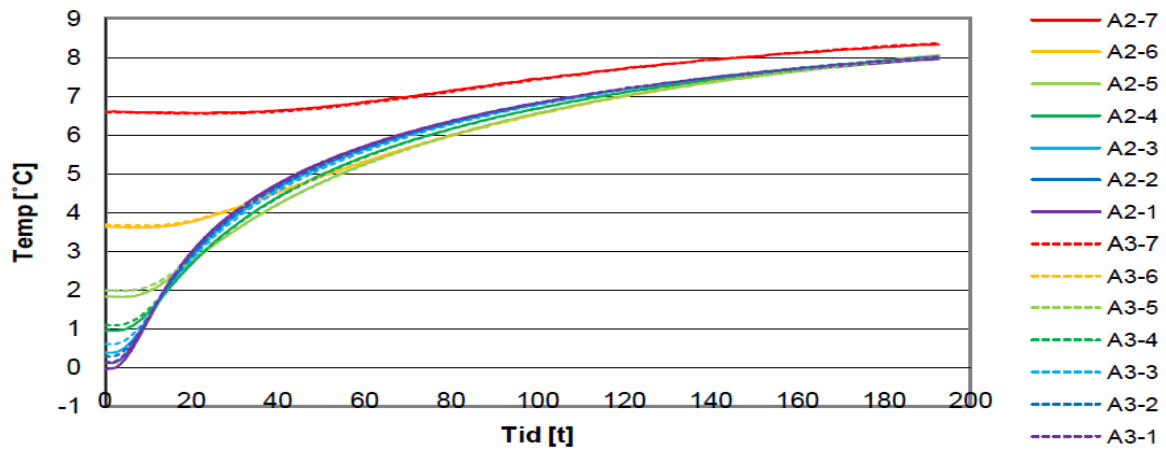
Figur F-10: Målt temperatur 16 cm inn i Støren-granitten under F-1.



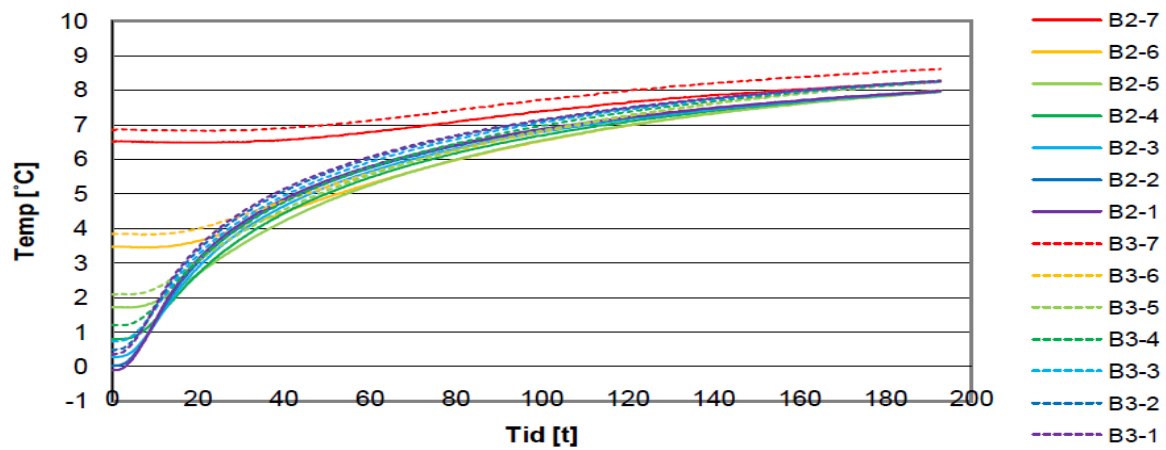
Figur F-11: Målt temperatur 64 cm inn i Støren-granitten under F-1.



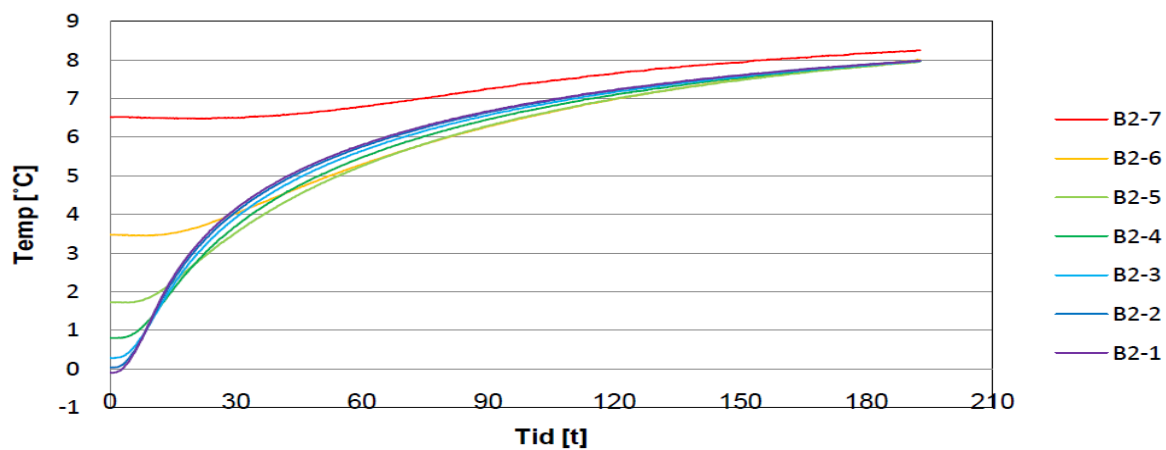
Nedenfor følger resultatene for blokkene A-2, A.3, B-2 og B-3 fra returen av forsøket F-1, der steglasten var på  $-13^{\circ}\text{C}$ .



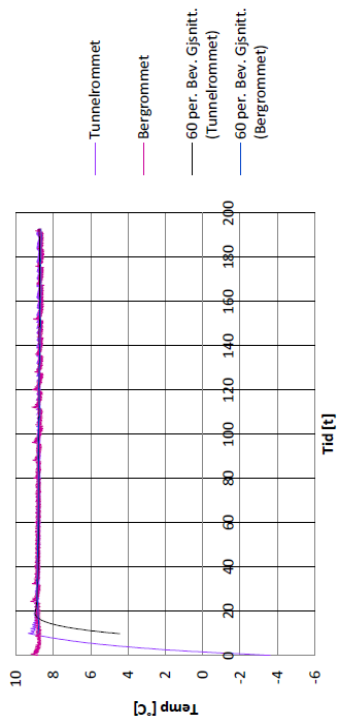
Figur F-15: Temperatur i A2 og A3 blokkene under retur av F-1 forsøket.



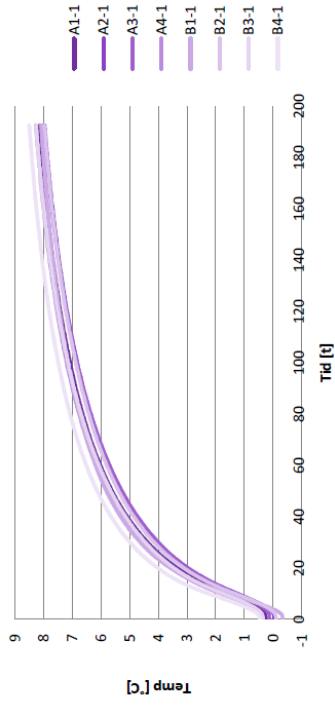
Figur F-16: Temperatur i B2 og B3 blokkene under retur av F-1 forsøket.



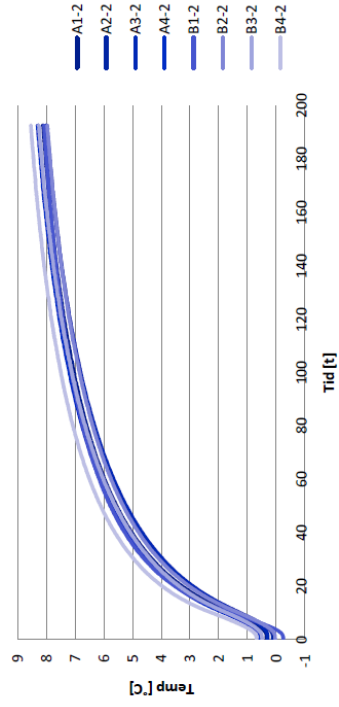
Figur F-17: Temperatur i B2 blokken under retur av F-1 forsøket.



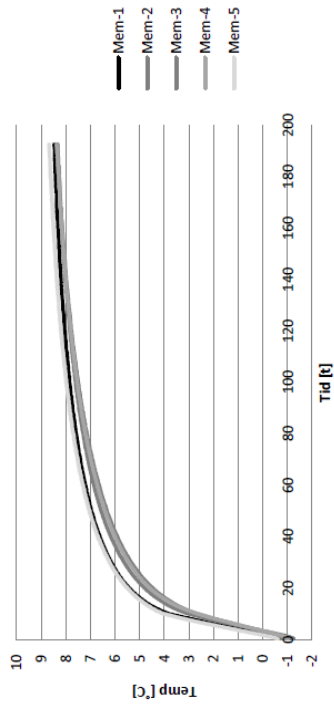
Figur F-21: Temperatur i Tunnelrommet og Bergrommet under retur av F-1.



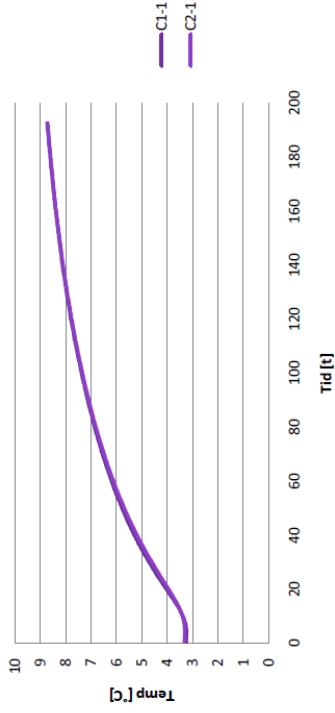
Figur F-22: Målt temperatur 2 cm inn i Støren-granitten under retur av F-1.



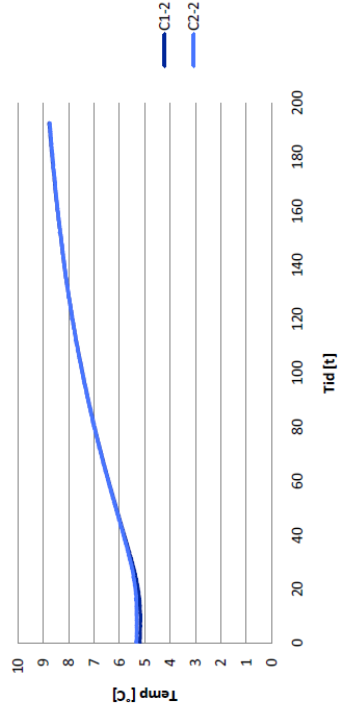
Figur F-23: Målt temperatur 4 cm inn i Støren-granitten under retur av F-1.



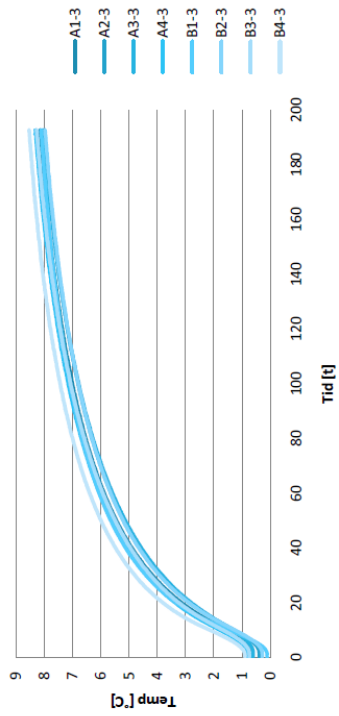
Figur F-18: Målt temperatur innenfor Mastersealen under retur av F-1.



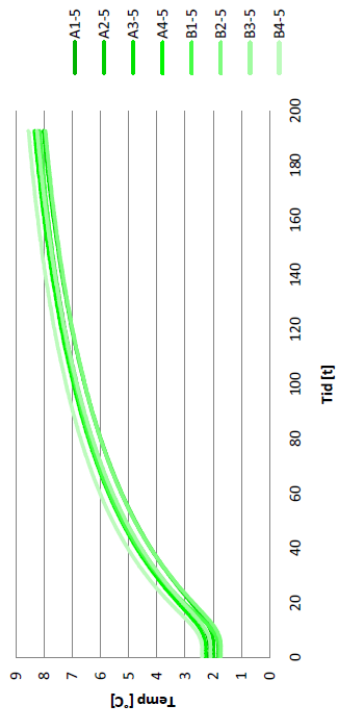
Figur F-19: Målt temperatur 40 cm inn i Støren-granitten i C2 og C3 under retur av F-1.



