

# Frostens utvikling mellom tunnel og bergmasse.

Felt- og laboratoriemålinger med WG  
Tunnelhvelv T100.

**Anne Mari Farstad**

Geofag og petroleumsteknologi  
Innlevert: Juni 2012  
Hovedveileder: Eivind Grøv, IGB

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for geologi og bergteknikk



## Sammendrag

I Norge er vinterkulden et problem i forbindelse med tunneldrift. I løpet av vinteren utsettes tunneler for frost i varierende grad, og det kan oppstå problemene med isdannelse som utgjør en trussel for sikkerheten og fører til økt nedbrytning.

Siden klimaet i Norge er svært varierende, er det derfor nyttig å sette en verdi på hvor stor frostpåkjenning som kan ventes ved tunneler i ulike områder. I dag benyttes frostmengde som et felles begrep for å beskrive frostpåskjenninger over hele landet. Begrepet tar hensyn til temperatur og tid ved å ta tidsintegralet av negativ temperatur gjennom hele vinteren.

Etter erfaringer fra tidligere forsøk i Frostlaboratoriet er det satt spørsmålsteget ved hvor egnet frostmengdebegrepet er til å beskrive kuldepåkjenning. Denne oppgaven er en del av et videre arbeid for å lære mer om hvordan frosten utvikler seg fra tunnellufta og videre inn i berget.

Resultatene etter flere forsøk i Frostlaboratoriet og feltmålinger i Melkøysundtunnelen viser at temperaturen i elementene fra tunnellufta og inn til det punktet i bergmassen som holder en konstant temperatur, er avhengig av den temperaturen som påføres fra tunnellufta. Temperaturutviklingen i elementene (luftrom, sprøytebetong og granitt) følger en utvikling hvor temperaturen synker brått før den flater ut mot en minimumstemperatur. Det ble funnet at ved gitte temperaturer i tunnelrommet flatet temperaturene i elementene ut mot den samme minimumstemperaturen hver gang. Resultatene viste også at temperaturutviklingen i elementene ikke påvirkes av hvor mange frostsykluser som påføres, utviklingen skjer likt hver gang. Tidsparameteren spiller derfor ingen rolle for hvordan utviklingen skjer.

For å isolere berget mot kulden blir ulike vann og frostsikringskonsepter benyttet. Et av disse er WG Tunnelhvelv T100 levert av Giertsen Tunnel AS. Dette konseptet går ut på å isolere et luftrom utenpå tunnelkonturen, med en lufttett duk, slik at det skapes en termoseffekt. Etter brev fra Vegdirektoratet i 2005 ble konseptet nedjustert til å være godkjent for bruk ved  $F_{10}=3.000 \text{ h}^\circ\text{C}$ , fra tidligere godkjenning på  $F_{10}=10.000 \text{ h}^\circ\text{C}$ . Den ble dermed også karakterisert som en uisolert løsning, da en frostmengde på  $3.000 \text{ h}^\circ\text{C}$  representerer en angitt grense for når det kreves tiltak for isolering.

Resultatene fra flere forsøk med T100 i Frostlaboratoriet, samt feltmålinger ved Melkøysundtunnelen er det konkludert med at konseptet reduserer frostpåkjenningen på konturen. Størrelsen på frostdempningen avhenger av temperaturforløpet i tunnelen. Luftrommet bak T100 faller mot en stagnasjonstemperatur, som representerer laveste mulig verdi, som avhenger av temperaturen i Tunnelen. I tillegg til dempningseffekten forsinkes også frostutviklingen, på grunn av tregheten i temperaturendring. Slik at en skiftende temperatur i tunnelen, gjør at temperaturen i luftrommet ikke rekker å nå stagnasjon.

## Abstract

Freezing temperatures during the winter represents a problem in connection with tunneling. The problems are related to ice formation in tunnels, which represents a destructive force and also a threat against safety.

Norway contains a large amount of different climate zones. It is therefore very useful to find a parameter that can describe the need for frost control in tunnels in different areas. Today the Norwegian Road Administration uses the term “frostmengde”, which is the integral over time of negative temperatures. In other words it sums up the mean temperature per hour when the temperature is below 0 degrees.

Results from previous test in the laboratory “Frost-laboratory” at SINTEF, leads to questioning if the term is the most appropriate way to describe the frost conditions. This thesis is part of the continuing work to learn more about the thermal exchange between the bedrock and the cold tunnel air. The spring 2011 the system of waterproofing WG Tunnelarch T100 was installed in the Frost-laboratory.

The results consist of data from several tests in the Frost-laboratory with WG Tunnelarch T100, and also field measurements from the Melkøysundtunnel with T100 installed. The results showed that the temperature in the separate elements (air, shotcrete and rock) depended upon the temperature in the tunnel. The temperatures in the elements were unaffected of number of frost cycles and earlier temperature conditions. Every time the temperature in the tunnel held a constant freezing temperature, the temperature in the elements stagnated at the same temperature. The time-parameter does not influence how the temperature develops in the elements after stagnation, and there is probably no point in collecting number of frost cycles. It is the single frost event that affects the temperatures.

The concept of WG Tunnelarch T100 is to build up an insulating airspace with an airtight and waterproof tunnelsealing which separates the tunnel contour from the tunnel air. In 2005 the Norwegian Road Administration (SVV) changed the original approval of T100 from  $F_{10}=10.000h^{\circ}C$  to  $F_{10}=3.000h^{\circ}C$ . The new approval represents at the same time a limit for when there is need for frost control or insulation in tunnels. This means that the system T100 is assumed to be a non-insulation system.

The conclusions after several tests in the Frost-laboratory are that the system WG Tunnelarch T100 lowers the air temperatures that the tunnel contour is exposed to. This also reduces the temperatures in the shotcrete and in the rock.

## Forord

Helt fra starten av har det vært interessant å inkludere prosjekt og masteroppgave til et så nytenkende og praktisk tema som frost og varmeutveksling mellom berg og tunnel.

Frostlaboratoriet representerer en unik testtrigg som er bakgrunn for denne masteroppgaven, og uten den hadde ikke denne oppgaven vært mulig å gjennomføre.

Jeg starter med å takke Giertsen Tunnel AS for å stille med ressurser og godt personell for å gjennomføre de planene som ble gjort av undertegnede.

Forsøkene i Frostlaboratoriet hadde ikke gått sin gang uten god hjelp fra Svenn Refseth, Torgeir Jenssen, og spesielt Anders Storler som har fulgt opp forsøkene i Frostlaboratoriet fra start til slutt.

Jeg vil rette en stor takk til Håkon Skistad for flere gode og saklige diskusjoner, og som entusiastisk har bidratt til å øke forståelsen for varmelæren.

Til slutt vil jeg takke veileder Eivind Grøv som introduserte meg for temaet. Jeg setter stor pris på ansvaret og tillitten jeg har fått, slik at jeg har formet oppgaven slik jeg ønsker. Det hele har vært utrolig lærerikt.

Trondheim, 5.6.2012

---

Anne Mari Farstad

## Nomenklatur

F	Frostmengde	[h°C]
F <sub>10</sub>	Frostmengden overskrides 1 gang i en 10-års periode	[h°C]
T	Temperatur	[°C]
t	Tid	[timer, døgn]
x	Lengde/avstand	[m]
φ	Varmestrøm	[W]
a	Termisk diffusivitet	[m <sup>2</sup> /s]
c	Spesifikk varmekapasitet	[Ws/(kg K)]
q	Varmestrømtetthet	[W/m <sup>2</sup> ]
h	Varmeoverføringskoeffisienten	[W/m <sup>2</sup> K]
ΔT <sub>0</sub>	Steglast	[°C]
T <sub>st</sub>	Stagnasjonstemperatur	[°C]
T <sub>s</sub>	Sluttemperatur	[°C]
T <sub>90</sub>	90 % av stagnasjonstemperatur	[°C]
t <sub>90</sub>	Tid før oppnådd 90 % stagnasjon	[døgn]
k	Termisk konduktivitet	[W/mK]
A	Areal	[m <sup>2</sup> ]
TR	Tunnelrom	
LR	Luftrom	
SB	Sprøytebetong	
BR	Bergrom	

# Innholdsfortegnelse

Sammendrag.....	i
Forord.....	iii
Nomenklatur.....	iv
1 Bakgrunn .....	3
2 Målsetning.....	3
3 Frostdimensjonering. ....	4
4 Varmeoverføringsteori.....	4
4.1 Varmeledning .....	4
4.1.1 Varmeledning ved ikke-stasjonære forhold.....	6
4.1.2 Varmeledning i berg .....	7
4.2 Konveksjon.....	8
4.3 Stråling.....	9
5 Vann i berg .....	10
5.1 Vannets betydning for varmeoverføring.....	11
6 Frostlaboratoriet .....	12
6.1 Oppbygningen av Frostlaboratoriet .....	12
6.2 Målepunktene i Frostlaboratoriet .....	13
6.2.1 Målepunkter i Granittblokkene.....	13
6.2.2 Målepunkter i sprøytebetongen .....	15
6.2.3 Målepunkter i luftrommet .....	15
6.3 Testvilkår.....	17
6.4 Planlegging og gjennomføring av forsøk i Frostlaboratoriet.....	18
6.5 Terminologi.....	18
6.6 Oversikt over gjennomførte forsøk .....	20
7 Resultater fra Frostlaboratoriet .....	21
7.1 Forsøk F-1 .....	22
7.1.1 Resultater fra Luftrommet .....	23
7.1.2 Resultater fra Sprøytebetongen.....	28
7.1.3 Resultater fra Granittblokkene .....	30

7.2	Forsøk F-2 .....	33
7.3	Forsøk F-3 .....	36
7.4	Forsøk F-4 .....	40
7.5	Forsøk F-5 .....	44
7.6	Forsøk F-6 .....	49
7.7	Forsøk F-7 .....	54
8	Frostbeskyttelsen til WG Tunnelhvelv T100 i Frostlaboratoriet .....	59
8.1	Hvordan beskytter WG Tunnelhvelv T100 mot kulde i Frostlaboratoriet?.....	59
8.2	Resultater fra tester i Frostlaboratoriet uten WG Tunnelhvelv T100. ....	62
8.2.1	Sammenligning av resultater med og uten WG Tunnelhvelv T100 .....	65
8.3	Resultater fra Frostlaboratoriet sammenlignet med resultatene fra tidligere teoretiske beregninger og simuleringer.....	68
8.4	Frostmengdebegrepet i Frostlaboratoriet.....	69
9	Feltmålinger i Melkøysundtunnelen .....	70
9.1	Feltlokasjon – Melkøysundtunnelen .....	70
9.2	Måleutstyr .....	71
9.3	Utførelse .....	71
9.4	Resultater.....	72
9.4.1	1. Målested.....	73
9.4.2	2. Målested.....	76
9.4.3	3. Målested.....	78
9.5	Sammenstilling av resultatene fra feltmålingene .....	81
9.5.1	Frostbeskyttende egenskaper ved WG Tunnelhvelv T100 .....	81
9.5.2	Temperaturforløpet og dens relevans til frostmengden .....	81
10	Konklusjon .....	82
	Referanser .....	84
	Vedlegg A.....	86
	Vedlegg B.....	90



## 1 Bakgrunn

Giertsen Tunnel AS leverer duk og membransystemer til vann og frostsikring av tunneler og bergrom. Før 2005 var WG Tunnelhvelv T100 godkjent for frostmengder opp til  $F_{10}=10.000$  h°C. I henhold til nye retningslinjer fra Vegdirektoratet pr 18.5.2005 er godkjenningen nedjustert til 3.000 h°C.

Giertsen Tunnel AS engasjerte SINTEF i 2006 for å dokumentere ved hjelp av teoretiske beregninger, WG Tunnelhvelv T100's egenskaper med hensyn til frostbeskyttelse (Moe et.al., 2007). Konklusjonen fra beregningene og simuleringene var at WG Tunnelhvelv T100 hadde en frostdempende effekt og hindret store temperaturvariasjoner.

Under arbeidet med de teoretiske beregningene for hvordan frosten utvikler seg gjennom konstruksjoner og berg, ble det satt spørsmålstegn ved frostmengdebegrepet og hvor egnet parameteren er til å beskrive behovet for frostbeskyttelse (Skistad, 2012).

I 2009 ble Frostlaboratoriet etablert gjennom et fellesprosjekt mellom jernbaneverket (JBV) og SINTEF. Etableringen av Frostlaboratoriet skyldtes at jernbaneverket ønsket å teste yt Mastersealkonseptet i Gjevingåstunnelen, og ønsket å dokumentere konseptets frostbestandighet. Resultatene fra første omgang med flere testkjøringer viste at den temperaturutviklingen i sprøytebetong og berg finner en likevekt uansett hvilken temperatur som settes på i "tunnelen". I tillegg viste systemet ingen "hukommelse" ved repeterte frostsykluser, men at fulgte den samme temperaturutviklingen ved hver frostsyklus.

Våren 2011 ble WG Tunnelhvelv T100 installert i Frostlaboratoriet, i et videre arbeid for å dokumentere konseptets egenskaper med hensyn til frostbeskyttelse. Fra og med juni 2011 frem til april 2012 foregikk flere ulike testkjøringer. Planleggingen av forsøk og oppfølging inngikk som en del av prosjektarbeidet til undertegnede høsten 2011.

## 2 Målsetning

Parameteren frostmengde [h°C] er med på å styre valget av frostbeskyttelse i tunneler. Hensikten med denne oppgaven er å rette fokus mot frostmengdebegrepet, og si noe om hvor dekkende begrepet er. Målsetningen med oppgaven omfatter også å videre dokumentere ut fra laboratorie og feltmålinger egenskapene til WG Tunnelhvelv T100 med hensyn på frostbeskyttelse.

### 3 Frostdimensjonering.

Det er viktig å sørge for frostbeskyttelse i tunneler som er utsatt for lave temperaturer, fordi alle tunneler inneholder vann i ulike mengder, i form av damp, væske og/eller is.

Problemene som oppstår når vann fryser i tunneler er mange. Is i vegbanen og isdannelse i hengen utgjør en reel sikkerhetsmessig fare. Isdannelsen bryter også ned de materialene og konstruksjonene som settes opp i tunnelen, og gjør at behovet for restaurering øker. I tillegg kan også problemer med frostsprengning i sprøytebetong og berg oppstå.

Klimaforholdene i Norge varierer fra kaldt og tørt innlandsklima til mildt og vått kystklima. For å beskrive de lokalklimatiske forholdene i et område, brukes frostmengdebegrepet. Frostmengden defineres som summen av antallet frosttimer gjennom en hel vinter, eller tidsintegralet av negative temperaturer over en hel vinter, med dimensjon  $h^{\circ}\text{C}$ , (Pedersen, 2002). Dimensjonerende frostmengde for valg av vann og frostsikring er  $F_{10}$ , som er den frostmengden som statistisk overskrides en gang hvert tiende år.