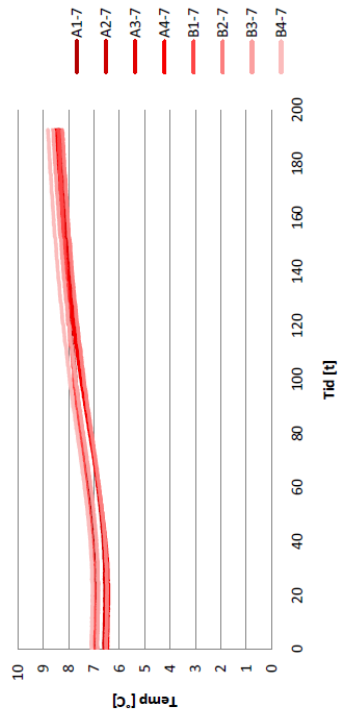
Figur F-20: Målt temperatur 80 cm inn i Støren-granitten i C2 og C3 under retur av F-1.



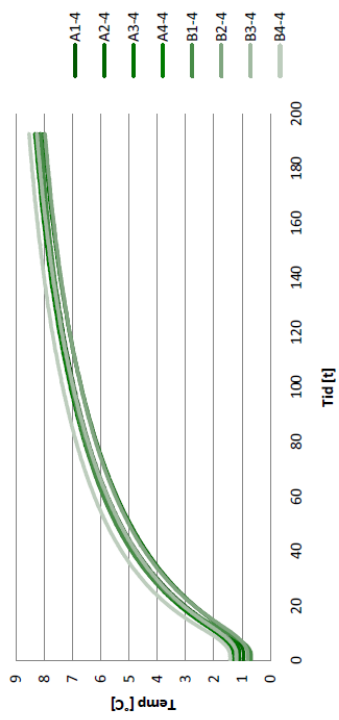
Figur F-26: Målt temperatur 8 cm inn i Støren-granitten under retur av F-1.



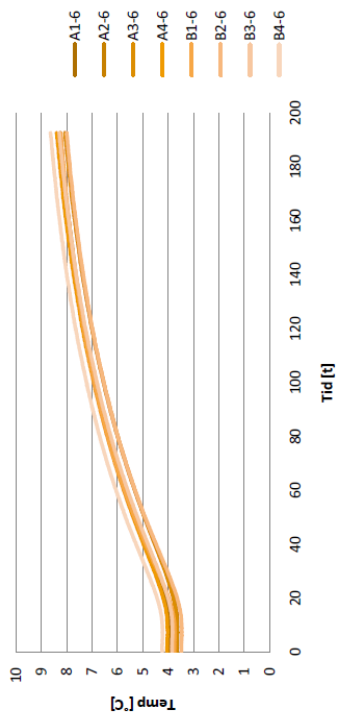
Figur F-27: Målt temperatur 32 cm inn i Støren-granitten under retur av F-1.



Figur F-28: Målt temperatur 128 cm inn i Støren-granitten under retur av F-1.



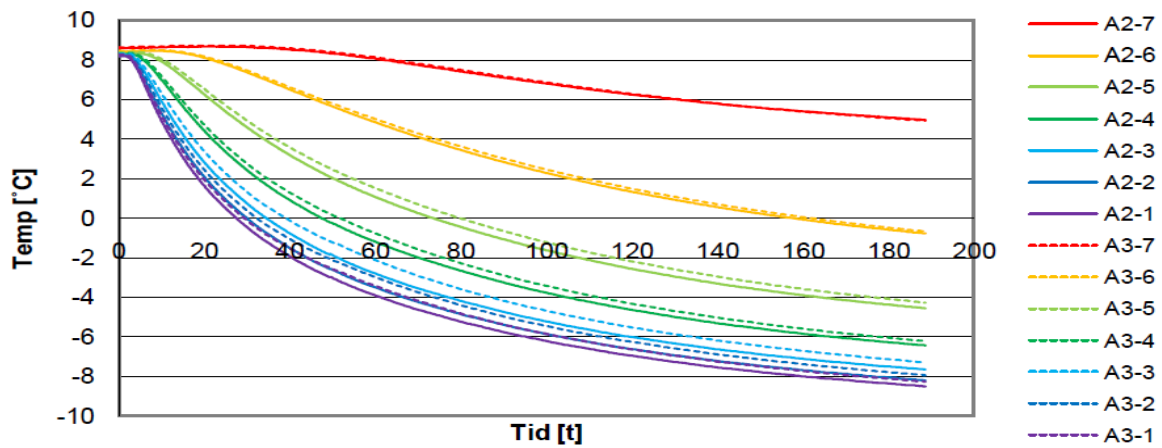
Figur F-24: Målt temperatur 16 cm inn i Støren-granitten under retur av F-1.



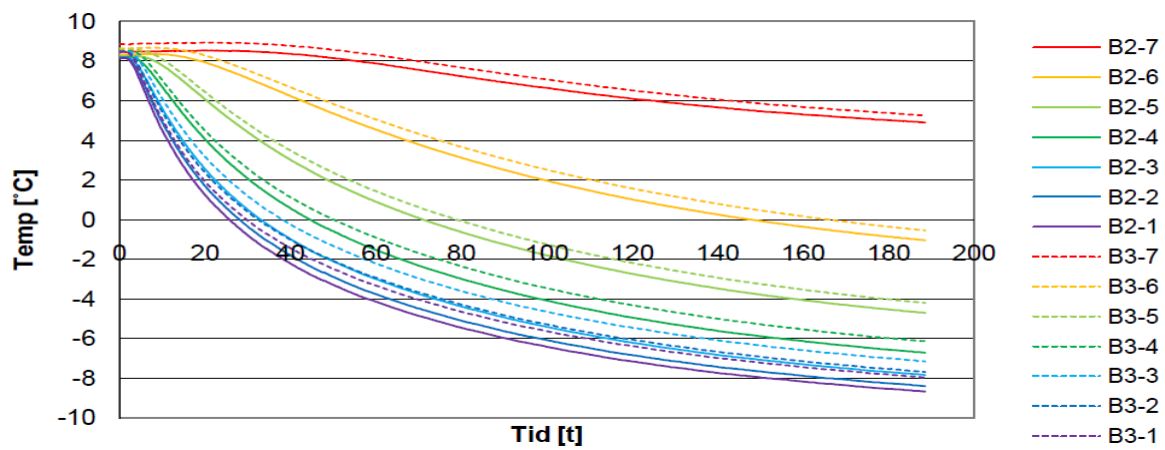
Figur F-25: Målt temperatur 64 cm inn i Støren-granitten under retur av F-1.

## Vedlegg G - Resultater fra F-2

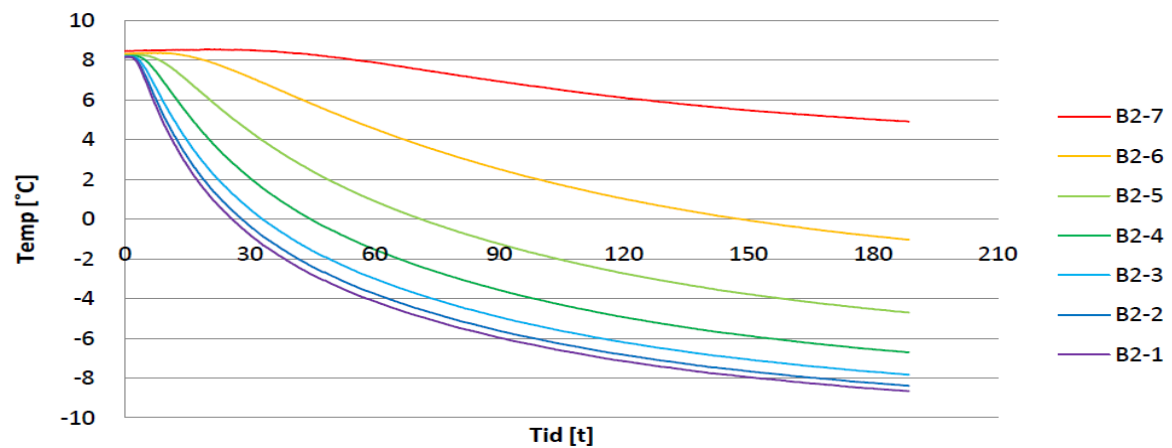
Nedenfor følger resultatene for blokkene A-2, A.3, B-2 og B-3 fra forsøket F-2, der steglasteren var på 28°C.



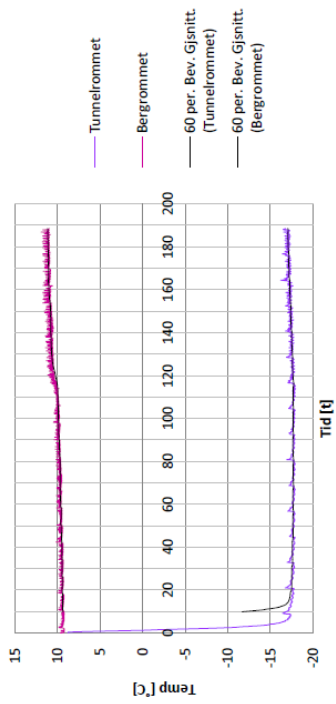
Figur G-1: Temperatur i A2 og A3 blokkene under F-2.



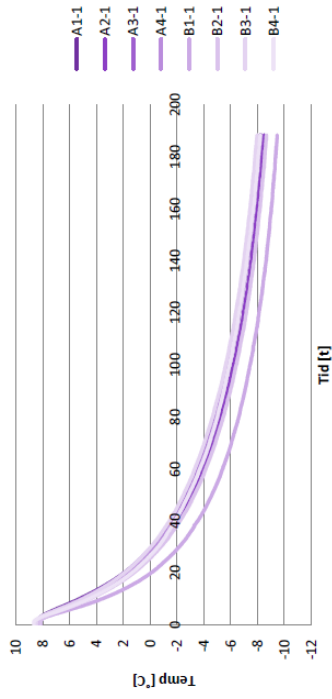
Figur G-2: Temperatur i B2 og B3 blokkene under F-2.



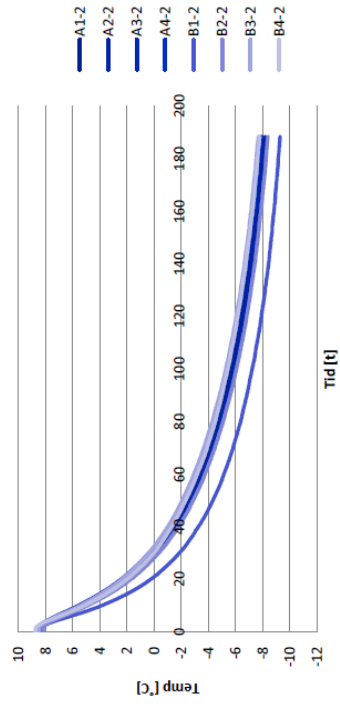
Figur G-3: Temperatur i B2 blokken under F-2.



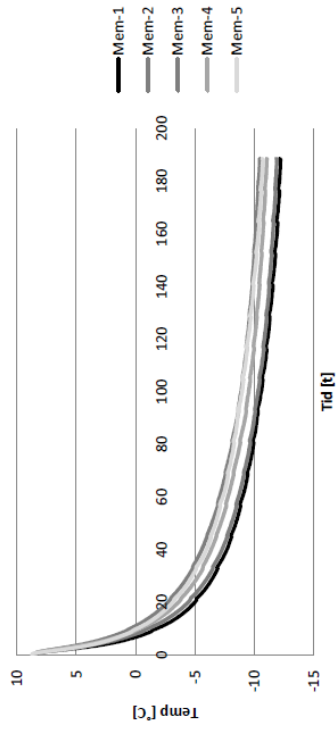
Figur G-7: Temperatur i Tunnelrommet og Bergrommet under F-2.



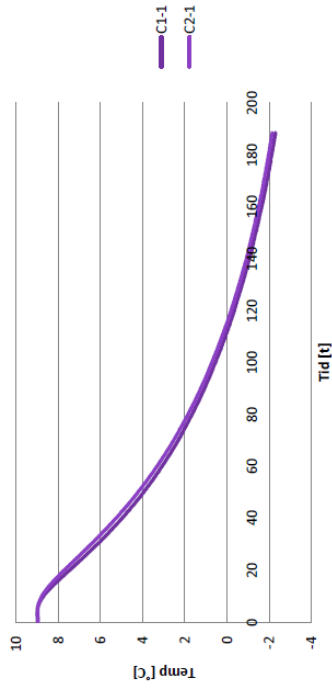
Figur G-8: Målt temperatur 2 cm inn i Støren-granitten under F-2.



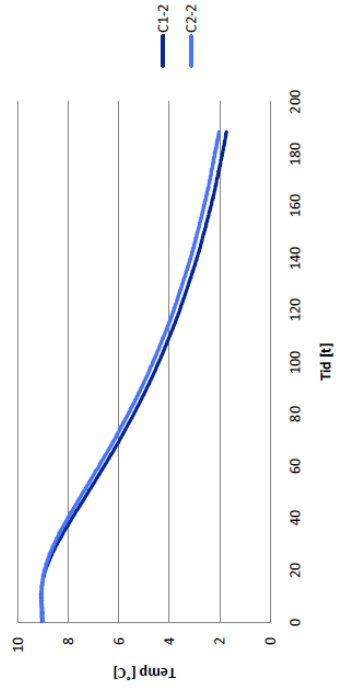
Figur G-9: Målt temperatur 4 cm inn i Støren-granitten under F-2.



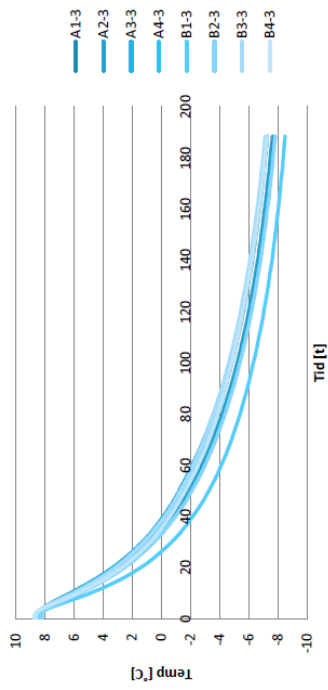
Figur G-4: Målt temperatur innenfor Mastersealen under F-2.



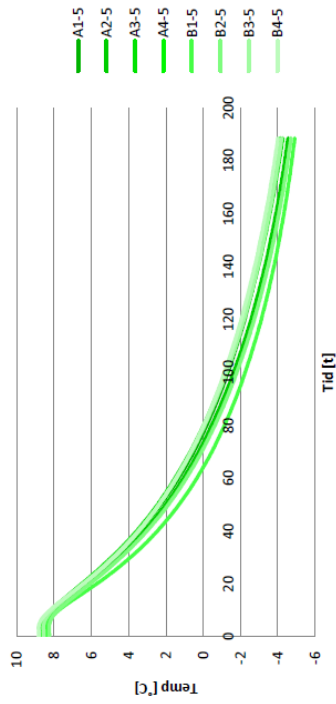
Figur G-5: Målt temperatur 40 cm inn i Støren-granitten i C2 og C3 under F-2.



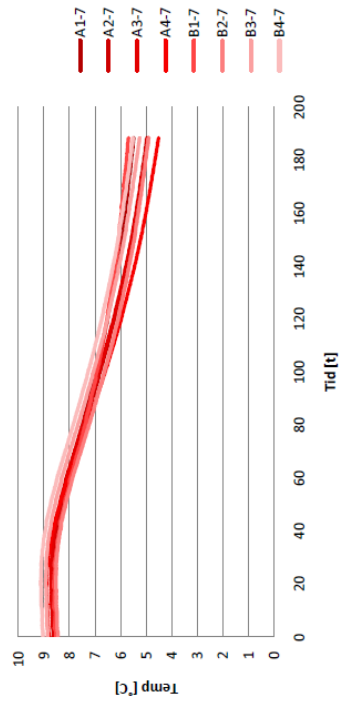
Figur G-6: Målt temperatur 80 cm inn i Støren-granitten i C2 og C3 under F-2.



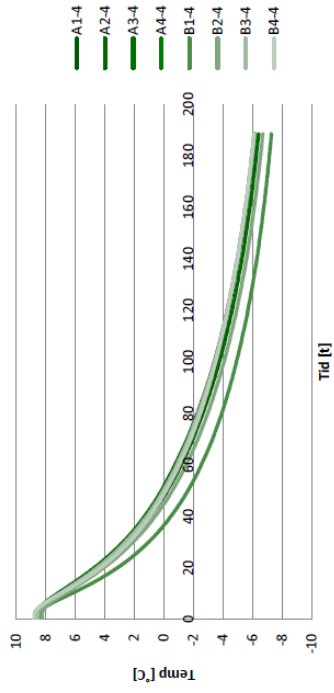
Figur G-12: Målt temperatur 8 cm inn i Støren-granitten under F-2.



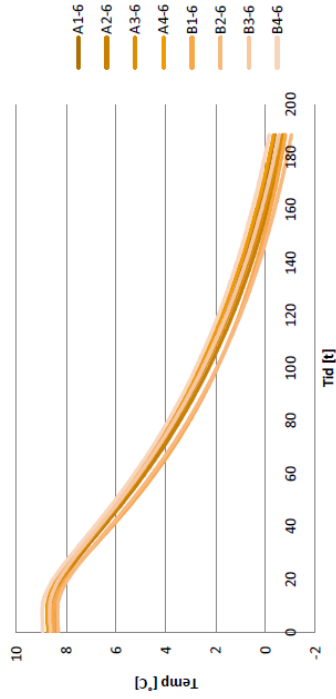
Figur G-13: Målt temperatur 32 cm inn i Støren-granitten under F-2.



Figur G-14: Målt temperatur 128 cm inn i Støren-granitten under F-2.

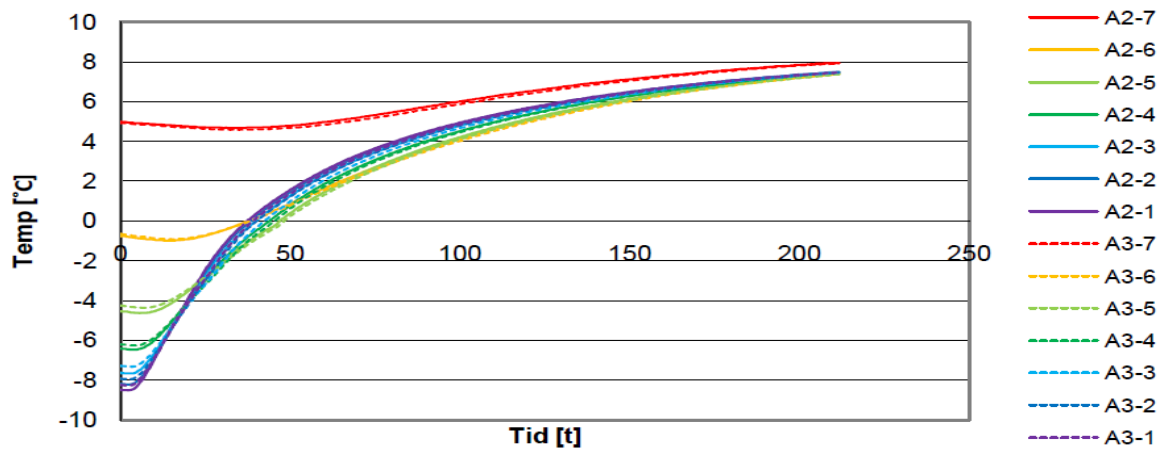


Figur G-10: Målt temperatur 16 cm inn i Støren-granitten under F-2.

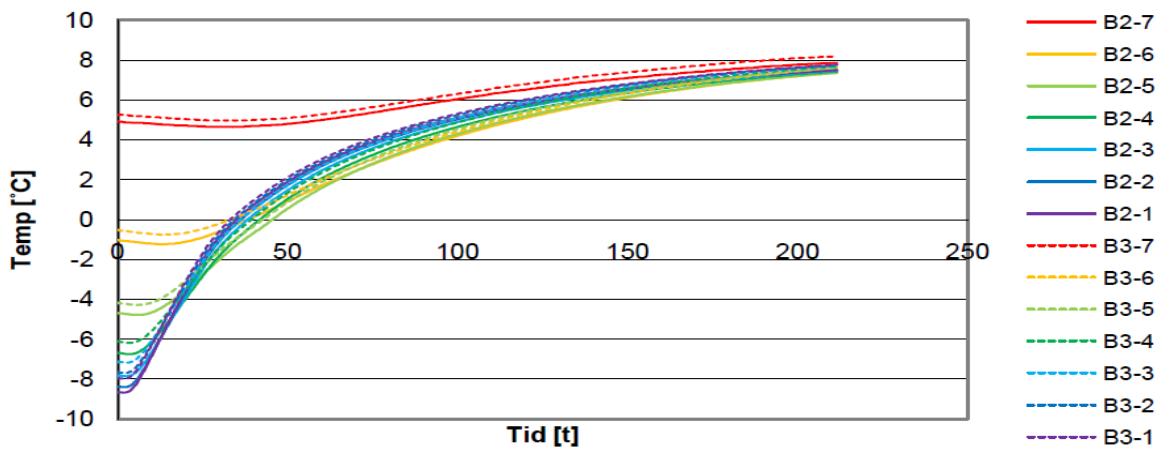


Figur G-11: Målt temperatur 64 cm inn i Støren-granitten under F-2.

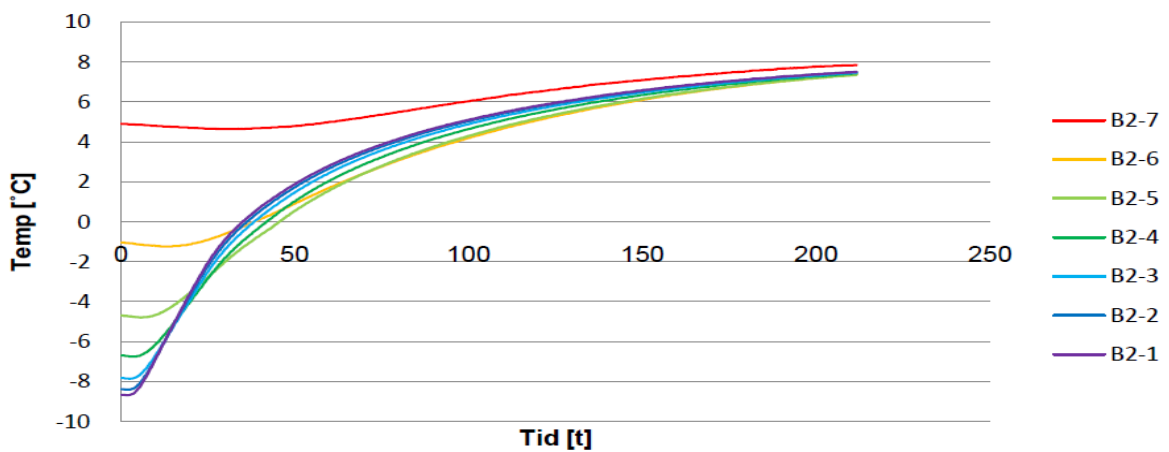
Nedenfor følger resultatene for blokkene A-2, A.3, B-2 og B-3 fra returen av forsøket F-2, der steglasten var på  $-28^{\circ}\text{C}$ .



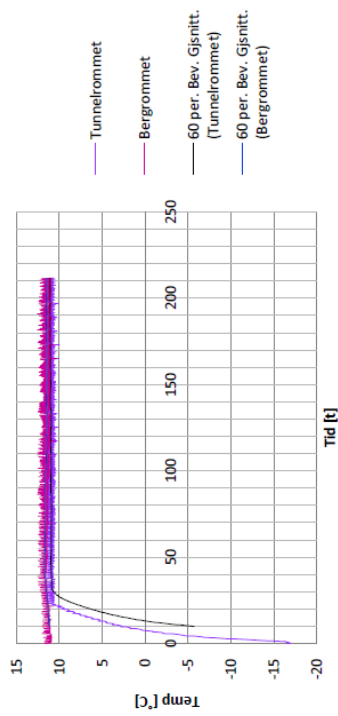
Figur G-15: Temperatur i A2 og A3 blokkene under retur av F-2 forsøket.



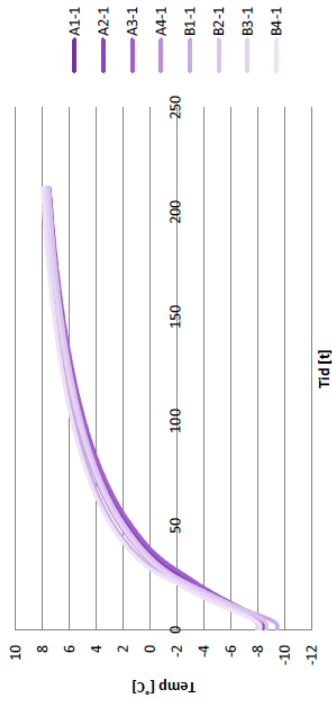
Figur G-16: Temperatur i B2 og B3 blokkene under retur av F-2 forsøket.



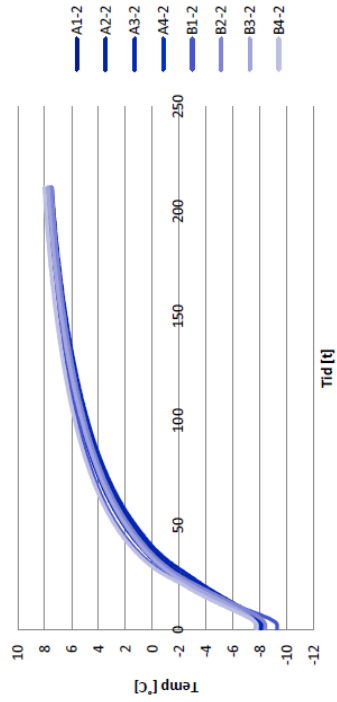
Figur G-17: Temperatur i B2 blokken under retur av F-2 forsøket.