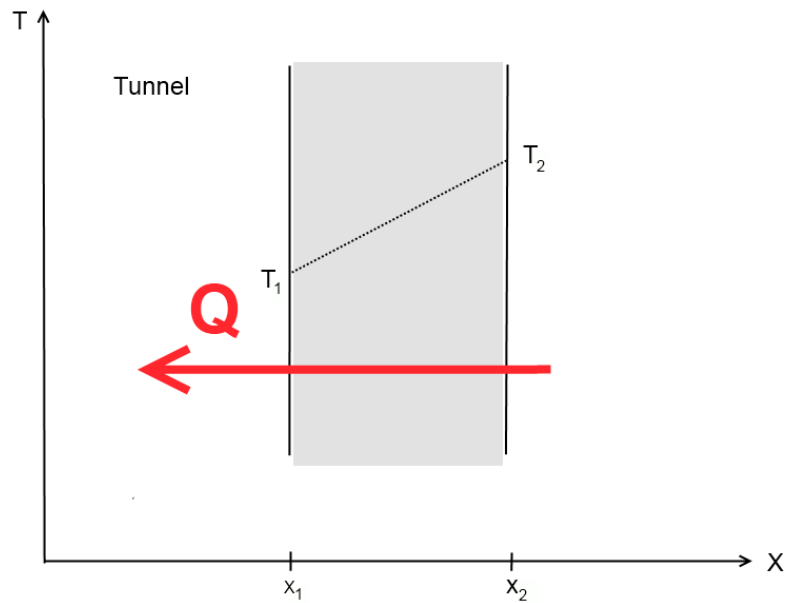
Ved valg av vann og frostsikringskonstruksjon i vegtunneler tas det hensyn til frostmengde, trafikkmengde, kjøretøyhastighet, tunnellengde, tunnelstandard, estetikk, krav til vedlikehold, økonomi og forventet levetid (Vegvesen, 2006). I følge internrapport 2301 er det ved dimensjonering av frostbeskyttelse i tunneler er det i første rekke penetrasjonsdybden av frostfronten som er interessant. Argumentasjonen for bruk av frostmengde skyldes de store variasjonene i temperaturer over landet, i tillegg til at det har vært vanlig å fokusere på temperaturtrendene gjennom hele året istedenfor å se på mindre variasjoner i temperatur, (Pedersen, 2002).

### 4 Varmeoverføringsteori

Varmeoverføringsteorien kan forklare prosessene som skjer i Frostlaboratoriet og i tunneler når temperaturen i tunnellufta synker. Varmeoverføring kan skje ved tre prosesser; stråling, varmeledning og konveksjon.

#### 4.1 Varmeledning

Teorien om varmeledning gjelder for alle medier der det finnes en temperaturforskjell  $\Delta T$  mellom en kaldere og en varmere side av et material. Temperatur og varmeoverføring henger sammen. Temperatur er en størrelse/skalar verdi. Varmeoverføring har en størrelse og en retning (vektor). Med stasjonær varmeoverføring menes en tilstand der det ikke skjer noen endringer i temperaturen med tiden innenfor et medium. Transient varmeoverføring betyr at temperaturen innenfor mediet varierer med tiden, eller er tidsavhengig (Thue, 2010).



**Figur 4-1 illustrasjon over varmestrømmen gjennom en flate med ulike overflatetemperaturer.**

Fourier's varmeledningsligning for endimensjonal strømningsretning (x-retning) (Thue, 2010):

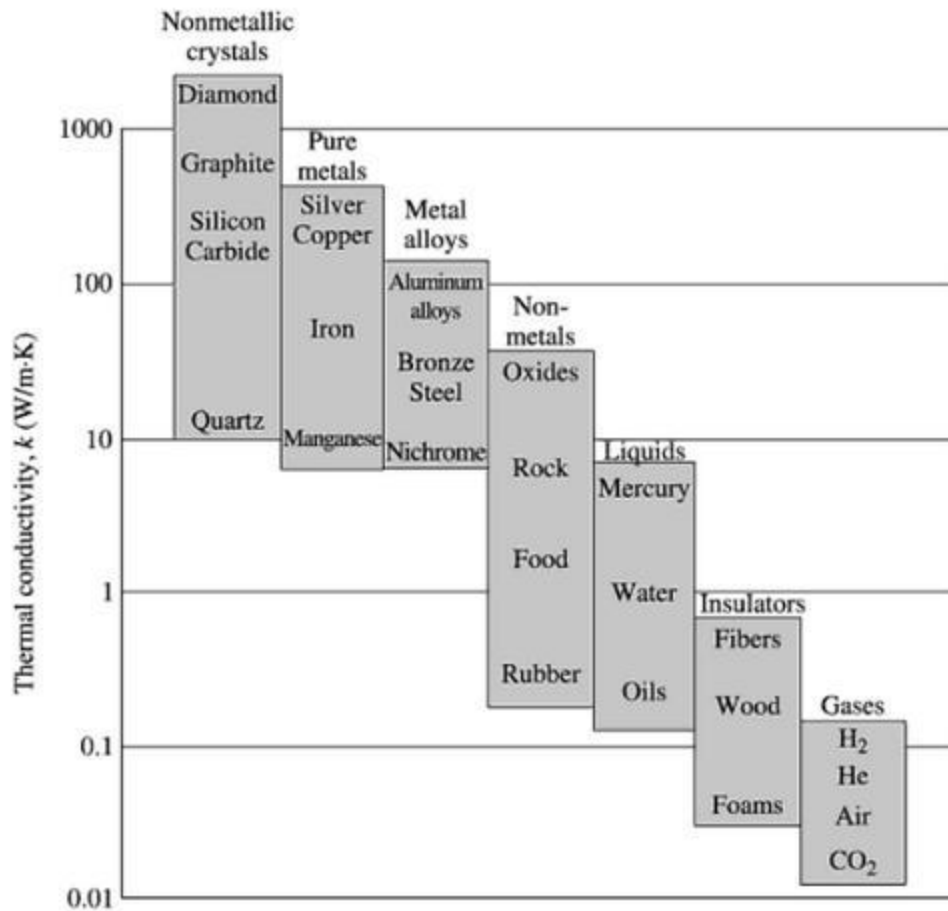
$$\Phi = kA \frac{dT}{dx} \quad [\text{W}] \quad (4-1)$$

$k$  = termisk konduktivitet [W/mK]

$A$  = areal vinkelrett på strømningsretning [ $\text{m}^2$ ]

$\Delta T$  = Temperaturforskjell over platen ( $T_2 - T_1$ )

$\Delta x$  = Tykkelse ( $x_2 - x_1$ )



Figur 4-2 Termisk konduktivitet for ulike materialer (Rathore & Kapuno, 2008).

#### 4.1.1 Varmedledning ved ikke-stasjonære forhold

I tilfeller når temperaturen varierer med tiden er det transiente/ikke-stasjonære temperaturforhold. Ut fra antagelser om at ingen varme genereres internt, og at den termiske konduktiviteten ( $k$ ) er konstant vil varmedledningstiligningen se slik ut (Thue, 2010):

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{c \cdot \rho}{k} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4-2)$$

$$a = \frac{k}{c \cdot \rho} \quad (4-3)$$

$a$  – termisk diffusivitet [ m<sup>2</sup>/s ]

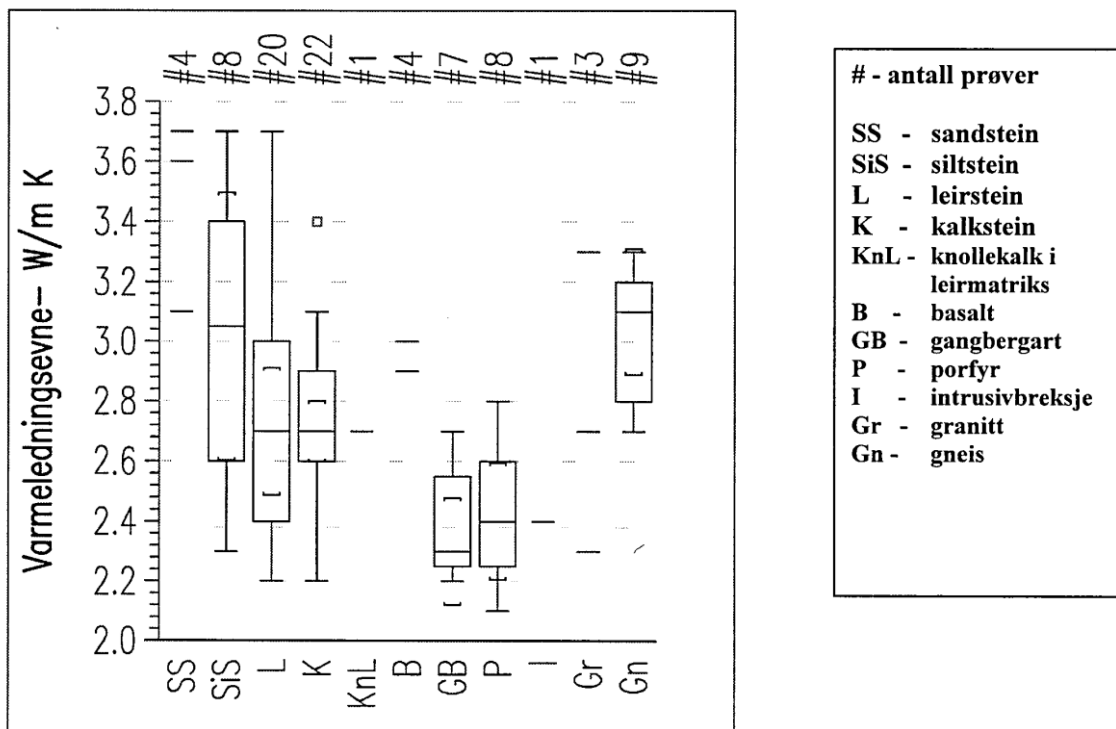
$c$  – Spesifikk varmekapasitet [ Ws/(kg K) ]

Ligning (4-4) er en andregradsligning hvor et ledd består av den deriverte av temperaturen med hensyn på tiden og et annet av den deriverte med hensyn på avstand (Thue, 2010). Det betyr at det finnes en sammenheng mellom tiden og avstanden.

#### 4.1.2 Varmedledning i berg

Varmedledning i berget avhenger av faktorer som temperatur, mineralogisk sammensetning og teksturelle faktorer (Clauser & Huenges, 1995). I et samarbeidsprosjekt mellom Norges vassdrags- og energidirektorat NVE og Norges geologiske undersøkelse NGU for å lære mer om grunnvarmepotensialet i fjell, ble det gjort tester på varmedledningsegenskapene til 87 bergartsprøver fra Lysaker-Sandvika området, (Midttømme & Hilmo, 2000). Det ble da funnet god korrelasjon mellom bergartenes varmedledningsevne og de tre materialparametrene: kvartsinnhold, bindingsstruktur og kornstørrelse. I tillegg ble det funnet at vannmettede prøver hadde opp til 10 % høyere varmedledningsevne.

Berggrunnens varmedledningsevne er primært knyttet til innholdet av kvarts, som er et av de mineralene med høyest varmedledningsevne. Ren kvarts kan ha en termisk konduktivitet over 6 W/m·K, og berggrunnen generelt vil ha en varmedledningsevne på 2 – 4,5 W/m·K (NGU, 2008). I bergarter med høy porøsitet som blant annet sandsteiner vil ledningsevnen i stor grad være styrt av type porefluid. Lagdelinger i bergarter gir ofte en bedre ledningsevne langs lagene, kontra på tvers av lagdelingen (NGU, 2008).



Figur 4-3 Varmedledningsevne til bergarter (Midttømme & Hilmo, 2000).

Bergart	Varmeledningsevne, W/mK
Granitt	3.5 ... 4
Gabbro	2.5 ... 3
Basalt	2.5 ... 3
Sandstein	3 ... 5
Kvartsitt	5 ... 7
Leirskifter	~2
Kalkstein	~2.5
Grønnstein/skifer	2.5 ... 3.5

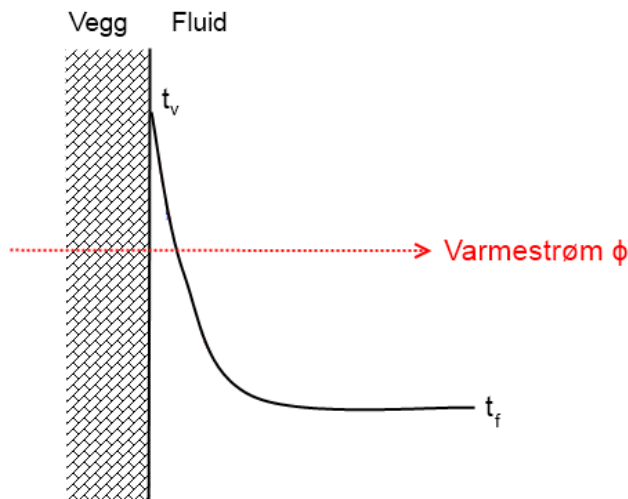
Figur 4-4 Varmeledningsevne i kjente bergartstyper (Pedersen, 2002)

## 4.2 Konveksjon

Konveksjon er energioverføring ved hjelp av sirkulasjoner og transport av fluid partikler. Molekylene i fluidet transporterer energien. Jo raskere molekylene forflytter seg, jo større energioverføring ved konveksjon.

Det finnes to ulike typer konveksjon; naturlig konveksjon og tvungen konveksjon. Naturlig konveksjon er frie bevegelser i fluidet som skyldes temperaturforskjeller. Tvungen konveksjon er tilfeller hvor det benyttes vifter eller omrøring for å få varmeoverføringen til å gå raskere, eller for å få en jevnere temperatur i fluidet.

Om vinteren når temperaturen i tunnellufta synker til under temperaturen i bergmassen, er det vanligvis berget som er den primære varmekilden. Dersom bergoverflaten er usikra vil tunnellufta nærmest berget varmes opp og stige opp langs veggen, og det vil oppstå en slags naturlig konveksjon. Vanligvis i tunneler så vil flere faktorer som trafikk, vifter og trekk føre til god sirkulasjon i tunnelen, slik at det vil vanligvis ikke være så store forskjeller i temperaturen.



Figur 4-5 Temperaturgradient ved konveksjon (Farstad, 2011).

Formel for varmestrøm ved konveksjon:

$$q = h(T_{vegg} - T_{fluid}) \quad (4-4)$$

q er varmestrøm [ $W/m^2$ ]

h er varmeoverføringskoeffisienten [ $W/m^2K$ ]

<i>Fluid flow condition</i>	<i>h (W/m<sup>2</sup> · K)</i>
Air (1 bar, free convection)	6–30
Air (1 bar, forced convection)	10–200
Water (free convection)	500–1000
Water (forced convection)	600–8000
Vaporization of water	2500–10,000
Condensation of steam	4000–25,000

Figur 4-6 Verdier for varmeoverføringskoeffisient for ulike fluider (Rathore & Kapuno, 2008).