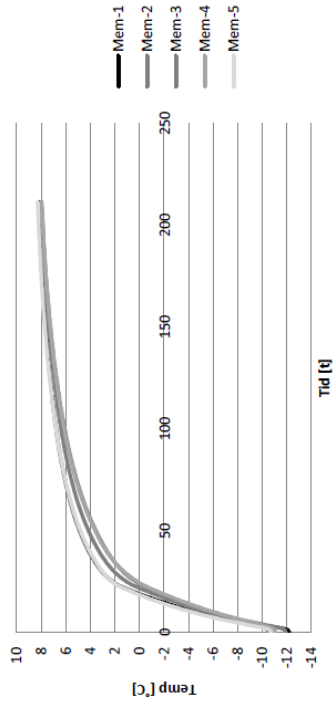
Figur G-21: Temperatur i Tunnelrommet og Bergrommet under retur av F-2.



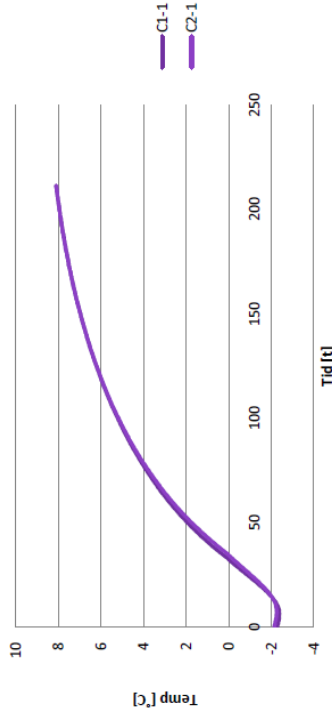
Figur G-22: Målt temperatur 2 cm inn i Støren-granitten under retur av F-2.



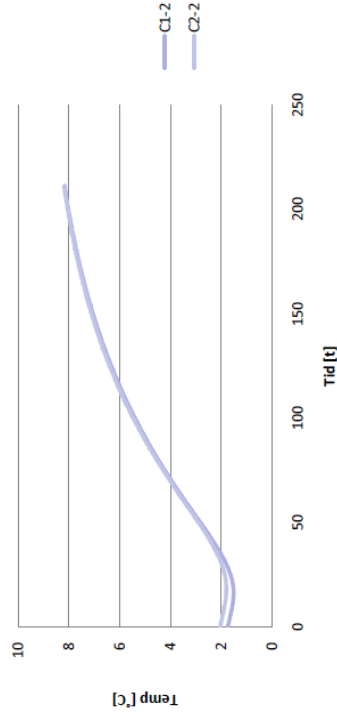
Figur G-23: Målt temperatur 4 cm inn i Støren-granitten under retur av F-2.



Figur G-18: Målt temperatur innenfor Mastersealen under retur av F-2.

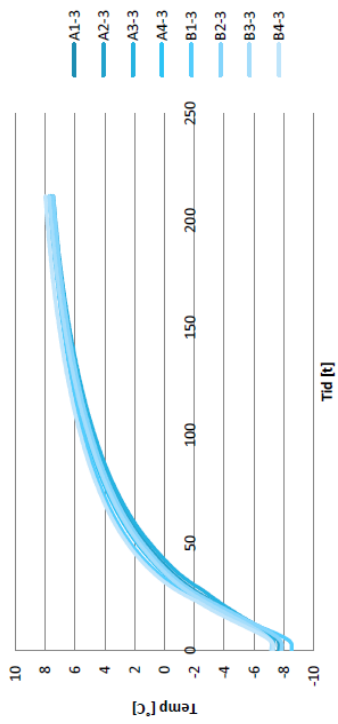


Figur G-19: Målt temperatur 40 cm inn i Støren-granitten i C2 og C3 under retur av F-2.

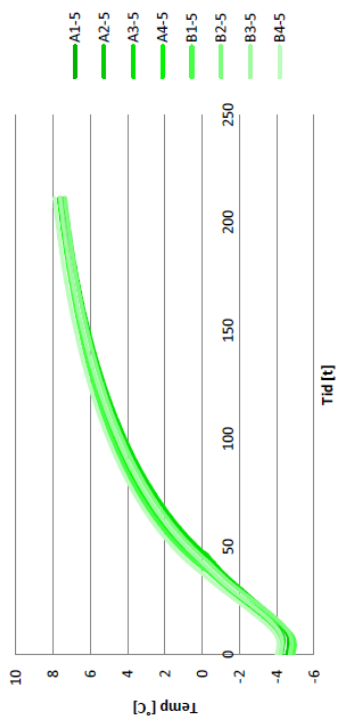


Figur G-20: Målt temperatur 80 cm inn i Støren-granitten i C2 og C3 under retur av F-2.

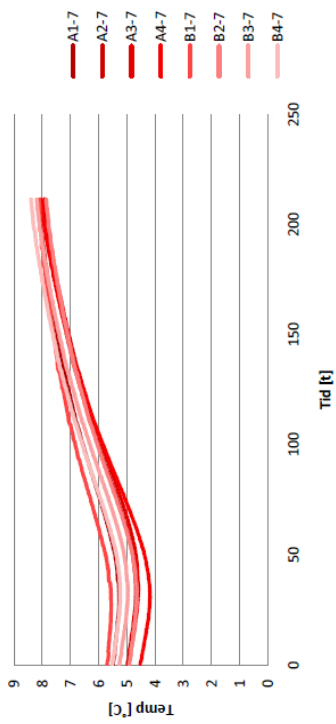




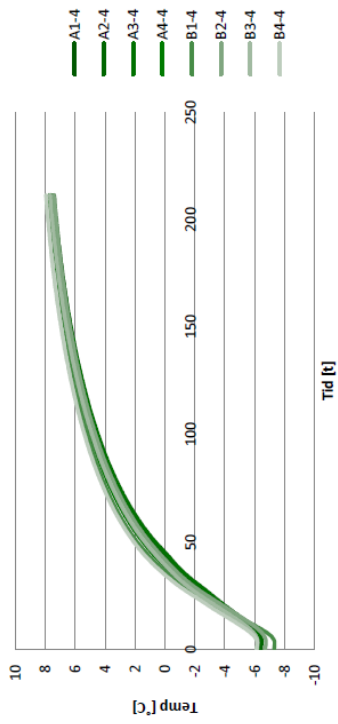
Figur G-26: Målt temperatur 8 cm inn i Støren-granitten under retur av F-2.



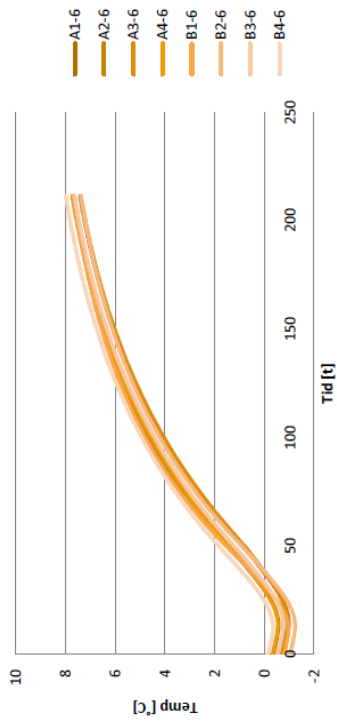
Figur G-27: Målt temperatur 32 cm inn i Støren-granitten under retur av F-2.



Figur G-28: Målt temperatur 128 cm inn i Støren-granitten under retur av F-2.



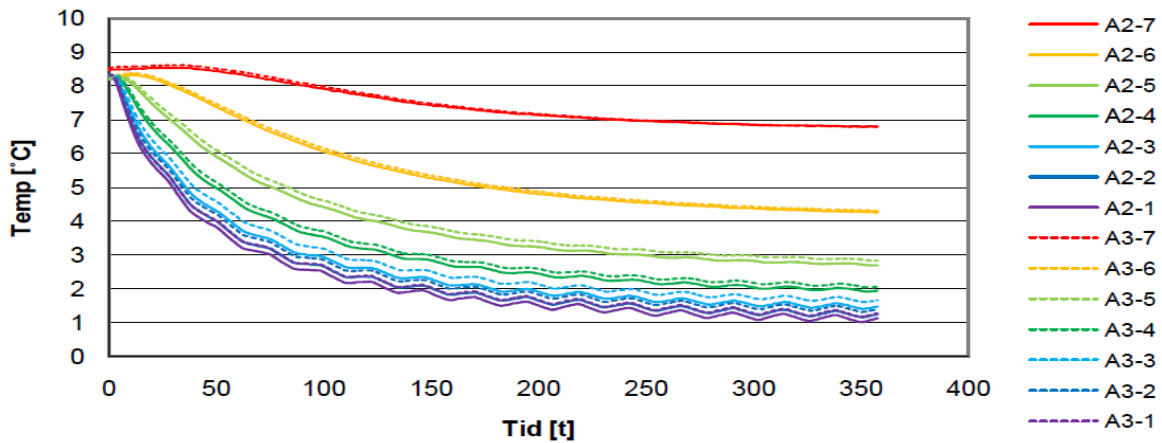
Figur G-24: Målt temperatur 16 cm inn i Støren-granitten under retur av F-2.



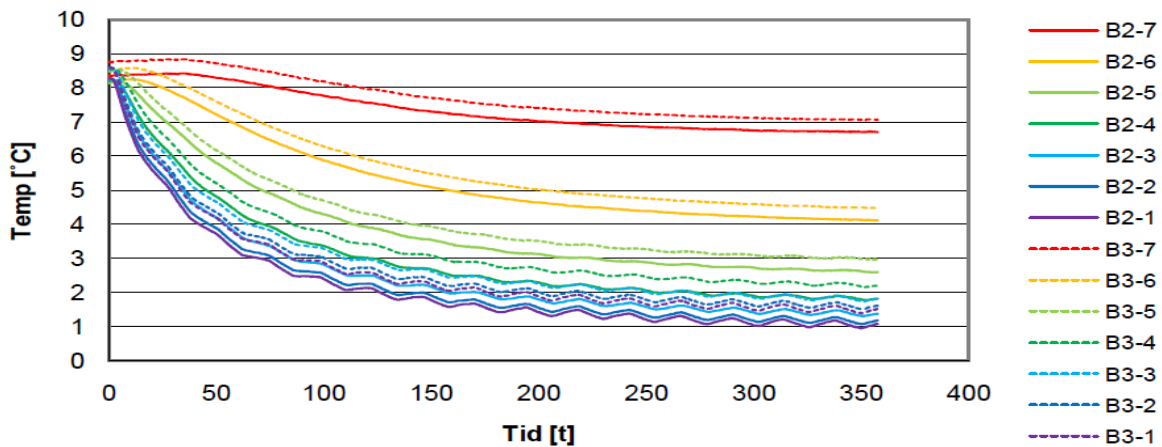
Figur G-25: Målt temperatur 64 cm inn i Støren-granitten under retur av F-2.

## Vedlegg H - Resultater fra F-3

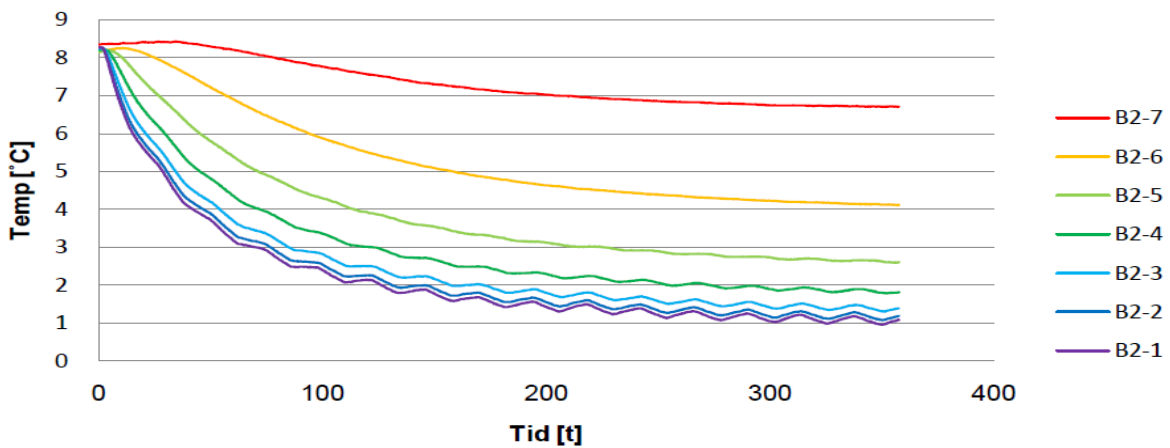
Nedenfor følger resultatene for blokkene A-2, A.3, B-2 og B-3 fra forsøket F-3, der  $T_{m} = -1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta T_0 = \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  og første steglast var negativ.



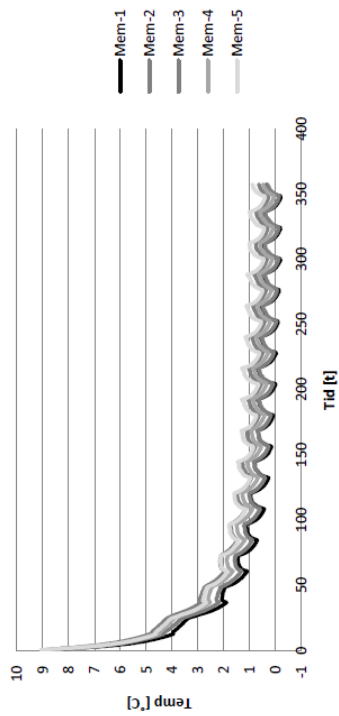
Figur H-1: Temperatur i A2 og A3 blokkene under F-5.



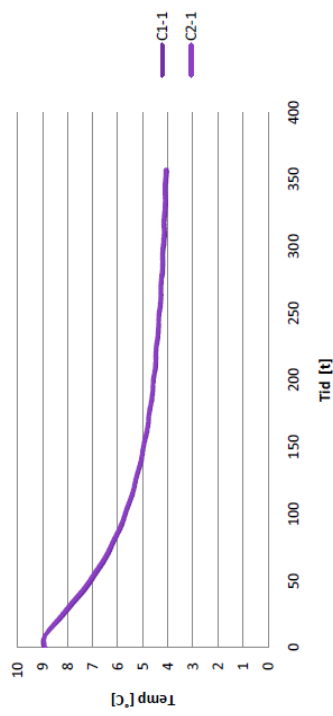
Figur H-2: Temperatur i B2 og B3 blokkene under F-5.



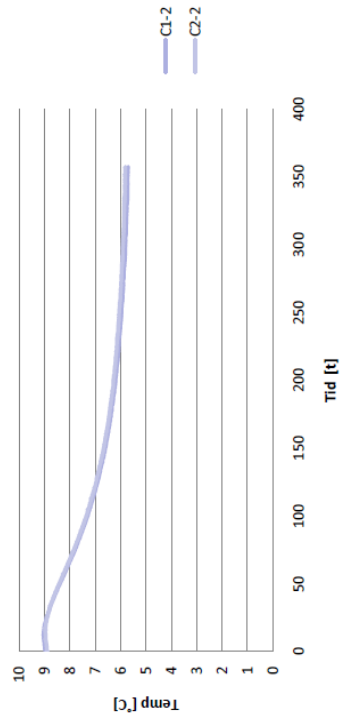
Figur H-3: Temperatur i B2 blokken under F-5.



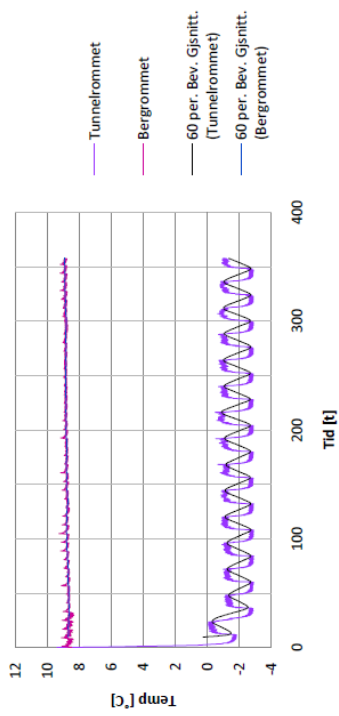
Figur H-4: Målt temperatur innenfor Mastersealen under F-5.



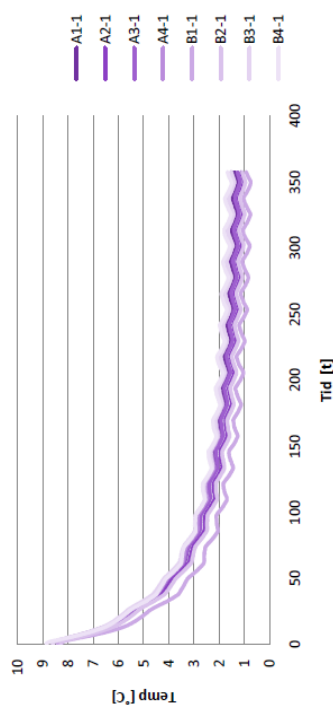
Figur H-5: Målt temperatur 40 cm inn i Støren-granitten i C2 og C3 under F-5.



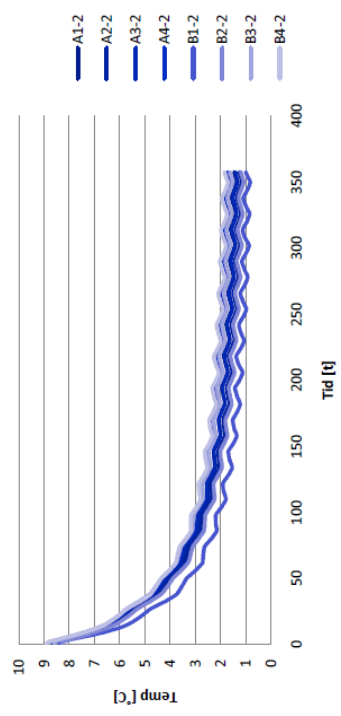
Figur H-6: Målt temperatur 80 cm inn i Støren-granitten i C2 og C3 under F-5.



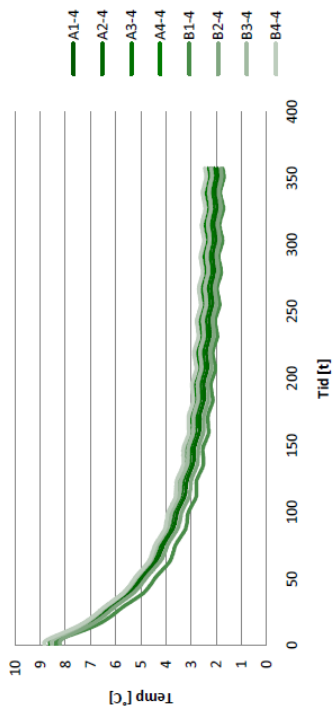
Figur H-7: Temperatur i Tunnelrommet og Bergrommet under F-5.



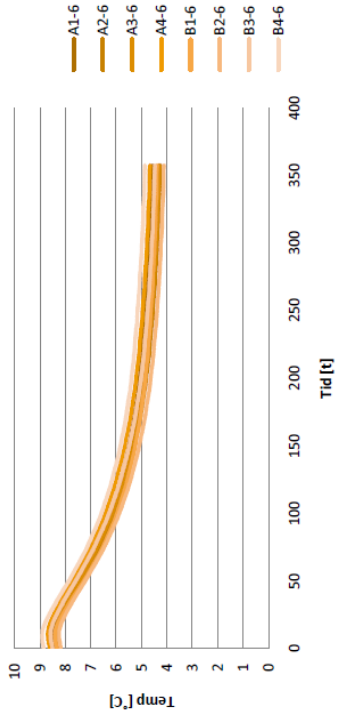
Figur H-8: Målt temperatur 2 cm inn i Støren-granitten under F-5.



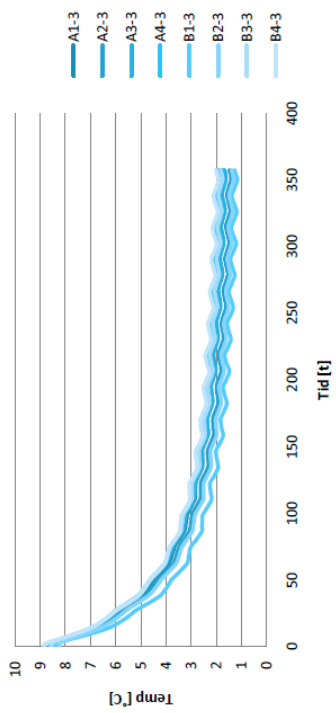
Figur H-9: Målt temperatur 4 cm inn i Støren-granitten under F-5.



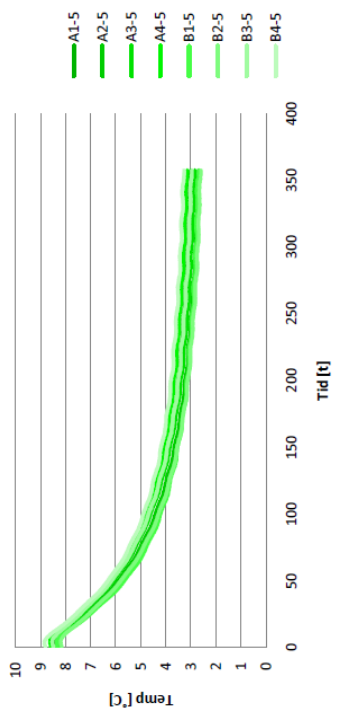
Figur H-10: Målt temperatur 16 cm inn i Støren-granitten under F-5.



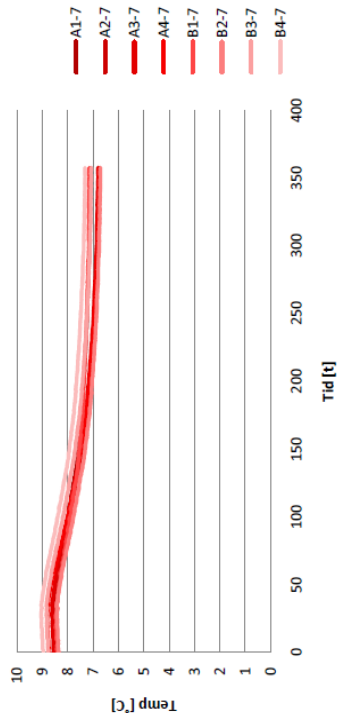
Figur H-11: Målt temperatur 64 cm inn i Støren-granitten under F-5.



Figur H-12: Målt temperatur 8 cm inn i Støren-granitten under F-5.



Figur H-13: Målt temperatur 32 cm inn i Støren-granitten under F-5.



Figur H-14: Målt temperatur 128 cm inn i Støren-granitten under F-5.

## Vedlegg I - Standardinnstillinger i TEMP/W

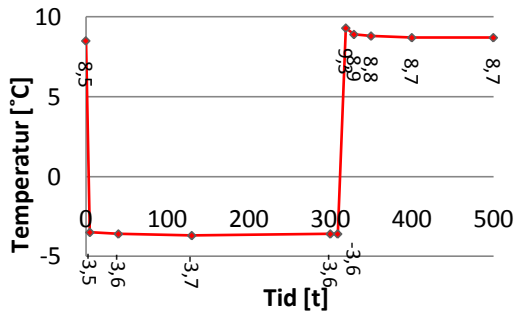
Feil! Fant ikke referanseilden. viser standardinnstillinger i TEMP/W.

Tabell I-1: Standardinnstillinger i TEMP/W.

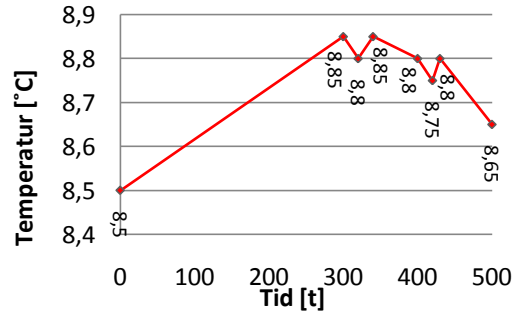
Label	What	Value
<i>Type</i>	Transient analyses	Starting time-step: #1
<i>Controll</i>	View	2-Dimensional
<i>Convergence</i>	Convergence	Max # of iterations: 50
	Tolerance	Tolerance [%T diff]: 0,1
	Phase Change Regions	Gauss Regions Iterations: 10
	Equation Solver	Direct Equation Solver
<i>Region Properties</i>	Elements	Quad. Integration Order: 4
	Element thickness	Thickness: 1

## Vedlegg J - Temperaturer til tester i TEMP/W

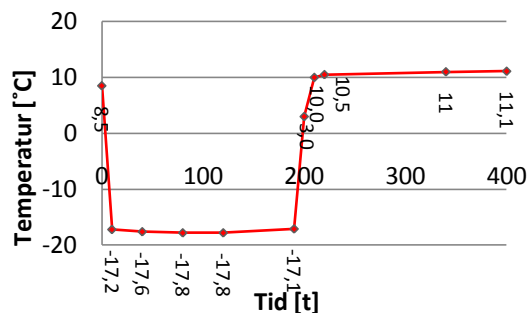
Nedenfor følger temperaturforløpene i Tunnelrommet og Bergrommet for de forskjellige beregningene i TEMP/W. Merk at varigheten på test T-3 og T-4 er 3000 t, mens grafen bare viser til 60t.



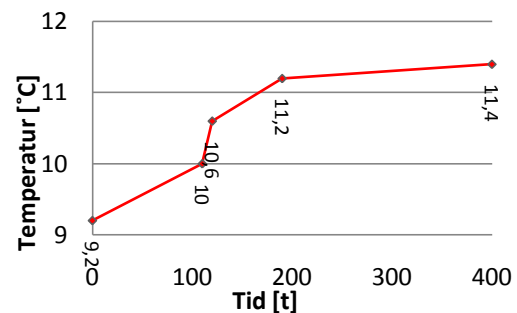
Figur J-1: Temperatur i Tunnelrommet under test T1.