### 4.3 Stråling

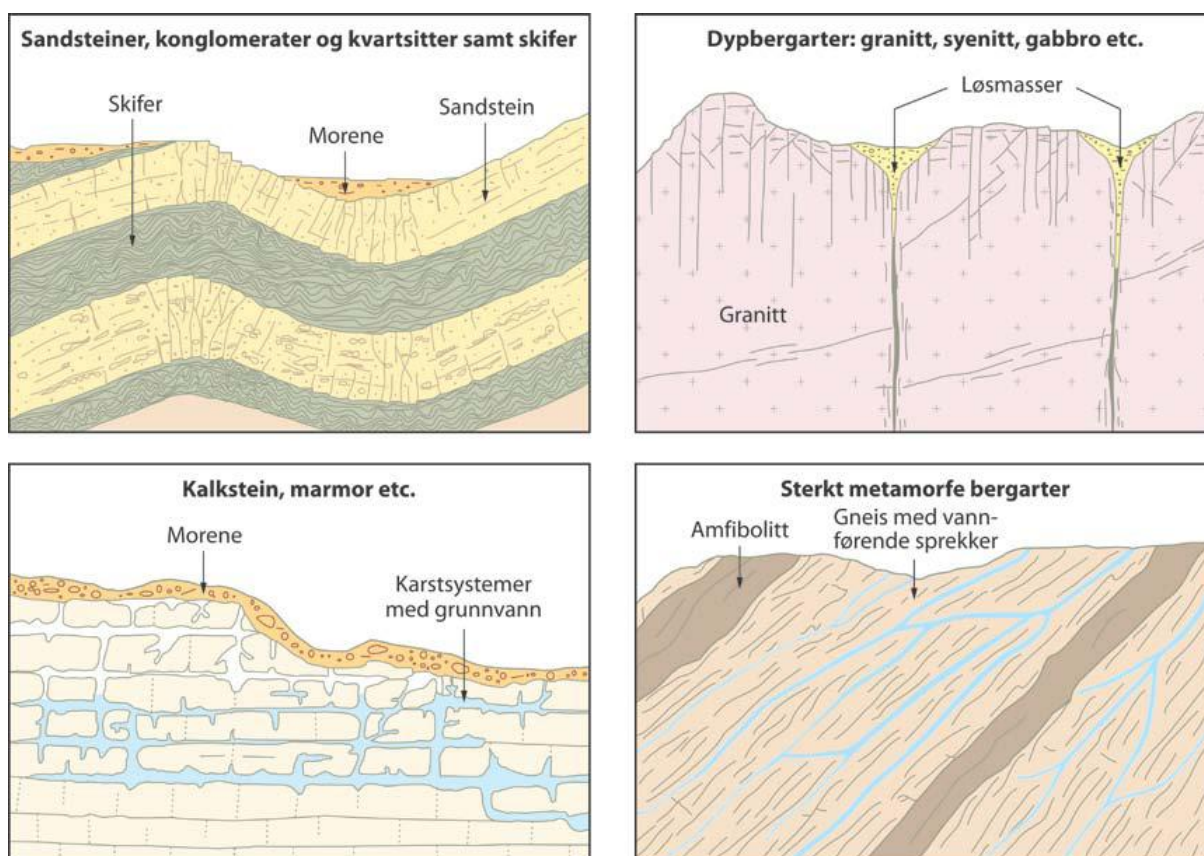
I tillegg til ledning og konveksjon kan varme også overføres ved stråling. I motsetning til ledning og konveksjon er ikke stråling avhengig av et "ledende" medium. Uavhengig av type medium (fluid, fast stoff eller gass) frigis energien ved endringer i elektronkonfigurasjon i molekyler (Rathore & Kapuno, 2008). Energien frigis i form av elektromagnetisk stråling fra overflaten til mediet. Enhver overflate som holder en temperatur over det absolutte nullpunkt sender ut elektromagnetisk stråling (Thue, 2010).

## 5 Vann i berg

Tunnelanlegg og underjordsdrift er utsatt for vann i form av væske, is eller gass.

Grunnvannsspeilet representerer den flaten i grunnen hvor det hydrostatiske trykket (porevannstrykket) er lik atmosfæretrykket (Brattli, 2009). Ovenfor grunnvannsspeilet ligger umettet sone, hvor vannet kan opptre i ulike mengder. Under grunnvannsspeilet ligger mettet sone, hvor alle porer er fylt med vann, og det hydrostatiske trykket er større enn atmosfæretrykket.

Grunnvannsspeilet følger topografien, og kan ligge et par meter under bakkenivå i fuktige klima til flere hundre meters dyp i tørre områder. Grunnvannet er i stadig bevegelse og strømmer fra et område med høy energi mot et område med lavere energi. Vann i berg kan strømme mellom porer eller i sprekker. Bergarter med ulike egenskaper har ulike evner til å lede vann, Figur 5-1. Sedimentære bergarter med høy porøsitet og mindre sprekker vil ha god vanngiverevne og lede vannet godt, mens krystallinske dypbergarter med lav porøsitet og varierende oppsprekning vil ha veldig varierende grad av vanngiverevne (Brattli, 2009).



Figur 5-1 Opprekningsgrad og sprekkekarakter for ulike bergarter (Gaut, 2011).



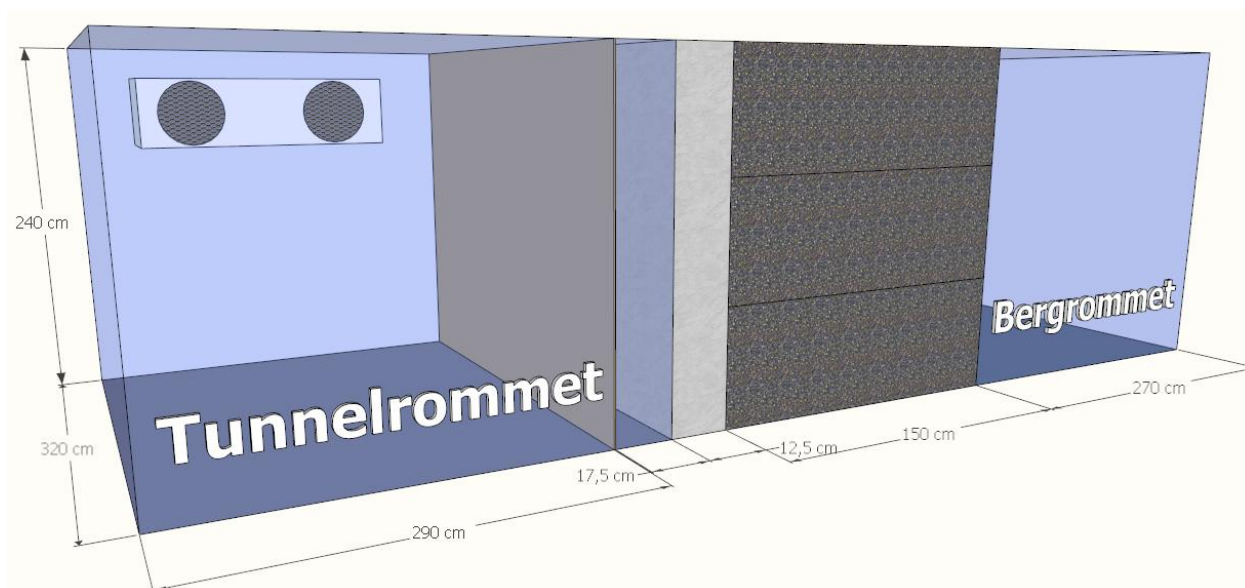
I all underjordsdrift kan det derfor antas at berget som ligger rundt konturen er helt eller delvis vannmettet. Når det sprenges ut en tunnel eller bergrom fra overflaten vil dette rommet ha atmosfærisk trykk. Omkringliggende vann under et høyere trykk vil derfor sive inn mot bergrommet.

## **5.1 Vannets betydning for varmeoverføring**

Det er enkelt å se for seg at varmeledningsevnen til en bergart med porer og hulrom vil øke dersom porene fylles med vann istedenfor luft. Det er også flere aspekter som kan belyses når det kommer til betydningen av vann i berg for varmeoverføringen.

Grunnvann og vann i berg bygger opp et trykk og vil hele tiden være i bevegelse mot et lavere trykknivå. Når en tunnel drives gjennom berget vil vann under trykk i omgivelsene strømme inn mot åpningen. Når vannet strømmer fra berget og ut mot åpningen transporterer vannet også varme. Siden vannet har høy varmekapasitet så frigis det energi til omgivelsene når vannet kjøles ned. Dette skjer når vannet strømmer fra et område lengre inne i berget hvor temperaturen er høyere mot tunnelåpningen. Dette kan ses på som en prosess hvor vannet i den grad den er tilstede i en tunnel kan være en faktor som tilfører varme.

## 6 Frostlaboratoriet



**Figur 6-1 Skisse av Frostlaboratoriet.**

Frostlaboratoriet ligger i hallen som SINTEF Kyst og havneteknikk disponerer i Trondheim. Monteringen av laboratoriet var ferdig vinteren 09/10. Den gang ble frostlaboratoriet satt opp i et samarbeid mellom Jernbaneverket og SINTEF Geologi og Bergteknikk med ønske om å teste frostbestandighet og vanntrykk til vann og frostsikringskonseptet BASF Masterseal345 (Vassenden, 2010). Videre i denne oppgaven beskrives enkelt oppbygningen av Frostlaboratoriet og en grundigere utdypning av hvor de ulike målepunktene plassert. For mer detaljert beskrivelse av Frostlaboratoriet henvises det til tidligere rapporter (Grøv & Vassenden, 2011), (Farstad, 2011).

### 6.1 Oppbygningen av Frostlaboratoriet

Frostlaboratoriet er bygd opp innenfor et isolert rom med målene (lxbxh ~7,5m x 3,2 m x 2,4m). En 1,5 meter lang vegg med Støren-granitt blokker skiller Tunnelrommet og Bergrommet, se Figur 6-1). Hvert av rommene er det montert et kjøleaggregat for å styre temperaturen. Kjøle-/fryseaggregatet i Tunnelrommet har kapasitet til å bringe temperaturen ned til -20 grader. Temperaturen i Bergrommet holdes konstant ved ca +8 grader.

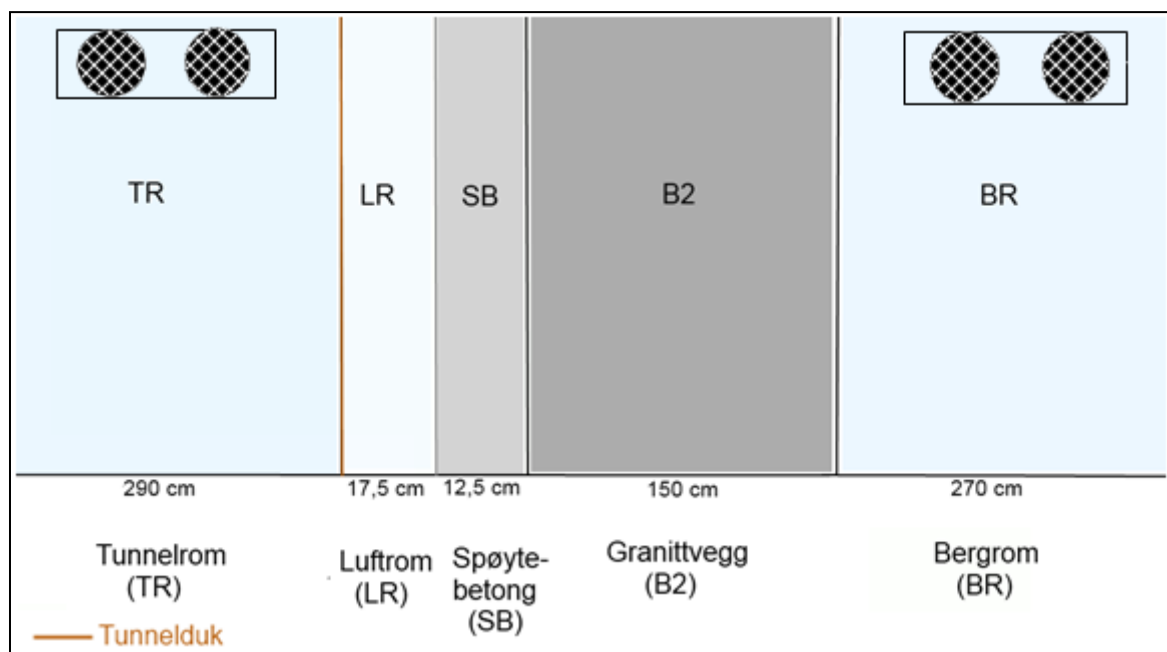
Granittveggen består av 12 blokker (bredde, høyde, lengde = 80x80x150 cm) med Støren-granitt. Mot Tunnelrommet er granittveggen dekt av to lag med 60 mm fiberarmert sprøytebetong, med et lag av Masterseal 345 på 4-5 mm mellom. Dette var slik Frostlaboratoriet var bygd opp under testing av Masterseal 345. Våren 2011 ble Giertsen Tunnelhvelv T100 er montert opp med ca. 10 cm luftrom mellom duken og sprøytebetongen.

## 6.2 Målepunktene i Frostlaboratoriet

I Frostlaboratoriet er det montert opp 74 temperaturmålere, Tabell 6-1. Alle temperaturene måles med termoelementer, for mer informasjon om dette vises det til tidligere rapporter (Vassenden, 2010), (Farstad, 2011). Alle resultatene fra Frostlaboratoriet lagres i en datamaskin som står i Bergrommet. Det lagres måleravlesninger for alle sensorene hvert tiende minutt. Denne avlesningen er et gjennomsnitt av totalt 16 målinger som gjøres i intervallet mellom hver logging.

Målepunkt/Sensorplassering	Antall sensorer
Tunnelrom. Rett under kjøleaggregatet, Figur 6-1.	1
Bergrom. Nær blokk A1, B1 og C1.	1
Granittvegg. Se 6.2.1	60
Sprøytebetong. Se 6.2.2	5
Luftrom. Se 6.2.3	7
<i>Totalt antall sensorer</i>	74

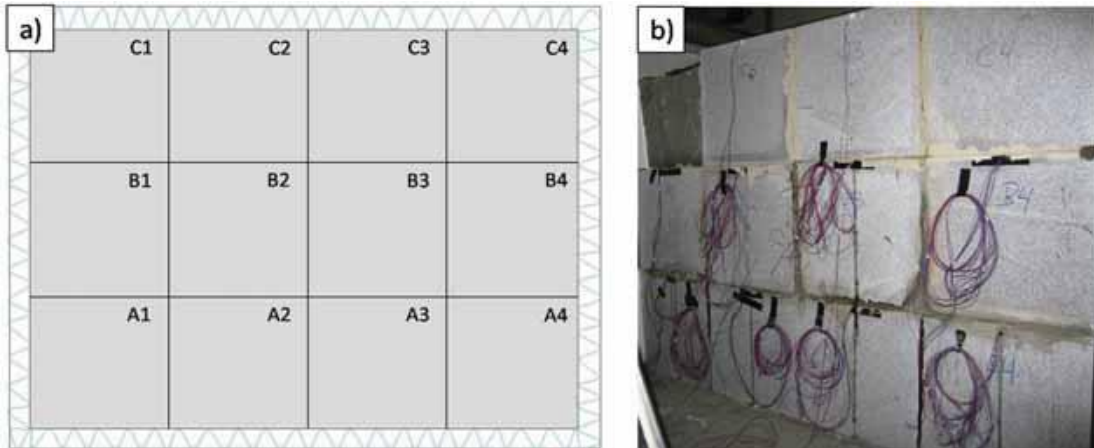
Tabell 6-1 Oversikt over målepunkter i Frostlaboratoriet.



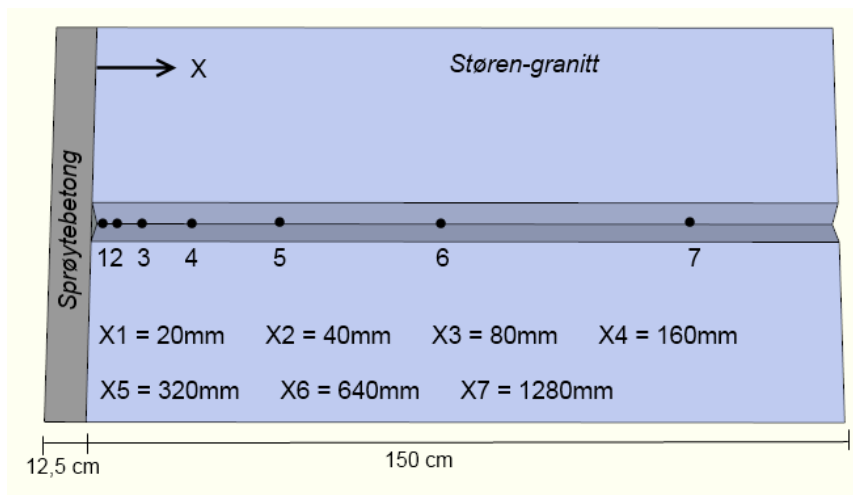
Figur 6-2 Lengdeprofil av Frostlaboratoriet.

### 6.2.1 Målepunkter i Granittblokkene

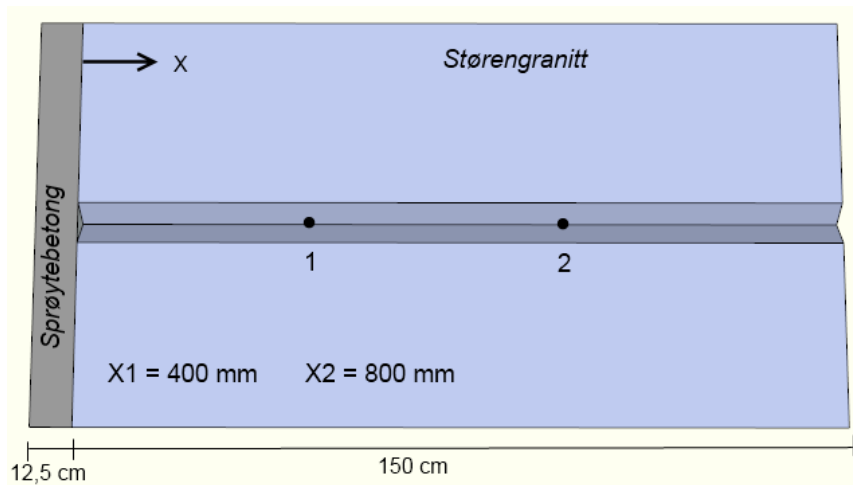
I Støren-granitten er det montert 60 temperatursensorer. Blokkene er nummererte fra A-C i høyden og fra 1-4 i bredden, Figur 6-3. A og B blokkene har 7 målepunkt i hver blokk med ulik plassering, (Figur 6-4). Alle blokkene er skjært ut med en langsgående sliss, og sensorene er plassert 60 mm ned fra sliss i rørformede hull med 6 mm diameter. Blokkene C2 og C3 har 2 målepunkt i hver blokk. Sensorene i C-blokkene er plassert i hull som er boret 300 mm ned fra sliss (Vassenden, 2010).



Figur 6-3 a) Granittveggen med nummerering av blokker sett fra Bergrommet. b) Fotografi fra monteringen av blokkene sett fra Bergrommet. (Foto: SINTEF Geologi og Bergteknikk) (Vassenden, 2010).



Figur 6-4 Plassering av målepunkt langs slissen til A- og B-blokkene.

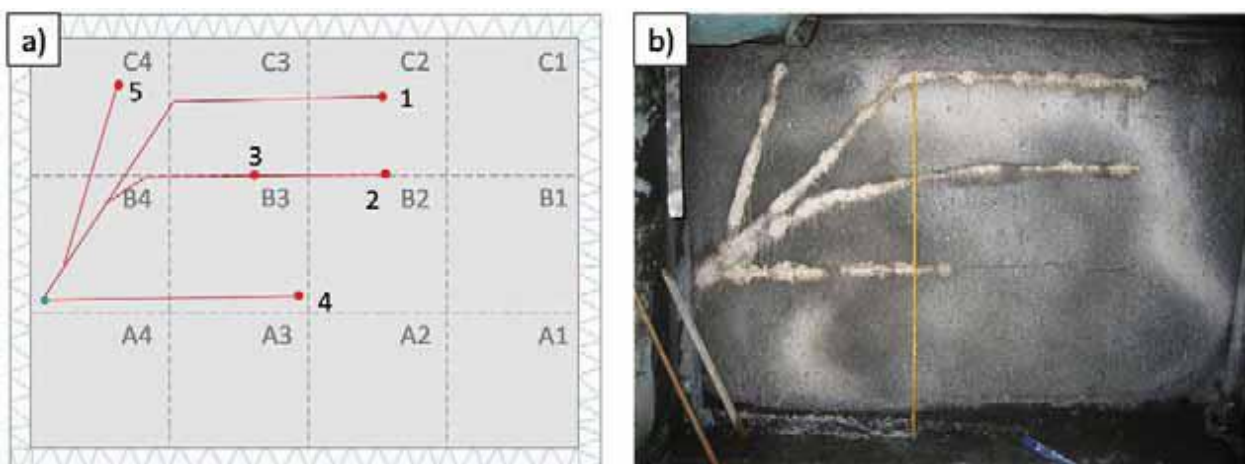


Figur 6-5 Skisse av plassering av målepunkter i blokkene C2 og C3.

## 6.2.2 Målepunkter i sprøytebetongen

Det er montert 5 temperatursensorer i sprøytebetongen. Sprøytebetongen består av 60 mm fiberarmert sprøytebetong, 4-5mm Masterseal345, dernest et siste lag med 60 mm fiberarmert sprøytebetong. Totalt utgjør dette ca 125 mm. I vegtunneler settes er det krav om minimum 80 mm (Vegvesen, 2010). Tykkelsen stemmer derfor godt overens med dagens krav og kan derfor sammenlignes med en vanlig vegtunnel på dette området.

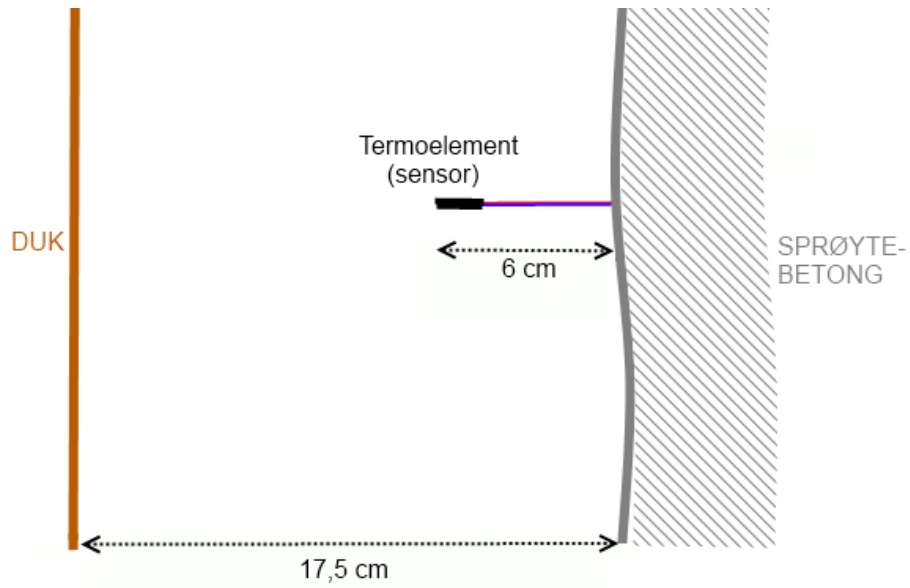
Temperatursensorene i sprøytebetongen ble plassert over det første laget med 60 mm sprøytebetong. Sensorene ble deretter sprutet inn med Masterseal. Videre ble det sprøytet nye 60 mm sprøytebetong utenpå. Sensorene i sprøytebetongen er spredt ut over veggen, Figur 6-6.



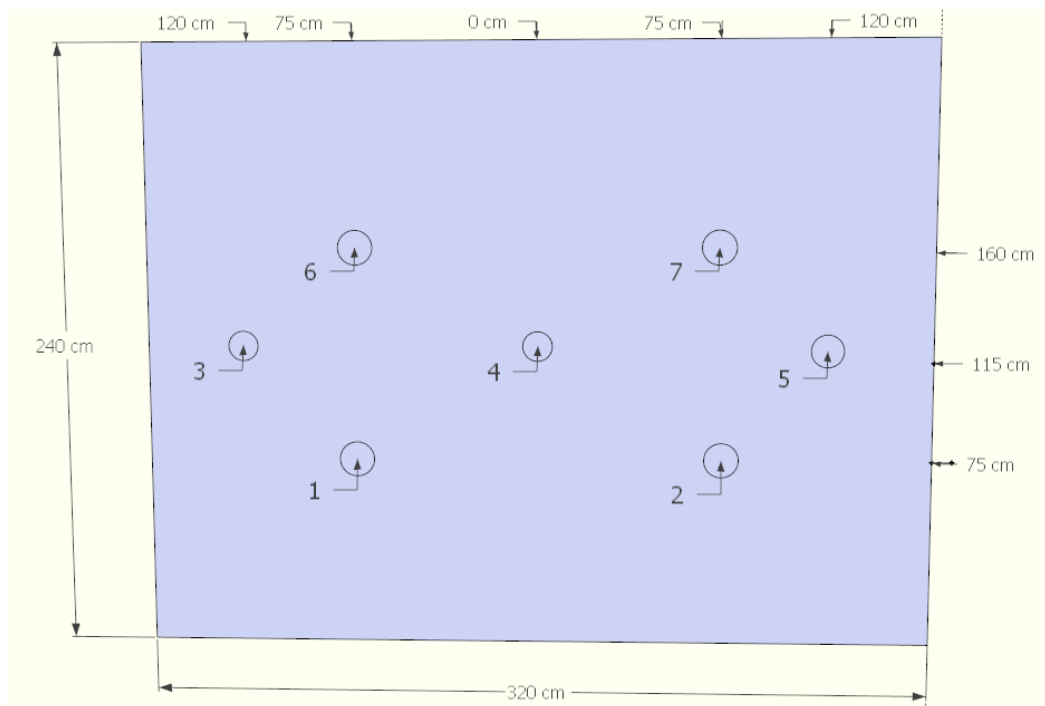
Figur 6-6 Plassering av temperatursensorer i sprøytebetongen sett fra Tunnelrommet(Vassenden, 2010).

## 6.2.3 Målepunkter i luftrommet

Våren 2011 ble vann og frostsikringskonseptet T100 ferdig montert av Giertsens eget personell i Frostlaboratoriet. Duken er festet langs kantene, og montert slik at det er ca 17,5 cm mellom duk og sprøytebetong (etter målinger gjort av Trond Larsen og Anne Mari Farstad 23.4.12). Det er satt opp 7 temperatursensorer i luftrommet mellom duken og sprøytebetongen. Termoelementene ble festet i skruer som var satt inn i sprøytebetongen, og er festet slik at sensoren ligger ca 6 cm utenfor sprøytebetongen, Figur 6-7. Plasseringen av sensorer i breddeprofilen er vist i Figur 6-8.



**Figur 6-7 Plasseringen av temperatursensorer (termoelement) i luftrommet bak duken, lengdeprofil.**



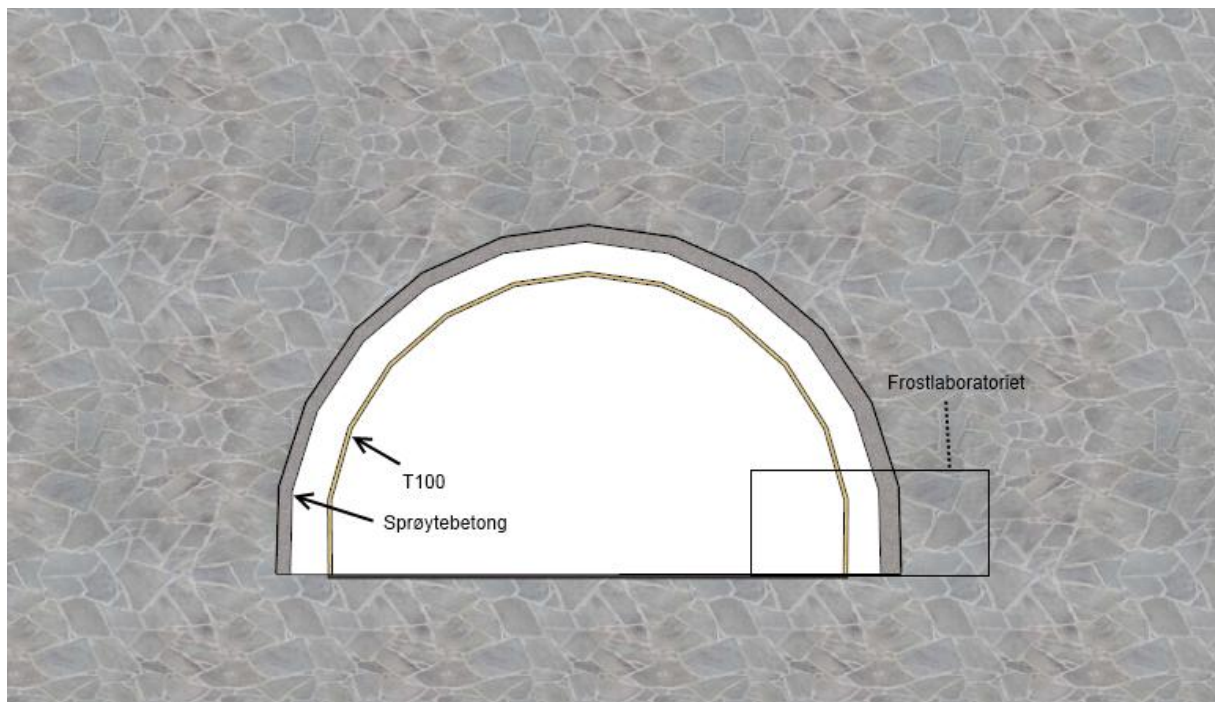
**Figur 6-8 Markering av temperatursensorene i luftrommet bak duken sett fra Tunnelrommet (Farstad, 2011).**

### 6.3 Testvilkår

Laboratoriemålinger gjøres under kontrollerte forhold innendørs, med kjente rammebetingelser. Fordelen ved laboratoriet er at ulike faktorer/forhold som for eksempel temperatur kan styres etter ønsket forsøk. En svakhet med frostlaboratoriet er at det gjenspeiler en forenklet del av virkeligheten. Før tolkning av resultatene fra Frostlaboratoriet er det viktig å vite hvilke antagelser og betingelse som må tas i betraktning.