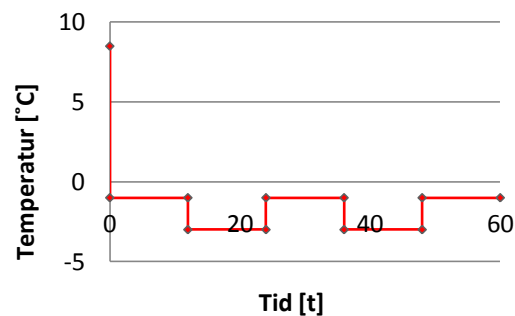
Figur J-5: Temperatur i Bergrommet under test T1.



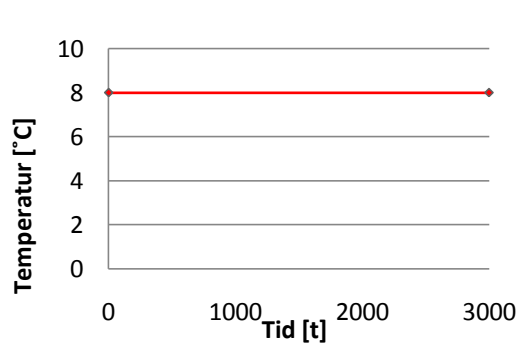
Figur J-2: Temperatur i Tunnelrommet under test T2.



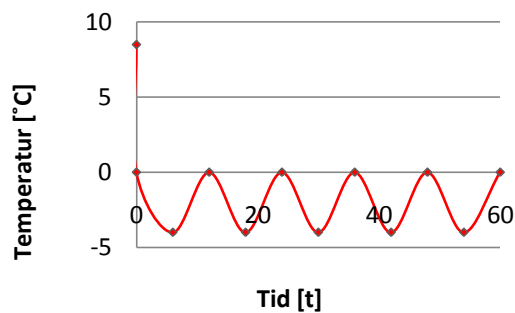
Figur J-6: Temperatur i Bergrommet under test T2.



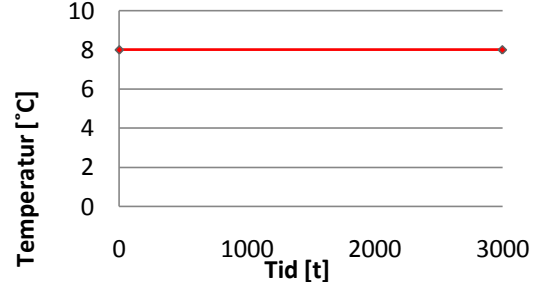
Figur J-3: Temperatur i Tunnelrommet under test T3.



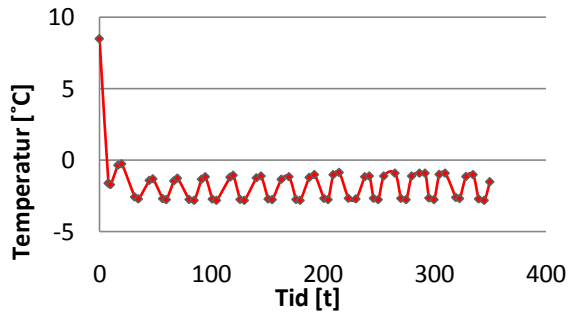
Figur J-7: Temperatur i Bergrommet under test T3.



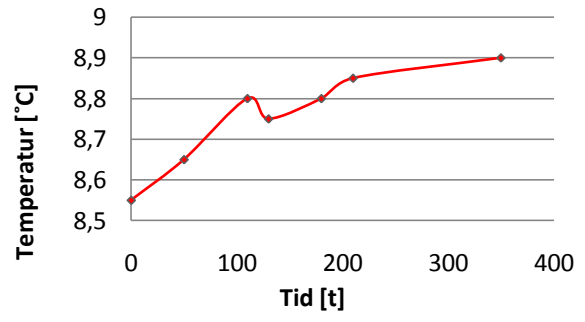
Figur J-4: Temperatur Tunnelrommet under test T4.



Figur J-8: Temperatur i Bergrommet under test T4.



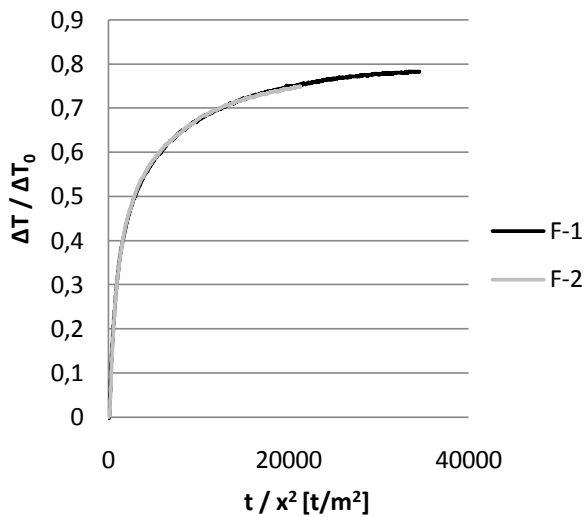
Figur J-9: Temperatur Tunnelrommet under test T5.



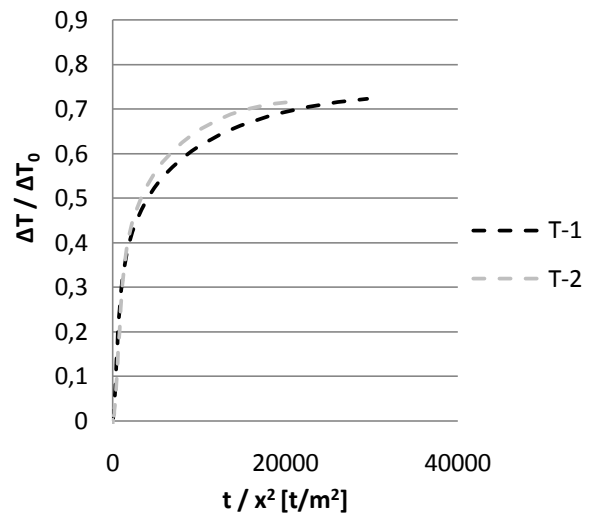
Figur J-10: Temperatur Tunnelrommet under test T5.

## Vedlegg K - Dimensjonsløse resultater for negativ stegløst

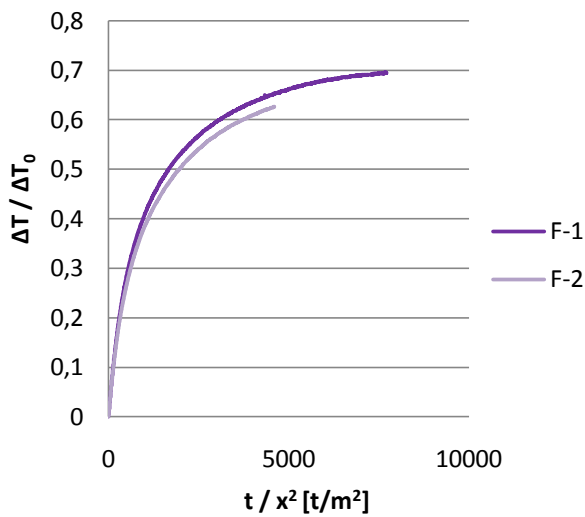
Nedenfor følger de dimensjonsløse resultatene fra forsøkene F-1 og F-2 og de beregnede resultatene fra T-1 og T-2 for de utvalgte målerne i fryselabben og de tilsvarende punktene i TEMP/W.



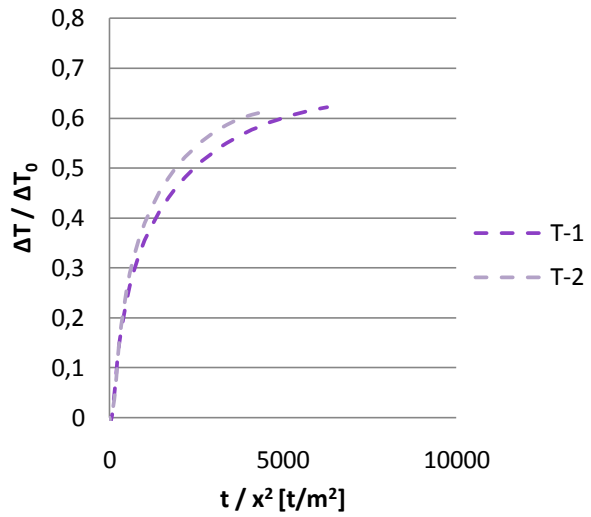
Figur K-1: Dimensjonsløse resultater for Mem-4 for forsøkene F-1 og F-2.



Figur K-2: Dimensjonsløse resultater for Mem-4 for beregningene T-1 og T-2.

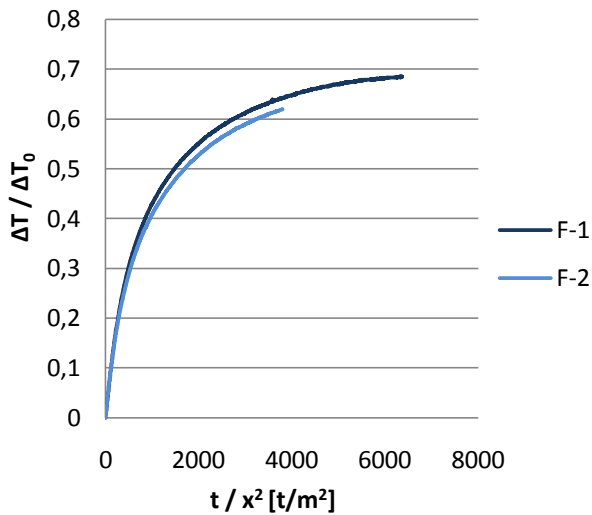


Figur K-3: Dimensjonsløse resultater for B2-1 for forsøkene F-1 og F-2.

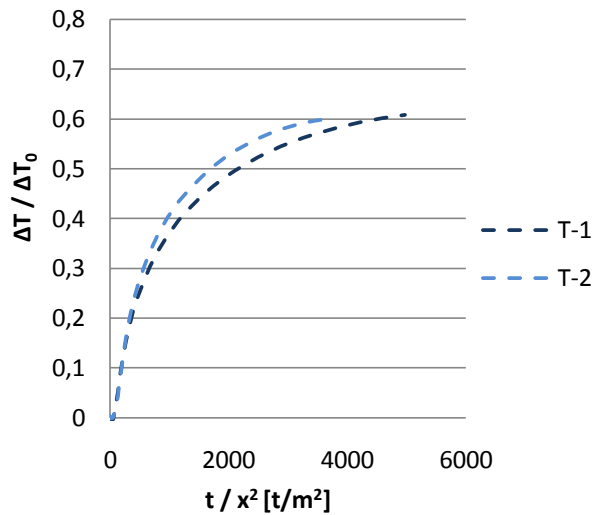


Figur K-4: Dimensjonsløse resultater for M-1 for beregningene T-1 og T-2.

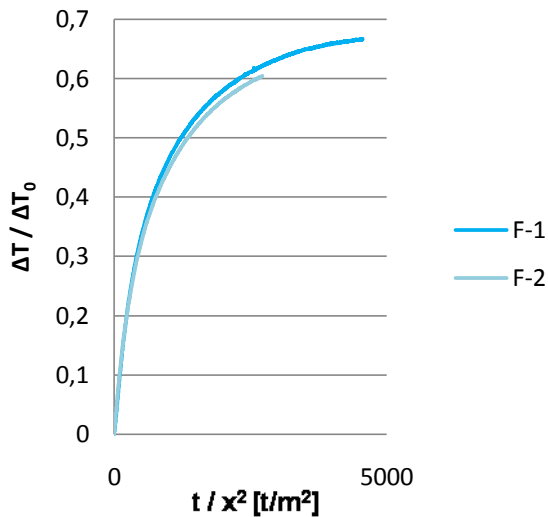




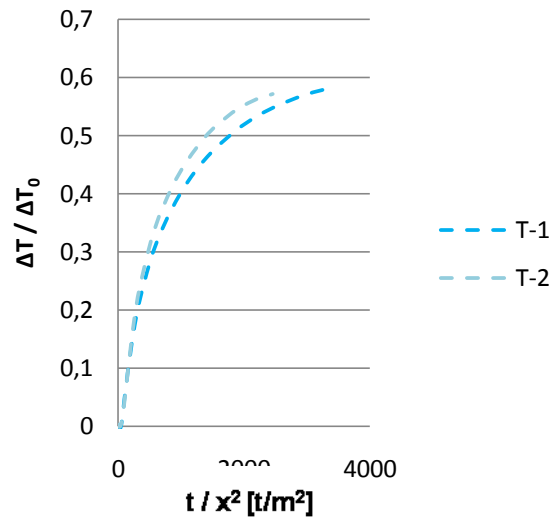
Figur K-5: Dimensjonsløse resultater for B2-2 for forsøkene F-1 og F-2.