I frostlaboratoriet kjøres alle testene med tørre betingelser. Det vil si at sprøytebetong, granittblokkene og lufta inneholder ikke vann i noen annen form enn som den luftfuktigheten som er på stedet. I realiteten finnes det alltid vann i et bergrom i form av væske, gass eller is. Vannmengden varierer fra sted til sted. Vannets betydning for varmeoverføring er nevnt nærmere i kapittel 5.

Et annet moment som er viktig å ta hensyn til er at bergmassen rundt en tunnel er enorm, og i enkelte retninger uendelig masse. Frostlaboratoriet er et lite utsnitt av hele bildet, Figur 6-9. Bergmassen i Frostlaboratoriet består av 12 blokker med et kjent volum. Siden frostlaboratoriet er godt isolert for å unngå varmeoverføring med omgivelsene, antas det at varmestrømmen fra Bergrommet (BR) mot Tunnelrommet (TR) skjer i horisontalplanet gjennom granittblokkene. I realiteten kan varmeoverføringen foregå i alle retninger.



Figur 6-9 Tunnelprofil i en uendelig bergmasse, med utsnitt av den delen Frostlaboratoriet i teorien skal representere.

## 6.4 Planlegging og gjennomføring av forsøk i Frostlaboratoriet

Første forsøk med WG Tunnelhvelv T100 startet opp sommeren 2011 og ble avsluttet i slutten av august. Videre planlegging og gjennomføring av forsøkene ble gjort gjennom et prosjektarbeid som pågikk høsten 2011 (Farstad, 2011). Siste forsøk ble avsluttet i april 2012. Bakgrunnen for planleggingen av forsøkene var i første omgang tidligere beregninger og simuleringer fra et tidligere prosjekt av SINTEF Byggforsk utgitt i 2007 (Wachenfelt, Skistad, & Moe, 2007). Det ble da beregnet hvor stor kuldebelastning T100-konseptet kunne tåle for å oppnå en frostmengde bak duken på 3 000 h°C. Ulike temperaturlastninger og responser ble simulert og begrunnet.

Fra tidligere er det gjort flere forsøk med Masterseal 345 i Frostlaboratoriet (Grøv & Vassenden, 2011). Det ble derfor planlagt nye forsøk fra januar til april 2012 som i hovedsak hadde bakgrunn i at de skulle etterligne forsøkene som ble gjennomført med Masterseal 345. Tanken bak disse forsøkene var at de skulle gi gode grunnlag for å gjøre en sammenligning av temperaturutvikling og respons hos de ulike systemene.

## 6.5 Terminologi

Før presentasjon av resultatene i Frostlaboratoriet er det hensiktsmessig å innføre enkelte begrep og uttrykk som vil bli brukt.

### Sluttemperatur, $T_s$ [°C]

For alle forsøk med jevn temperatur i Tunnelrommet blir det regnet ut gjennomsnittstemperatur for de siste døgnene i forsøket. Snittemperatur over døgnet vil bli regnet ut for Luftrommet, Sprøytebetongen og for representativ granittblokk.

### Stagnasjonstemperatur, $T_{st}$ [°C]

I forsøk som blir gjort med jevn temperatur i Tunnelrommet over så lang tid at temperaturen i elementene rekker å flate ut mot en stabil temperatur vil stagnasjonstemperaturer bli presentert. I denne oppgaven innføres begrepet stagnasjonstemperatur for de tilfellene der temperaturen i elementene (Luftrom, sprøytebetong og granittvegg) ikke har større variasjoner fra enn 0,1 °C de siste tre dagene. Verdien 0,1 °C over tre døgn representerer en veldig lav temperaturforskjell, men det blir tatt høyde for at det kan skje en liten endring siden temperaturen i Tunnelrommet svinger noe på grunn av at kjøleaggregatet slår seg av og på.

### 90 % stagnasjon, $T_{90}$ [°C]

Fra tidligere forsøk i Frostlaboratoriet er det målt at temperaturvariasjonene mot slutten bare blir mindre og mindre. Siden det tar veldig lang tid før fullstendig utflating, er det valgt å si at tidspunktet for utflating skjer ved oppnådd 90 % av stagnasjonstemperatur. 90 % stagnasjon innføres for å kunne si noe om når utflating skjer. Etter å ha regnet ut 90 %



stagnasjon, leses det av hvor mange døgn det tar før temperaturen når denne verdien. Det er tidsparameteren som blir brukt, og ikke selve temperaturverdien. 90 % av stagnering regnes ut på følgende måte:

$$T_{90} = T_0 - (T_0 - T_{st}) * 0,9$$

, der starttemperaturen =  $T_0$ , stagnasjonstemperaturen =  $T_{st}$ .

Ved denne formelen tas det hensyn til om stagnasjonstemperaturen er positiv og negativ. Fordelen med å regne ut stagnering på denne måten er at ved mindre temperaturforskjeller blir 90 % av stagnasjonstemperaturen omtrent den samme som stagnasjonstemperaturen. I de tilfellene stagnasjonstemperaturen faller under  $-10^{\circ}\text{C}$  vil forskjellen mellom  $T_{st}$  og  $T_{90}$  være under  $2^{\circ}\text{C}$ . Ved så lave temperaturer vil det ikke spille like stor rolle om temperaturen er  $-12$  eller  $-14$  for frostdannelsen.

### **Tid før 90 % stagnasjon, $t_{90}$ [døgn]**

For alle forsøk med jevn temperatur der det oppgis 90 % stagnasjonstemperatur, gjøres det en vurdering av når 90 % stagnasjonen oppnås. Dette er oppgitt som "tid før 90 % stagnasjon"  $t_{90}$ , og blir brukt for å gi et inntrykk av når utflatingen av temperatur skjer.

### **Frostmengde, F [ $h^{\circ}\text{C}$ ]**

Frostmengde er summen av temperaturer under  $0^{\circ}\text{C}$  over et bestemt tidsintervall gitt i timer. For nærmere beskrivelse av parameteren vises det til undertegnede s prosjektoppgave, (Farstad, 2011).

Frostmengdene vil bli regnet ut for alle forsøk. Det vil bli regnet ut total frostmengde foran og bak T100. I tillegg blir det funnet ut hvor lang tid og ved hvilken frostmengde i tunnelrommet det oppnås  $3000 h^{\circ}\text{C}$  bak T100. Statens Vegvesen bruker verdien  $3000 h^{\circ}\text{C}$  som en grense for når det er behov for å isolere berget fra tunnellufta. Det er derfor regnet ut hvor stor frostmengde som skal til i Tunnelen for å oppnå  $3000 h^{\circ}\text{C}$  bak T100. Denne måten å presentere resultatene på ble også benyttet etter simuleringene av WG Tunnelhvelv T100, (Moe et.al., 2007).

For å regne ut frostmengdene blir funksjonen "summerhvis" i Microsoft Excel benyttet. Dette er en funksjon som summerer opp alle cellene i en kolonne som tilfredsstiller de betingelsene som settes. I dette tilfellet brukes betingelsen for summering at temperaturen i cellen skal være lavere enn 0 ( $<0$ ). Siden dataprogrammet logger temperaturer i hver celle for hvert tiende minutt, så deles hele summen på seks.

Eksempel på funksjon for utregning av frostmengde i Excel:

$$=(SUMMERHVIS(D1:D15;"<0"))/6$$

## 6.6 Oversikt over gjennomførte forsøk

### 1. Forsøk F1.

Første test av WG Tunnelhvelv T100 gikk ut på å teste responsen på en stor frostbelastning over tid. Det ble planlagt å gjennomføre testen med jevn temperatur på  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  i Tunnelrommet over 20-21 dager. Starttemperaturen skulle ligge på  $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Fordelen med testen er at den kan gi grunnlag for å si noe om hvordan temperaturlansen i systemet utvikles over tid, og ta med disse erfaringene inn i planleggingen av nye forsøk.

### 2. Forsøk F-2.

Det andre forsøket skulle bestå i å teste  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  over en to ukers periode. Etter å ha gjennomført et forsøk med temperatur på  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , var det nå et poeng å gjennomføre en test med en temperatur like under  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  i Tunnelrommet. Fordelen med denne testen er at den er en kontrast til forsøk F-1, og gir forhåpentligvis svar på hvordan temperaturen i elementene i Frostlaboratoriet responderer på en lavere temperaturlastning over tid.

### 3. Forsøk F-3

Dette forsøket er det første av tre forsøk som skulle etterligne simuleringer og beregninger gjort med WG Tunnelhvelv T100 tidligere. Et av scenarioene bestod i sinussvingninger mellom  $0$  og  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  over døgnet. Det ble planlagt å benytte steglaster mellom  $0$  og  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  med 24 timers mellomrom, av praktiske årsaker.

### 4. Forsøk F-4

Dette forsøket er det andre forsøket i rekken som ble planlagt for å etterligne de teoretiske beregninger og simuleringer fra tidligere. I simuleringen ble det brukt med sinuskurver mellom  $-10$  og  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  over døgnet. Forsøk F-4 ble planlagt med steglaster fra  $+10$  og  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  med 24 timers mellomrom. Forsøket etter planen gjennomføres etter 11-12 dager.

### 5. Forsøk F-5

Det femte forsøket var planlagt å være det siste forsøket i rekken av tre som skulle etterligne simuleringer og beregninger. Forsøket skulle gjennomføres med en jevn temperaturlastning på  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , med starttemperatur på  $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . I simuleringene ble testen kjørt til  $3000\text{ h}^{\circ}\text{C}$  var oppnådd bak duken, som tok 23 døgn. I dette forsøket ble det planlagt å kjøre testen i to perioder på 2 og 4 uker med jevn temperatur på  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  i Tunnelrommet. Fordelen med å kjøre to perioder er å teste om temperaturforløpet er helt likt hver gang, og hvilke konsekvenser tiden har i dette tilfellet.

## 6. Forsøk F-6

Neste prioritet ved planleggingen å gjennomføre forsøk som ligner de som var gjort i Frostlaboratoriet uten T100. Forsøk F-6 skulle etterligne en test fra tidligere med steglaster mellom -3 og -1 °C, (Grøv & Vassenden, 2011). Den gangen ble forsøket kjørt med 12 timers mellomrom mellom steglaster, mens i dette tilfellet ble det brukt 24 timer av praktiske hensyn.

## 7. Forsøk F-7

Etter å ha gjennomført flere tester med langvarige kuldebelastninger på -15, -10 og -2,7 °C ble det nå planlagt å gjøre en test med langvarig kuldebelastning som lå et sted mellom de testene som allerede var gjort. Det var nå ønskelig å teste ut en lengre periode med -6 °C. Forsøket skulle starte med steglaster mellom +8 og -6 °C med økende mellomrom, inntil det mot slutten skulle legges inn en lengre periode med jevn temperatur på -6 °C. Fordelen med en slik test er at den kan bekrefte at temperaturforløpet er likt hver gang temperaturen skiftes fra +8 til -6°C.

# 7 Resultater fra Frostlaboratoriet

Resultatene fra Frostlaboratoriet fremstilles grafisk ved bruk av Excel diagramverktøy. Ved de grafiske presentasjonene av resultatene er det gjort forkortelser av målernavn. Nærmere beskrivelse av målernavn i den grafiske resultatfremstillingen finnes i Tabell 7-1.

Vedleggene vil alltid inneholde rene resultater som ikke er bearbeidet på noe vis for alle forsøkene. Dersom noen resultater er bearbeidet/forenklet i vedleggene det beskrevet i teksten.

Det første forsøket (F-1) inneholder ekstra analyser siden det er den første testen med ny installasjon. Forsøk F-1 blir også brukt til å finne en god måte å presentere dataene videre.