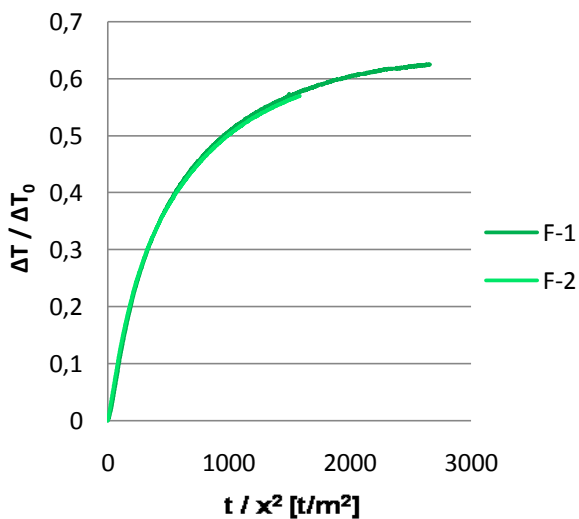
Figur K-6: Dimensjonsløse resultater for ~M-2 for beregningene T-1 og T-2.



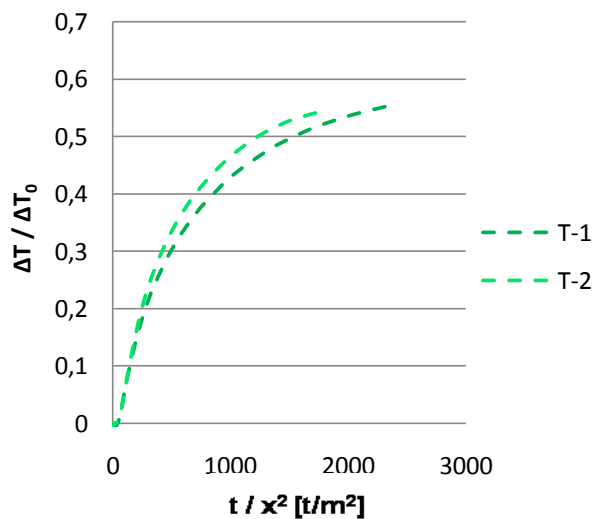
Figur K-7: Dimensjonsløse resultater for B2-3 for forsøkene F-1 og F-2.



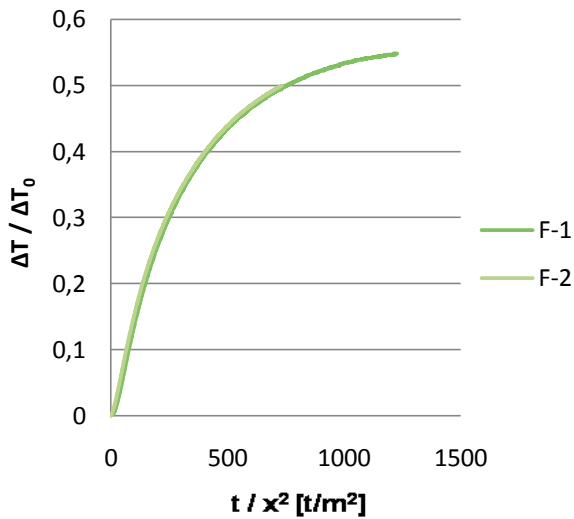
Figur K-8: Dimensjonsløse resultater for ~M-3 for beregningene T-1 og T-2.



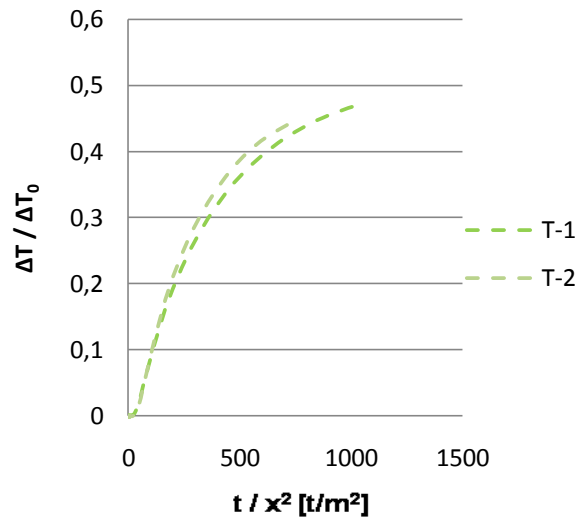
Figur K-9: Dimensjonsløse resultater for B2-4 for forsøkene F-1 og F-2.



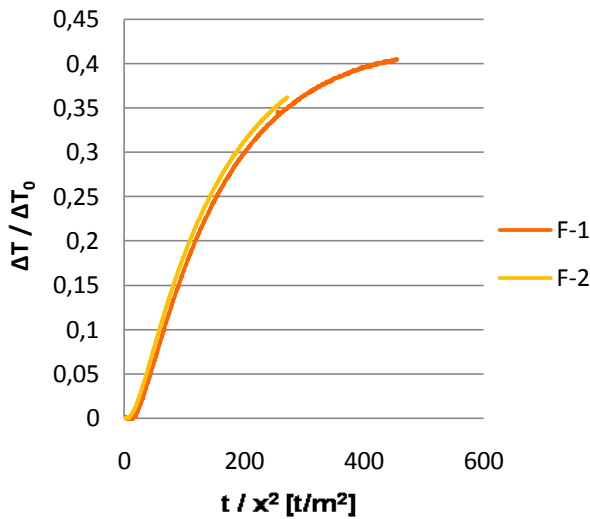
Figur K-10: Dimensjonsløse resultater for ~M-4 for beregningene T-1 og T-2.



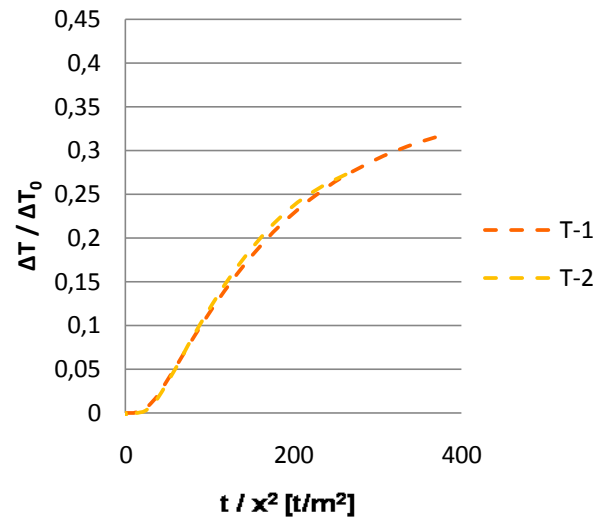
Figur K-11: Dimensjonsløse resultater for B2-5 for forsøkene F-1 og F-2.



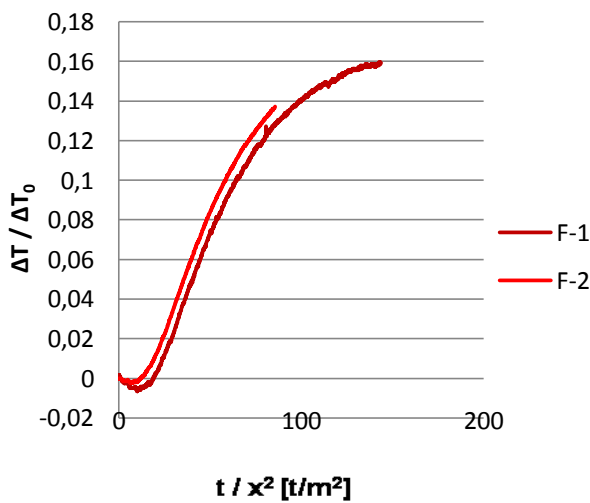
Figur K-12: Dimensjonsløse resultater for ~M-5 for beregningene T-1 og T-2.



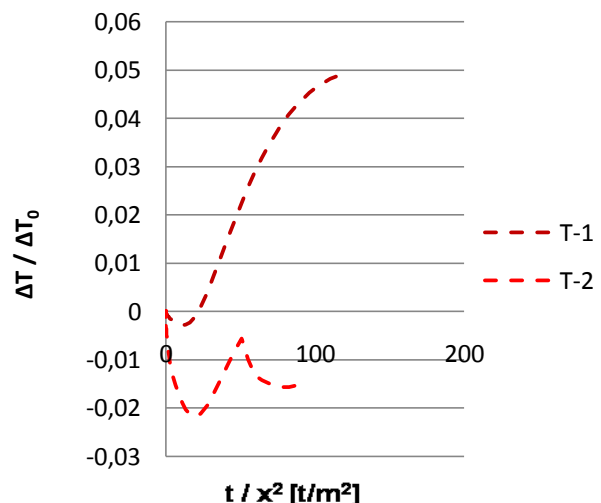
Figur K-13: Dimensjonsløse resultater for B2-6 for forsøkene F-1 og F-2.



Figur K-14: Dimensjonsløse resultater for ~M-6 for beregningene T-1 og T-2.



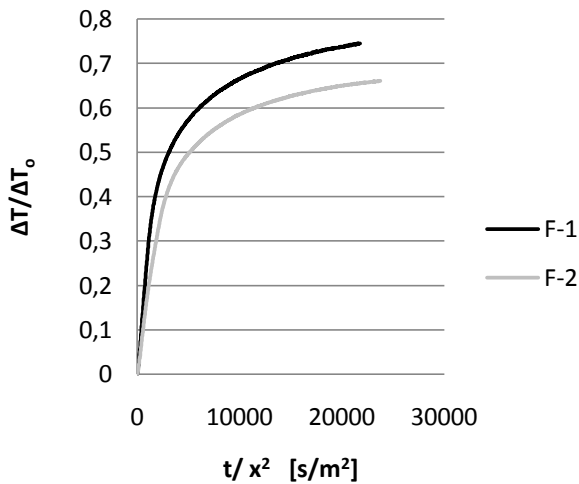
Figur K-15: Dimensjonsløse resultater for B2-7 for forsøkene F-1 og F-2.



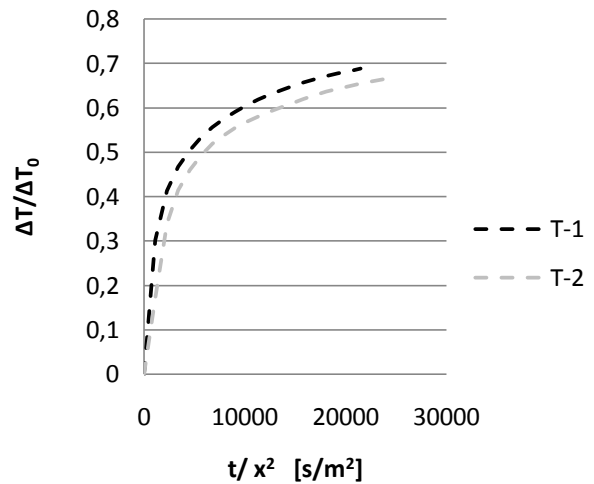
Figur K-16: Dimensjonsløse resultater for ~M-7 for beregningene T-1 og T-2.

## Vedlegg L - Dimensjonsløse resultater for positiv stegløst

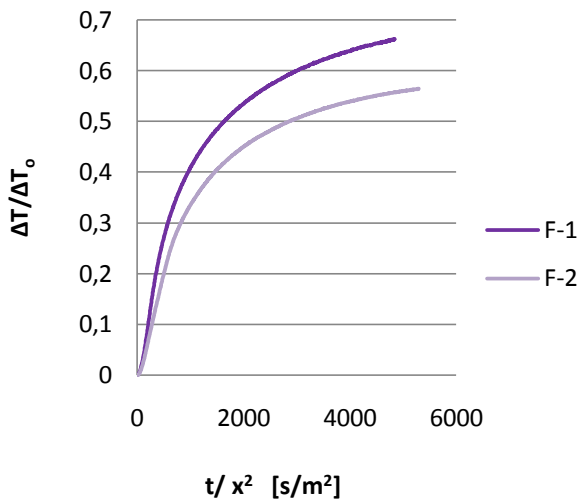
Nedenfor følger de dimensjonsløse resultatene fra returen av forsøkene F-1 og F-2 og den siste delen av de beregnede resultatene fra T-1 og T-2 for de utvalgte målerne i fryselabben og de tilsvarende punktene i TEMP/W.



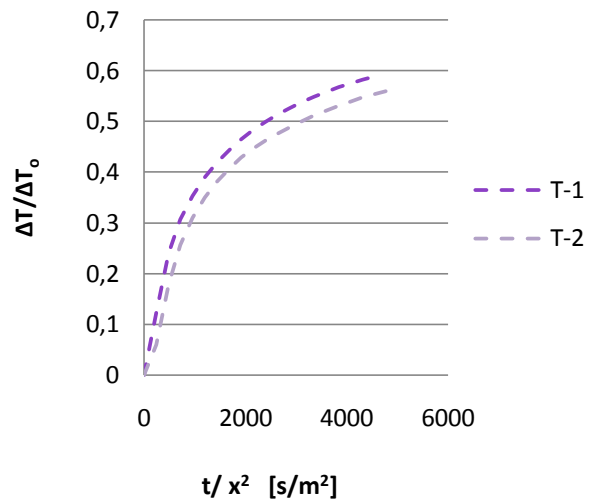
Figur L-1: Dimensjonsløse resultater for Mem-4 for returen av forsøkene F-1 og F-2.