Beskrivelse av ulike sensornavn til grafisk resultatfremstilling			
Målerplassering	Antall sensorer	Grafisk navngiving	Figurbeskrivelse
Granittblokk A2	7	A21, A22,..., A27	Figur 6-3 og Figur 6-4
Granittblokk A3	7	A31, A32,..., A37	Figur 6-3 og Figur 6-4
Granittblokk B2	7	B21, B22,..., B27	Figur 6-3 og Figur 6-4
Granittblokk B3	7	B31, B32,..., B37	Figur 6-3 og Figur 6-4
Sprøytebetong	5	SB1, SB2,..., SB5	Figur 6-6
Luftrom	7	LR1, LR2,..., LR7	Figur 6-8
Tunnelrom	1	TR	Figur 6-1
Bergrom	1	BR	Figur 6-1

Tabell 7-1 Forklaring til grafisk resultatfremstilling

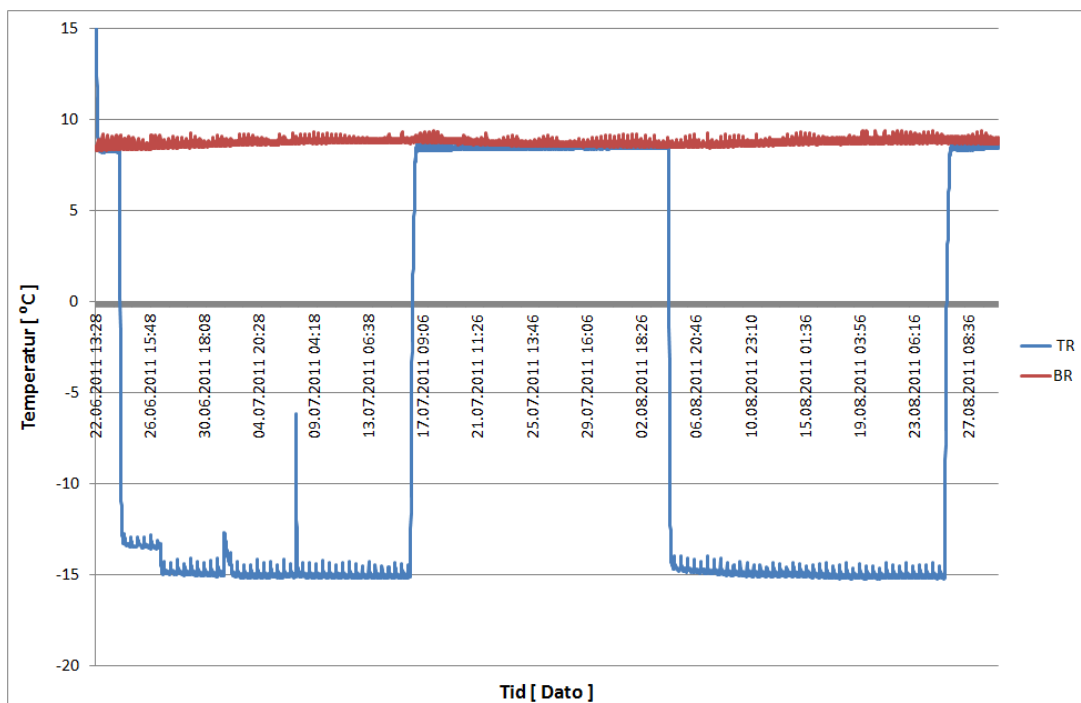
## 7.1 Forsøk F-1

Det første forsøket ble satt i gang rundt 22.06 og avsluttet den 28.08 sommeren 2011. Forsøket ble gjort for å teste effektene av en stor frostbelastning med en lav temperatur over lengre periode. Totalt ble det kjørt to frostperioder med temperaturer i Tunnelrommet ned til  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Den første kuldeperioden varte i 24 dager og den andre i 20. Mellom periodene lå temperaturen i Tunnelrommet på  $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$  i 19-20 dager.

Kuldeperiodene er ikke identiske som det kommer frem i Figur 7-1. I den første perioden ligger temperaturen i Tunnelrommet på  $13\text{--}13,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  i et par dager, før temperaturen så blir justert ned til  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dette er fordi sensoren i Tunnelrommet måler en høyere temperatur enn den kjøleaggregatet stilles inn på. Derfor ble kjøleaggregatet videre justert ned til en lavere temperatur etter et par dager for å få ønsket temperatur i Tunnelrommet.

Frostmengden per dag med jevn temperatur på  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  er  $360\text{ h}^{\circ}\text{C}$ . I den første kuldeperioden ble det registrert en frostmengde på  $7688\text{ h}^{\circ}\text{C}$ , i den andre perioden ble det registrert  $7419\text{ h}^{\circ}\text{C}$ . Frostmengden summert opp for hele forsøket er på  $15108\text{ h}^{\circ}\text{C}$ .

Siden dette er det første forsøket blir alle elementene (Luftrom(LR), Sprøytebetong(SB), Granittblokk (B2) inndelt i egne underkapitler for å kommentere hvilke typiske effekter og trender som går igjen. Dette blir bare gjort i forsøk F-1.



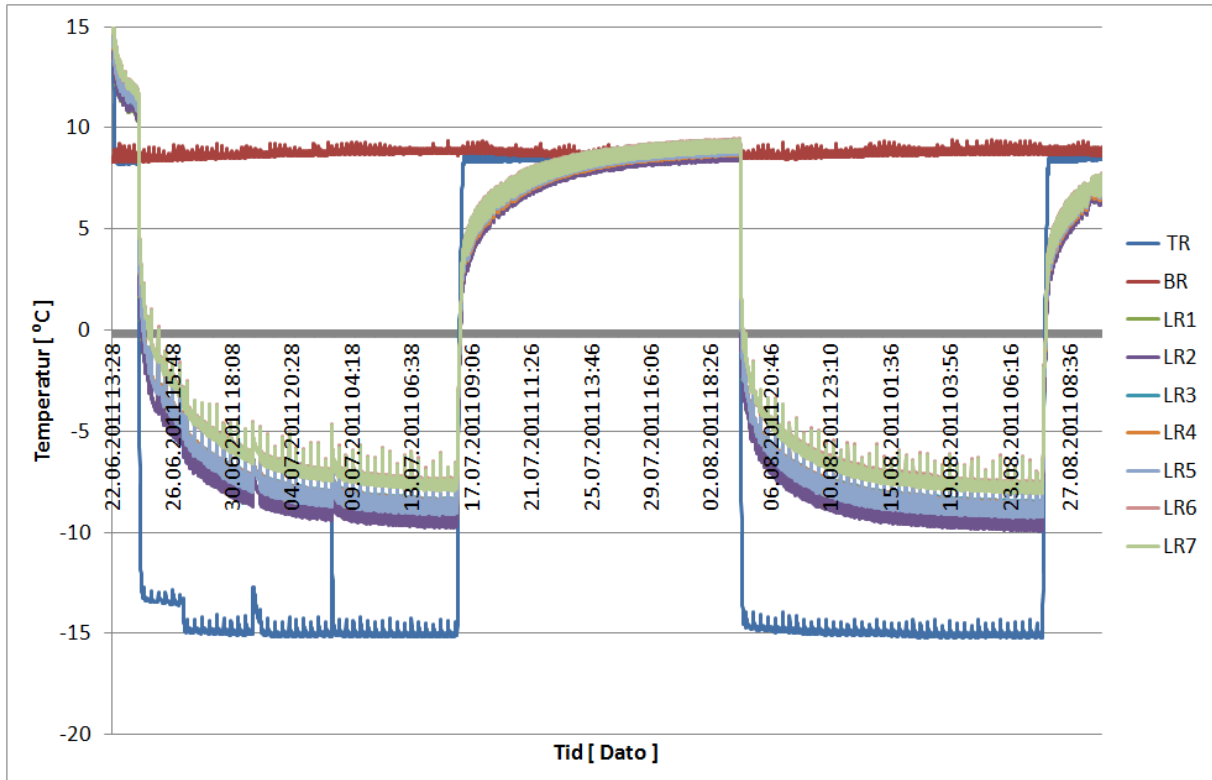
Figur 7-1 Temperatur i Tunnelrom (TR) og Bergrom (BR) i Forsøk F-1.

### 7.1.1 Resultater fra Luftrommet

Dette forsøket er en første test på hvordan sensorene i luftrommet bak duken fungerer. Om alle sensorene fungerer likt eller om det er noen som skiller seg ut. Det viser seg at sensorene i Luftrommet følger de mindre temperaturskiftningene i Tunnelrommet som følge av at kjøleaggregatet slår seg av og på, Figur 7-2. For å gjøre grafene enklere å lese ved å unngå "støyen" fra kjøleaggregatene er det gjort gjennomsnittsberegning av temperaturen etter hver fjerde time for sensorene i Luftrommet, Tunnelrommet og Bergrommet i den grafiske fremstillingen, Figur 7-3. Dette kun brukt for å gjøre grafene lettere å lese, og blir ikke brukt under beregning av frostmengde eller under måling av maks. og min. temperatur. Trendlinjen for gjennomsnittet hver 4. time vil bli brukt videre i den grafiske fremstillingen i resten av forsøkene. I vedlegg A ligger de grafiske resultatene fra luftrommet uten gjennomsnittsberegning for alle forsøkene.

Den første kuldeperioden som ble gjennomført lå et par dager på rundt  $-13,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  og ble deretter justert ned til  $-15$ . I tillegg skjedde det to mindre avbrudd i nedkjølingen fra Tunnelrommet rundt den 2.7.2011, og den 7.7.2011, som slår tydelig ut i de uberørte dataene(Figur 7-2) og som også viser seg i de støyreduerte fremstillingene (Figur 7-3). Dette viser at gjennomsnittsberegningen og "støyredueringen" ikke fjerner viktige endringer i temperaturen.

Steglastene ned til  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  er ikke identiske, men det viser seg i løpet av begge steglastene oppnås en utflating av temperatur i luftrommet, og temperaturen stagnerer mot samme temperatur i begge syklusene.

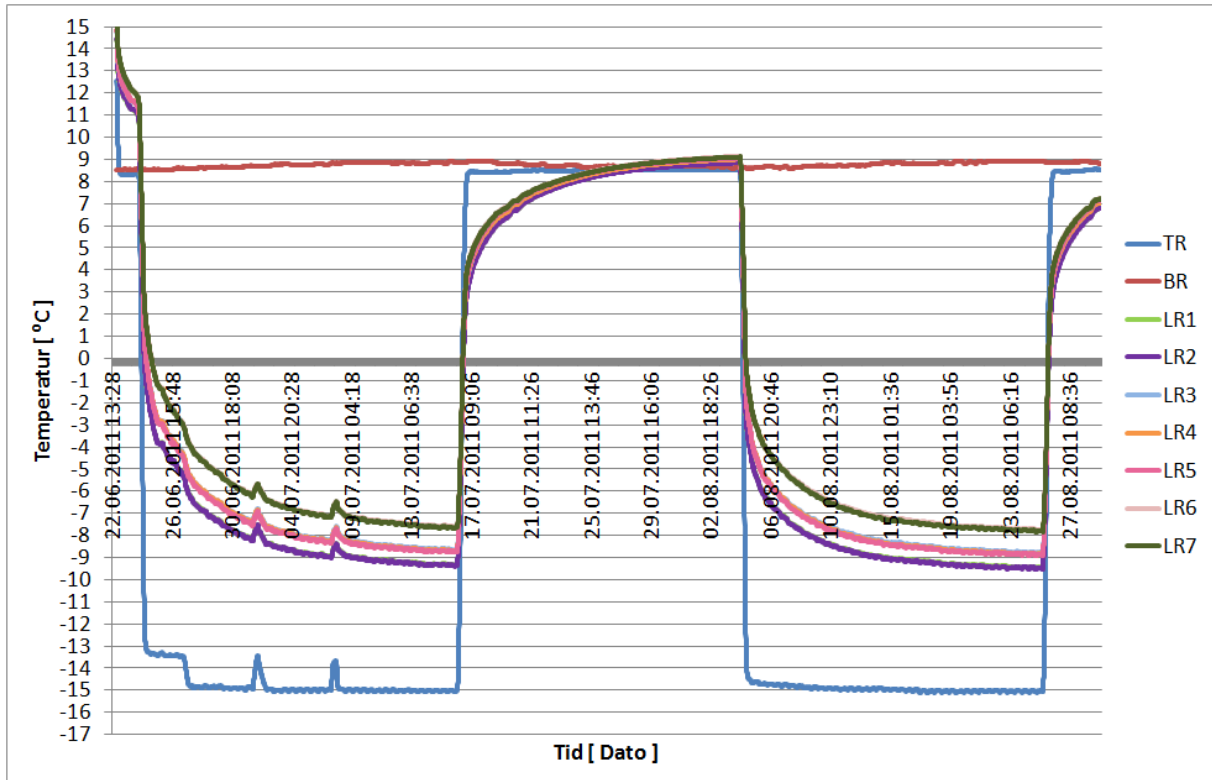


**Figur 7-2 Resultatene fra Tunnelrommet (TR), Bergrommet (BR) og Luftrommet (LR).**

Noe av det første skjer når temperaturen i Luftrommet synker under 5°C er at temperaturene i de ulike høydenivåene blir forskjellige, Figur 7-2. I forsøk F-1 er differansen mellom temperaturen som måles ved høyde 160 cm (LR160) omtrent 1,8 - 2 °C høyere enn ved 75 cm (LR75) høyde, Figur 7-3. Når temperaturen i Tunnelrommet justeres opp til 8 °C igjen, skjer oppvarmingen av luftrommet raskere enn nedkjølingen, Figur 7-2. I tillegg til at det observeres at sensorene i Luftrommet måler nærmest identiske temperaturer i "varmeperioden".

Sensorene LR1 og LR2 i høyde 75 cm over gulvet, og har identisk temperaturutslag. Dette kan være vanskelig å se i Figur 7-3, siden grafene for LR1 og LR2 overlapper hverandre. I vedlegg B er det presentert grafer med sensorene i de respektive høydenivåene i luftrommet. Av den grunn vil LR1 bli regnet som representant i dette høydenivået videre.

Sensorene LR3, LR4 og LR5 er montert 115 cm over gulvet, viser også tilnærmet identisk temperaturutslag. LR5 blir valgt som representerende temperatur for denne høyden i Luftrommet videre. På samme måte viste sensorene LR6 og LR7 som er montert 160 cm over gulvet samme temperaturutvikling, se vedlegg B. Sensor LR7 blir brukt videre.

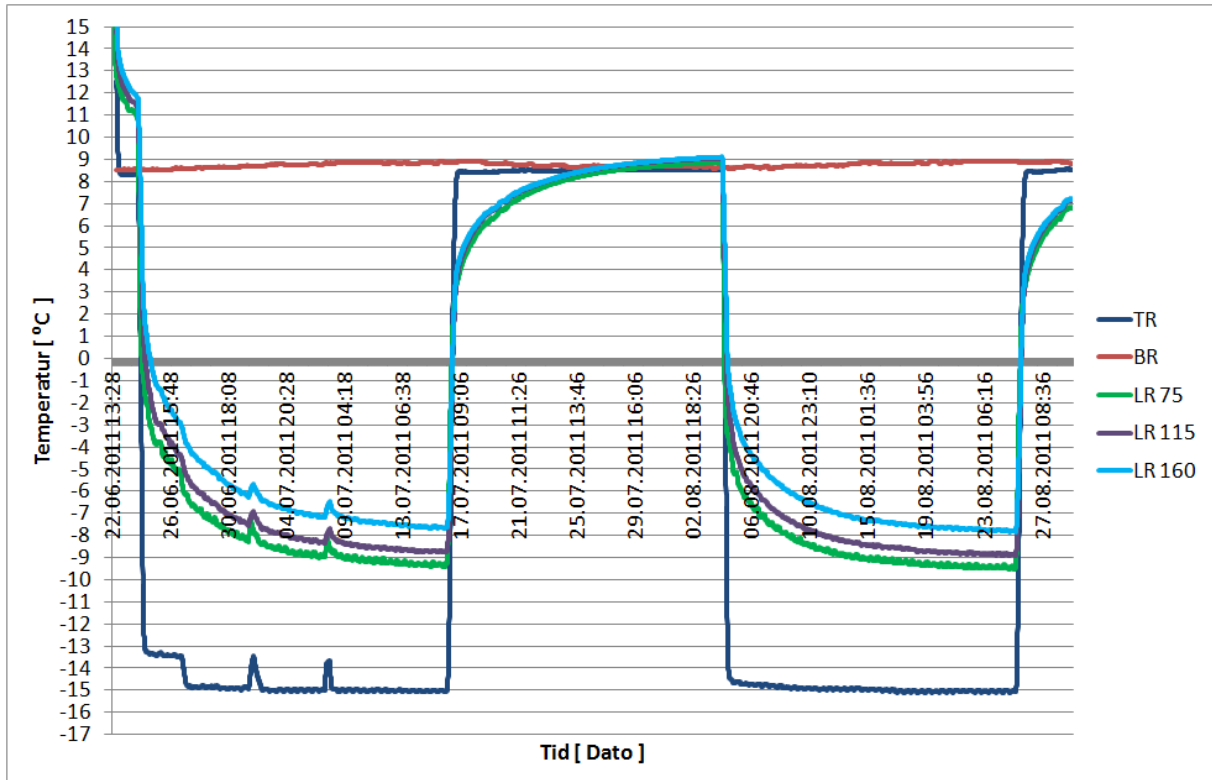


**Figur 7-3 Forsøk F-1. Resultatene fra Tunnelrommet (TR), Bergrommet (BR) og alle sensorene i Luftrommet (LR).**

For å forenkle presentasjonen av resultatene fra Luftrommet settes det inn nye navn for de representative sensorene ved de ulike høydenivåene, Tabell 7-2. Videre vil de nye navnene benyttes i alle fremstillinger av resultatene fra Luftrommet, eksempel er vist i Figur 7-4.

Representativt navn for videre analyser /(= sensorer som går inn under navnet)	Høyde over gulvnivå	Reprenterende sensor
LR 75 / (=LR1 & LR2)	75 cm	LR1
LR 115 / (=LR3, LR4 & LR5)	115 cm	LR5
LR 160 / (= LR6 & LR7)	160 cm	LR7

**Tabell 7-2 Oversikt over navngiving av representative sensorer for videre analyser.**



**Figur 7-4 Forsøk F-1, Resultater fra Luftrommet med navngiving etter høyde (cm) over gulvnivå.**

Resultatene viser at Luftrommet registrerer betydelig høyere temperaturer enn den i Tunnelrommet, Figur 7-4. Temperaturdempningen som registreres i luftrommet følger en eksponentiell utvikling som flater ut til de samme temperaturene begge gangene temperaturen i Tunnelrommet settes til  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Figur 7-4. Sensorene i Luftrommet registrerer en treghet i forhold til den temperaturendringen som skjer i Tunnelrommet. Som grafen viser så er temperaturdempningen størst de første dagene helt til temperaturene i Luftrommet flater ut. Når temperaturen i luftrommet har flatet ut skjer det ingen endring i temperatur fra dag til dag.

For å regne ut sluttemperaturene i de ulike høydene Luftrommet er det tatt gjennomsnittet av temperaturen det siste døgnet før temperaturen blir skiftet tilbake til  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Tabell 7-4. Resultatet fra disse beregningene viser at stagnasjonstemperaturen i høyden 75 cm er  $-9,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sluttemperaturene i høyden 115 cm på  $8,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mens det i høyden 160 cm jevner seg ut på  $7,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Tabell 7-4. Dempningsresultatene viser at luftrommet bak duken holder en temperatur som er mellom  $5,5\text{-}7,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  lavere enn i Tunnelrommet, Tabell 7-4.

Siden det ikke skjer noen endring i temperaturene i luftrommet de tre siste døgnene (22,23,24.08) så setter vi opp at det er oppnådd stagnasjonstemperatur for alle sensorene i luftrommet, Tabell 7-4.



Gjennomsnittstemperatur i LR mot slutten av siste kuldeperiode						
Sensor	Temperatur (døgn gjennomsnitt) [°C]					
	19.08	20.08	21.08	22.08	23.08	24.08
TR	-15,0	-15,0	-15,0	-15,0	-15,0	-15,0
LR 75	-9,3	-9,4	-9,4	-9,4	-9,4	-9,4
LR 115	-8,7	-8,7	-8,7	-8,8	-8,8	-8,8
LR 160	-7,6	-7,6	-7,7	-7,7	-7,7	-7,7

Tabell 7-3 Forsøk F-1. Døgn gjennomsnittstemperaturer siste del av den siste perioden med  $T_{TR} = -15\text{ °C}$ .

Stagnasjonstemperatur (24.08.11)				
Sensor	Stagnasjonstemperatur, $T_{st}$ [°C] (24.08)	90 % utflating, $T_{90}$ [°C]	Tid før 90 % utflating, $t_{90}$ [døgn]	Demping [°C] $T_{TR} - T_{st}$
LR 75	-9,4	-7,7	3,5	5,6
LR 115	-8,8	-7,1	3,8	6,2
LR 160	-7,7	-6,2	4,4	7,3

Tabell 7-4 Forsøk F-1. Temperaturer ved stagnering i Luftrommet.

Frostmengdeutregninger for hele F-1 (22.06 – 29.08.11)		
Sensor	Frostmengde, $F$ [h°C]	Frostmengde bak T100/Frostmengde i Tunnel $F_{LR}/F_{TR}$ [%]
Tunnelrom (TR)	15 108	
LR 75	8 362	55,3
LR 115	7 623	50,5
LR 160	6 422	42,5

Tabell 7-5 Forsøk F-1. Frostmengder.

Frostmengder i Tunnelrommet ved oppnådd 3000 h°C bak T100			
Sensor	Frostmengde i Tunnelrom ( $F_{TR}$ ), ved oppnådd 3000 h°C i Luftrommet ( $F_{LR}$ ) [h°C]	Frostmengde LR / Frostmengde TR [%] $F_{LR}/F_{TR}$	Tiden det tok å oppnå 3000 h°C bak T100 [døgn]
LR 75	5447	55,1	15,3
LR 115	5860	51,2	16,4
LR 160	6755	44,4	18,8

Tabell 7-6 Forsøk F-1. Resultater etter oppnådd 3000 h°C bak T100.

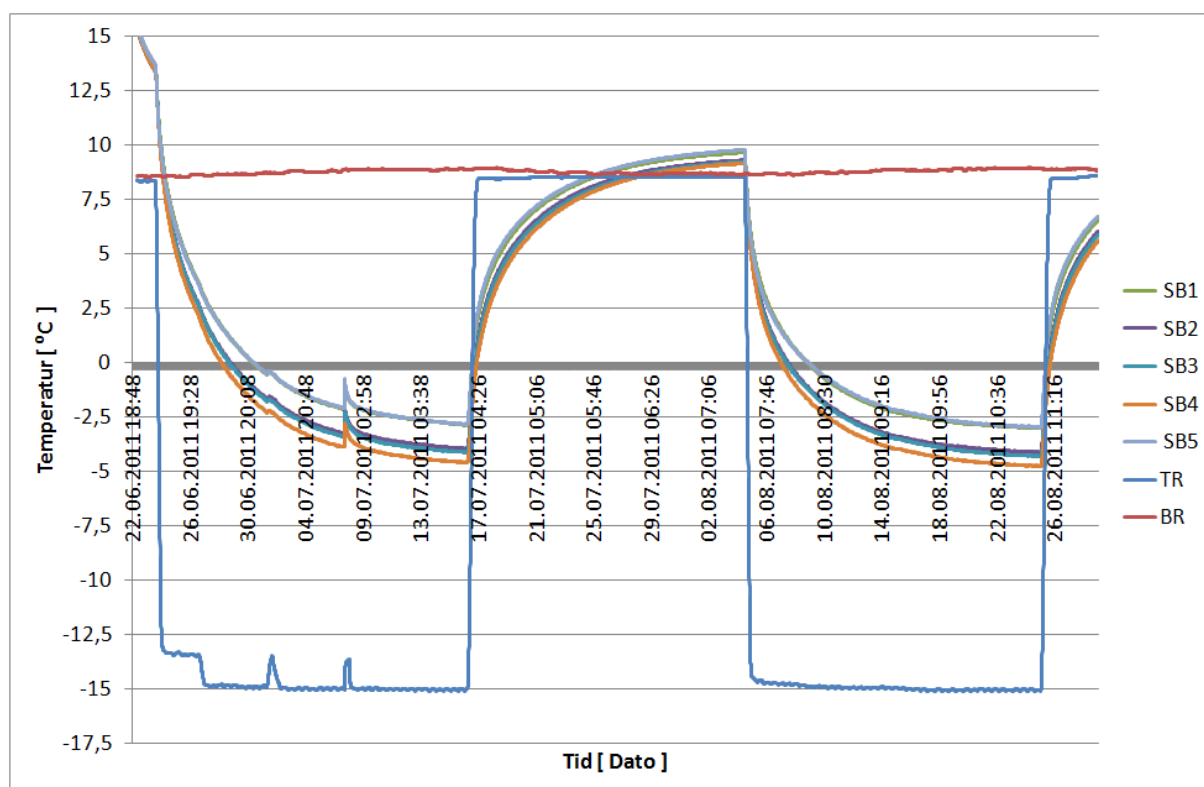
For å vurdere resultatene i form av å se på parameteren frostmengde ( $F$ ) er det regnet ut total frostmengde i Tunnelrom og Luftrom gjennom hele forsøket, Tabell 7-5. Resultatene viser at frostmengden bak duken er mellom 43-55 % av frostmengden i Tunnelrommet.

Resultatene av beregningene viser at for å oppnå 3000 h°C bak T100 kreves en frostmengde i Tunnelen på mellom 5447 og 6755 h°C i dette forsøket, Tabell 7-6. Forskjellen mellom frostmengder bak T100 og i Tunnel ( $F_{LR}/F_{TR}$ ) i prosent ligger innenfor omtrent samme

intervaller i beregningene for total frostmengde og frostmengde når Luftrommet registrerer 3000 h°C. Også her avhenger frostmengden av høyde i luftrommet, slik at jo høyere sensoren er montert jo lavere frostmengder måles det.

### 7.1.2 Resultater fra Sprøytebetongen

Sensorene i sprøytebetongen er spredd ut over veggen i et mønster som vist i Figur 6-6, og alle sensorene ligger i omtrent samme dybde. Resultatene viser at temperaturen i SB1 og SB5 er tilnærmet identiske, og det samme viser temperaturen i SB2 og SB3. Ut fra plasseringen av sensorene ser man at de sensorene som måler identiske temperaturer er montert i samme høyde. Dette skyldes sannsynligvis at temperaturen i luftrommet avhenger av høyden over gulvet, noe som igjen påvirker hvilken temperatur som måles i ulike høyder i sprøytebetongen.



Figur 7-5 Forsøk F-1. Resultater fra Sprøytebetongen.

Resultatene fra sprøytebetongen viser at også her flater temperaturkurven ut mot en bestemt temperatur i begge kuldeperiodene, Figur 7-5. I løpet av varmeperioden fra 17.07 – 04.08 måler alle temperaturene reversering til opp mot +10 °C. I løpet av varmeperioden så er overensstemmelsen i temperaturene i sprøytebetongen bedre, enn når temperaturen i sprøytebetongen synker. Forskjellen i temperaturer i sprøytebetongen ender opp på cirka er ca 2 °C når  $T_{TR} = -15^{\circ}\text{C}$ . Forskjellen i temperaturer er ca 1°C når  $T_{TR} = +8^{\circ}\text{C}$ .

Temperaturutviklingen i løpet av begge periodene er identiske, bortsett fra noen mindre forskjeller som skyldes endringer i temperaturen fra Tunnelrommet i første kuldeperiode.

Sprøytebetongen stagnerer mot en temperatur som ligger mellom -3 til -5 °C, Tabell 7-7. Noe som ligger betydelig lavere enn den temperaturen som holdes i Tunnelrommet, og også et stykke over temperaturen i Luftrommet. Ved utregning av stagnasjonstemperatur og 90 % stagnasjon er det kun regnet ut for gjennomsnittet av alle sensorene i Sprøytebetongen.

<b>Gjennomsnittstemperatur i Sprøytebetongen siste dagene i siste periode med <math>T_{TR} = -15</math> °C</b>					
<b>Sensor</b>	<b>Temperatur (døgn gjennomsnitt) [°C]</b>				
	<b>20.08</b>	<b>21.08</b>	<b>22.08</b>	<b>23.08</b>	<b>24.08</b>
SB1	-2,8	-2,9	-2,9	-3,0	-3,0
SB2	-3,9	-4,0	-4,0	-4,1	-4,1
SB3	-4,1	-4,1	-4,2	-4,2	-4,3
SB4	-4,5	-4,6	-4,7	-4,7	-4,7
SB5	-2,8	-2,8	-2,9	-2,9	-2,9
Gjennomsnitt (SB)	-3,6	-3,7	-3,7	-3,8	-3,8

**Tabell 7-7 Forsøk F-1. Gjennomsnittstemperaturer i Sprøytebetongen siste dagene i siste periode med  $T_{TR} = -15$  °C**

<b>Stagnasjonstemperaturer i Sprøytebetongen</b>			
<b>Sensor</b>	<b>Stagnasjonstemperatur, <math>T_{st}</math> [°C] (24.08)</b>	<b>90 % Utflating <math>T_{90}</math> [°C]</b>	<b>Tid før 90 % utflating (<math>t_{90}</math>) [døgn]</b>
Gjennomsnitt (SB)	-3,8	-2,5	8,2

**Tabell 7-8 Forsøk F-1. Resultater fra Sprøytebetong**

90 % utflating for gjennomsnittet av sensorene i sprøytebetongen oppnås etter 8,2 døgn. Dette er en dobling av tiden det tok å oppnå 90 % stagnasjon i luftrommet.

For å regne ut når temperaturen i sprøytebetongen går under 0°C, er det regnet ut når gjennomsnittsverdien av alle sensorene går under 0°C. Resultatene viser at det tar 3 døgn og 7 timer med -15°C i Tunnelrommet før nullisotermen når ca 6,5 cm inn i sprøytebetongen, Tabell 7-9.