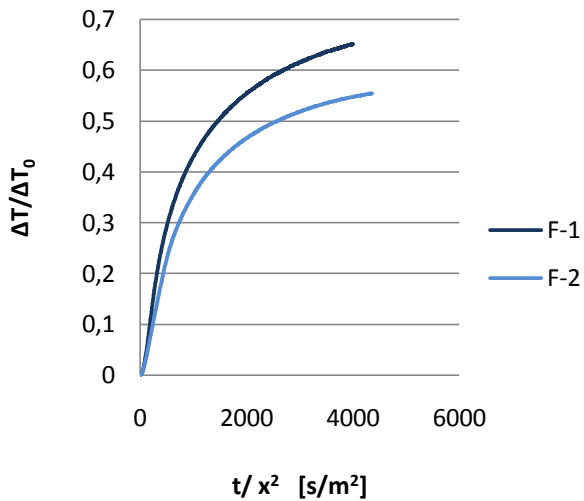
Figur L-2: Dimensjonsløse resultater for Mem-4 for siste del av beregningene T-1 og T-2.



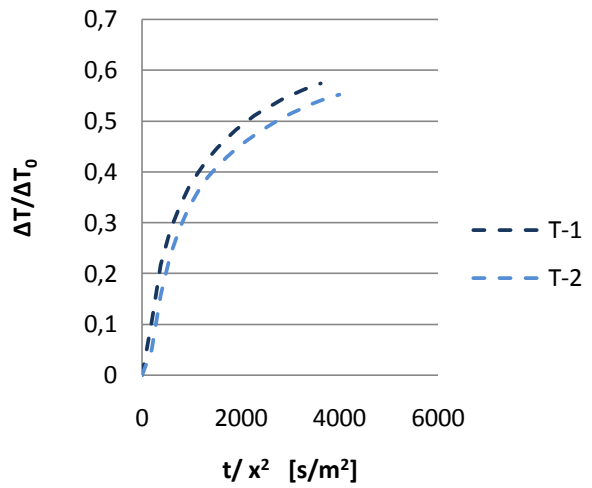
Figur L-3: Dimensjonsløse resultater for B2-1 for returen av forsøkene F-1 og F-2.



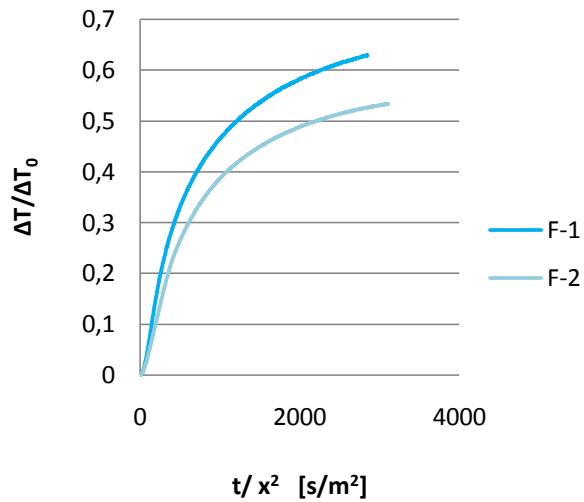
Figur L-4: Dimensjonsløse resultater for ~M-1 for siste del av beregningene T-1 og T-2.



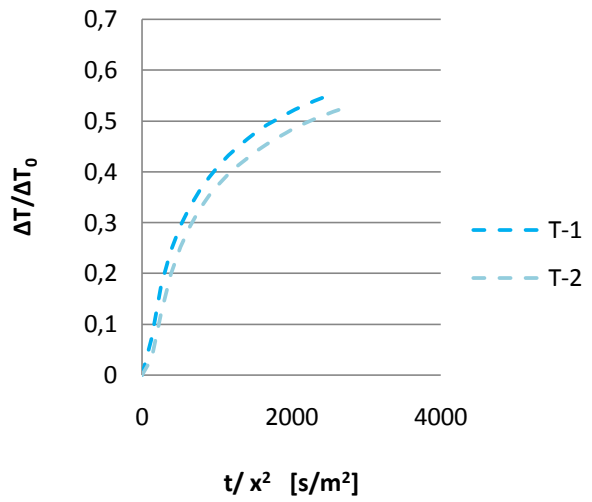
Figur L-5: Dimensjonsløse resultater for B2-2 for returen av forsøkene F-1 og F-2.



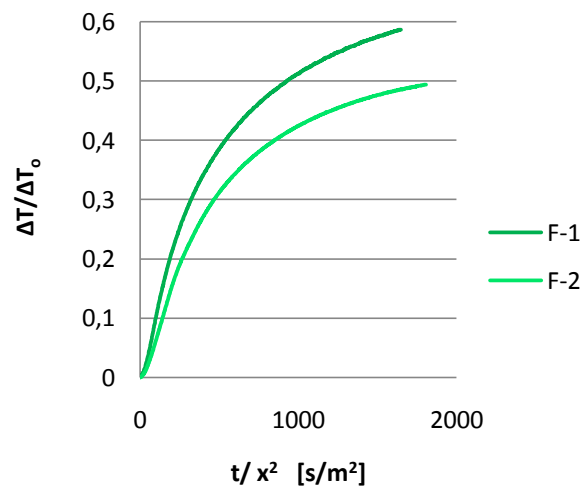
Figur L-6: Dimensjonsløse resultater for ~M-2 for siste del av beregningene T-1 og T-2.



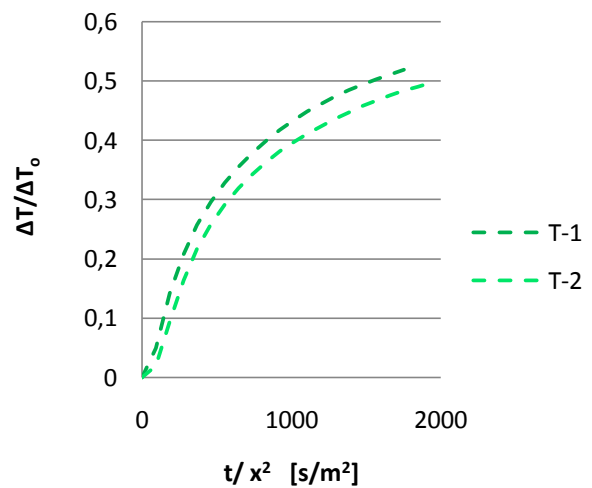
Figur L-7: Dimensjonsløse resultater for B2-3 for returen av forsøkene F-1 og F-2.



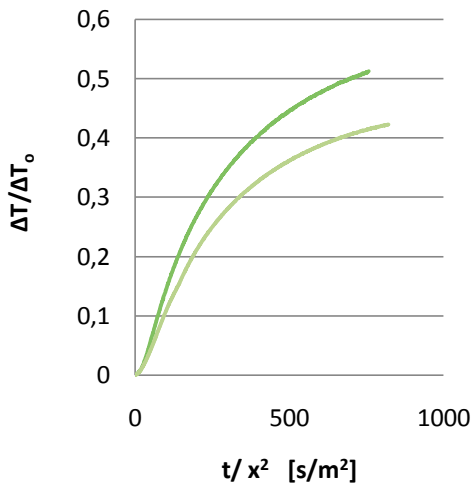
Figur L-8: Dimensjonsløse resultater for ~M-3 for siste del av beregningene T-1 og T-2.



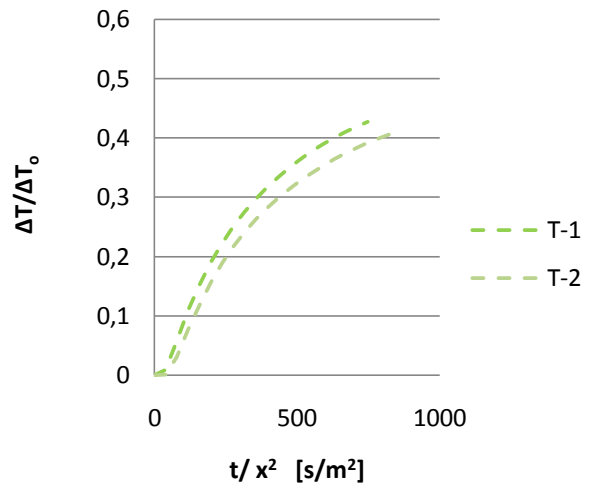
Figur L-9: Dimensjonsløse resultater for B2-4 for returen av forsøkene F-1 og F-2.



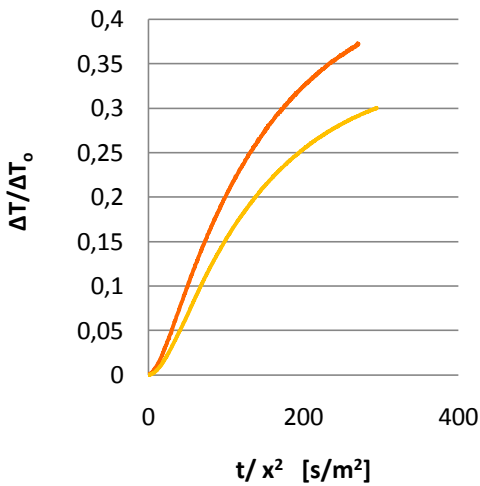
Figur L-10: Dimensjonsløse resultater for ~M-4 for siste del av beregningene T-1 og T-2.



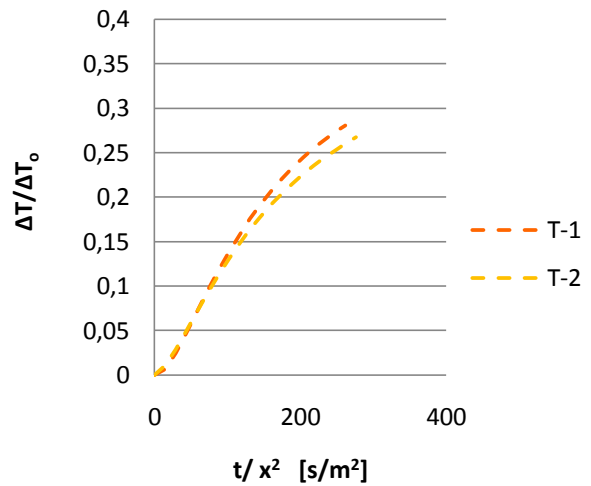
Figur L-11: Dimensjonsløse resultater for B2-5 for returen av forsøkene F-1 og F-2.



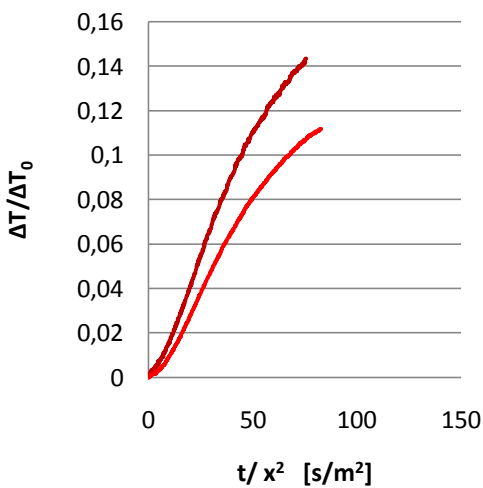
Figur L-12: Dimensjonsløse resultater for ~M-5 for siste del av beregningene T-1 og T-2.



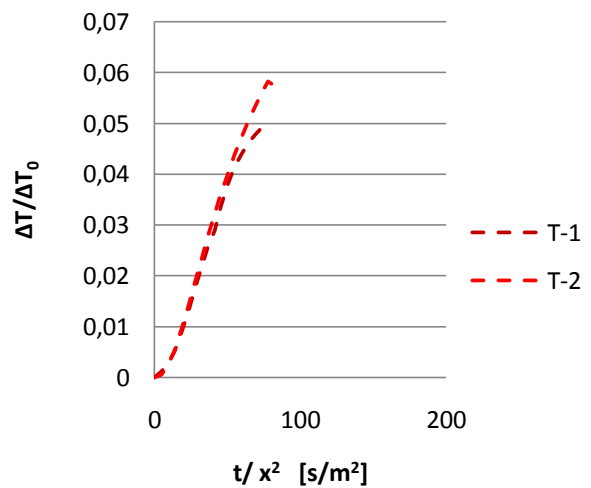
Figur L-13: Dimensjonsløse resultater for B2-6 for returen av forsøkene F-1 og F-2.



Figur L-14: Dimensjonsløse resultater for ~M-6 for siste del av beregningene T-1 og T-2.



Figur L-15: Dimensjonsløse resultater for B2-7 for returen av forsøkene F-1 og F-2.



Figur L-16: Dimensjonsløse resultater for ~M-7 for siste del av beregningene T-1 og T-2.