<b>Nullisotermen i Sprøytebetongen</b>			
<b>Gjennomsnitt av temperaturene i sprøytebetongen</b>	<b>Tid før det registreres negativ temperatur (Starttid: 04.08.11 kl 20:46)</b>	<b>Frostmengde i Tunnelrom på samme tid, <math>F_{TR}</math> [h°C]</b>	<b>Frostmengde i Luftrom på samme tid, <math>F_{LR}</math> (LR75/LR115/LR160) [h°C]</b>
SB	3 døgn og 7 timer = 78 timer (08.08.11 kl 03:06)	1140	462/400/292

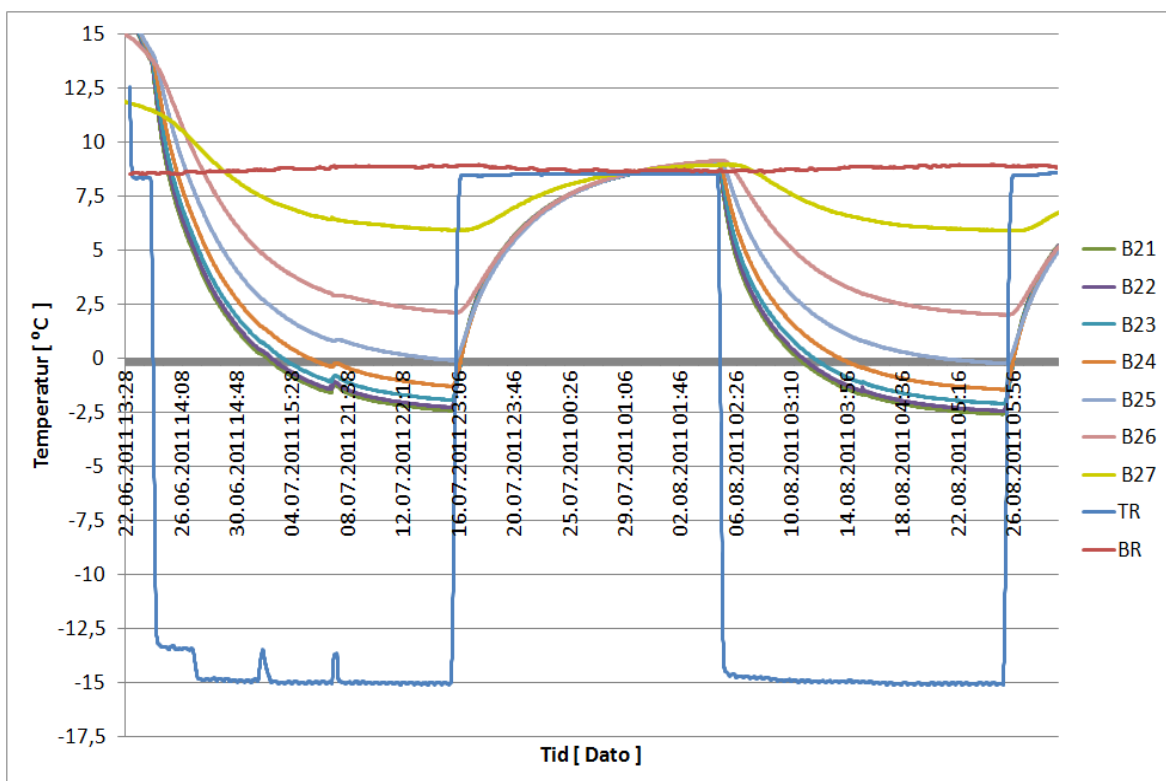
**Tabell 7-9 Forsøk F-1. Nullisotermen i sprøytebetongen**

### 7.1.3 Resultater fra Granittblokkene

For å unngå for mye data fra granittveggen er resultatene fra blokka B2 valgt som representativ. Det samme ble gjort i tidligere forsøk i Frostlaboratoriet (Grøv & Vassenden, 2011). B2-blokka er plassert i sentrum av blokkveggen og resultatene blir derfor ikke påvirket av randeffekter. Erfaringene fra tidligere har vist at resultatene fra B2 er nærmest identisk med resultatene fra A2 og A3 (Grøv & Vassenden, 2011). Det ble ikke registrert like god overensstemmelse mellom resultatene fra blokka B3 og blokkene A2 og A3. Resultatene fra forsøk F-1 viser de samme tendensene, nemlig at temperaturen i B2 blokka ligger nærmest temperaturen A2 og A3. Det blir derfor bare presentert resultater fra B2 blokka videre i oppgaven. Resultatene fra blokkene A2, A3, B3 blir presentert i vedlegg B, men bare for dette forsøket.

Resultatene viser at temperaturene i alle sensorene i B2-blokka flater ut mot samme temperatur i løpet av begge steglaster på  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Figur 7-6. Bortsett fra at den første kuldeperioden hadde litt komplikasjoner i startfasen, så foregår temperaturforløpet i blokka på helt identisk vis begge gangene. I følge grafen ser det ut til at temperaturene flater ut omtrent samtidig, Figur 7-6.

Resultatene viser at hele lengden av blokka rekker å stabilisere seg på  $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$  i løpet av varmeperioden, før den siste steglaster fra  $+8$  til  $-15^{\circ}\text{C}$ . Fordi den siste kuldeperioden, til høyre i Figur 7-6, ble utført mest korrekt, er det valgt å presentere resultatene denne perioden videre i fremstillingen fra Forsøk F-1.



Figur 7-6 Forsøk F-1. Temperaturen i B2-blokka.

Gjennomsnittstemperatur i B2-blokka siste dagene i siste periode med $T_{TR} = -15\text{ °C}$					
Sensor	Temperatur (døgn gjennomsnitt) [°C]				
	20.08	21.08	22.08	23.08	24.08
B21	-2,3	-2,4	-2,5	-2,5	-2,6
B22	-2,2	-2,3	-2,3	-2,4	-2,4
B23	-1,8	-1,9	-2,0	-2,0	-2,1
B24	-1,2	-1,3	-1,3	-1,4	-1,4
B25	0	0	-0,1	-0,2	-0,2
B26	2,3	2,2	2,1	2,1	2,0
B27	6,0	6,0	6,0	5,9	5,9

Tabell 7-10 Forsøk F-1. Gjennomsnittstemperatur i B2-blokka siste dagene i siste periode med  $T_{TR} = -15\text{ °C}$ .

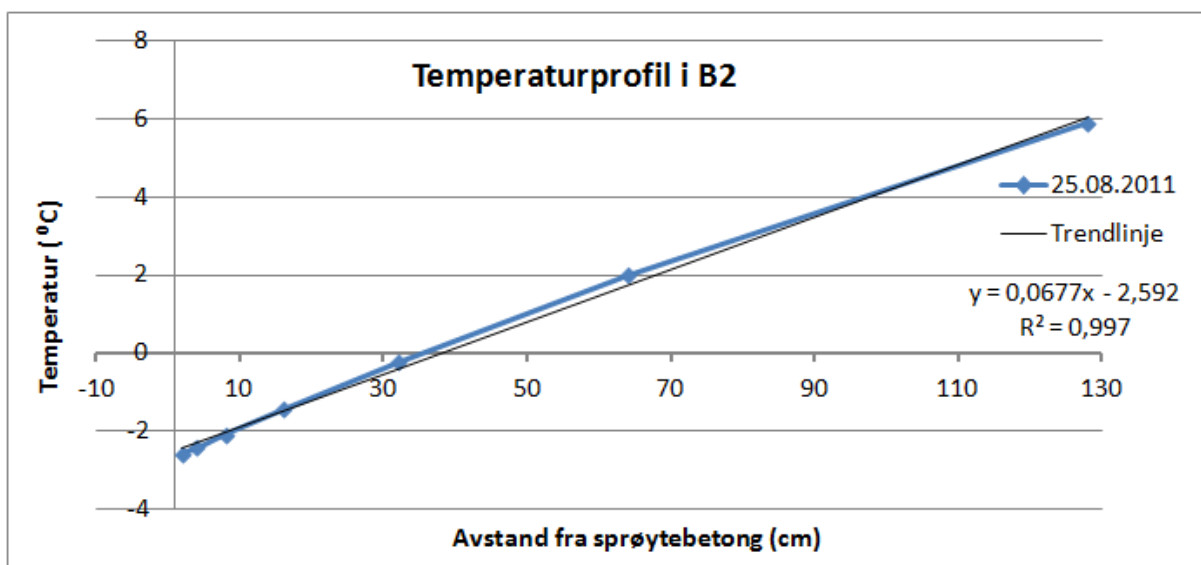
Stagnasjonstemperaturer i B2-blokka (24.08)			
Sensor	Stagnasjonstemperatur, $T_{st}\text{ [°C]}(24.08)$	90 % Utflating $T_{90}\text{ [°C]}$	Tid før 90% utflating ( $t_{90}$ ) [døgn]
B21	-2,6	-1,4	9,3
B22	-2,4	-1,3	9,9
B23	-2,1	-1,0	10,3
B24	-1,4	-0,4	10,8
B25	-0,2	0,7	11,1
B26	+2,0	2,0	12,0
B27	+5,9	6,2	12,7

Tabell 7-11 Forsøk F-1. Stagnering av temperaturer i B2-blokka.

Resultatene fra temperaturutviklingen i B2-blokka viser at sensorene B21 (lengde 2 cm) og B22 (lengde 4 cm) stagnerer mot  $-2,5\text{ °C}$ . Temperaturen øker gradvis innover i blokka, og temperaturen i B25 (lengde 32 cm) stagnerer like under  $0\text{ °C}$ .

Temperaturprofilen av granittveggen helt i slutten av siste steglast (25.8.11) etter 20 døgn med  $-15\text{ °C}$ , viser at nullisotermen strekker seg ca 35 cm inn i granittveggen, Figur 7-7. Grafen viser også at temperaturprofilen følger en lineær utvikling som avhenger av avstand innover i blokka.

Nullisotermens bevegelse innover i granittveggen før den når en likevekt avhenger av tiden. Sensor B21 (2 cm fra sprøytebetong) registrerer en temperatur på  $-0,01\text{ °C}$  etter 5,8 døgn. Dette skjer etter en påført frostmengde fra Luftrommet (LR 160) på  $654\text{ h}^{\circ}\text{C}$ , og en frostmengde fra Tunnelrommet på  $2038\text{ h}^{\circ}\text{C}$ . Sensor B25 registrerer  $-0,01\text{ °C}$  etter 16 døgn, og da er frostbelastningen fra Luftrommet  $2447\text{ h}^{\circ}\text{C}$ .



Figur 7-7 Forsøk F-1. Temperaturprofil gjennom granittveggen etter 20 dager (25.8.2011) med -15°C (siste steglastperiode).

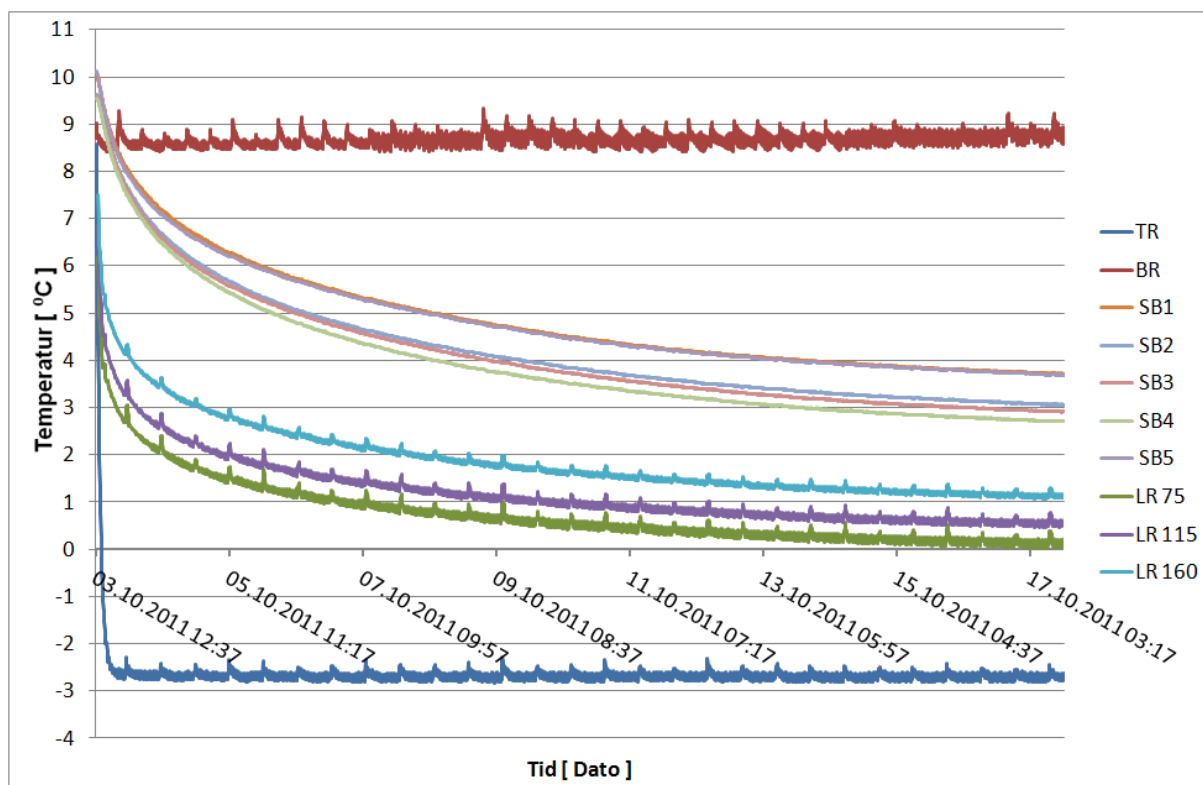
Forsøk F-1. Nullisotermen i B2 ved siste kuldeperiode.			
Sensor	Tid før det registreres negativ temperatur. (Starttid: 04.08.11 kl 20:46)	Frostmengde i Tunnelrom på samme tid: [h°C]	Frostmengde i Luftrom på samme tid (LR75/LR115/LR160) [h°C]
B21 (2 cm)	5 døgn & 18 timer = 129,6 timer (10.8.11 kl: 15:20)	2038	943/840/654
B22 (4 cm)	6 døgn og 2 timer = 146,4 timer (10.8.11 kl: 23:50)	2160	1011/903/707
B23 (8 cm)	6 døgn og 23 timer = 167 timer (11.8.11 kl: 19:26)	2451	1178/1057/838
B24 (16 cm)	9 døgn og 19 timer = 235,2 timer (13.8.11 kl: 15:56)	3116	1569/1420/1149
B25 (32 cm)	16 døgn = 384 timer (20.8.11 kl: 21:46)	5725	3164/2912/2447
B26 (64 cm)	Går ikke under frysepunktet		
B27 (128 cm)	Går ikke under frysepunktet		

Tabell 7-12 Forsøk F-1. Nullisotermen i B2.

## 7.2 Forsøk F-2

Andre forsøk i Frostlaboratoriet bestod av en jevn temperaturlastning på  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  i 14 dager. Forsøket startet 3.10.11 og ble avsluttet 17.10.11. Meningen var å prøve ut  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , men etter at forsøket var kjørt i to uker viste sensoren i Tunnelrommet at temperaturen lå rundt  $-2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Siden det ikke var noen spesielle krav til nøyaktig hvilken temperatur tunnelrommet skulle, annet enn at den skulle ligge over forsøk F-1 ble det vurdert dit hen at det ikke var behov for å gjøre testen på nytt.

Det viste seg i ettertid at kjøleaggregatet ikke holder nøyaktig den temperaturen den stilles inn på, i dette tilfellet var aggregatet stilt inn på  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Temperatursensoren i Tunnelrommet ligger opp under taket, like under kjøleaggregatet, og registrerte en temperatur på mellom  $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  og  $-2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  gjennom forsøket, med et gjennomsnitt på  $2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Muligens holder Tunnelrommet en lavere temperatur langs gulvnivå, og at det er derfor vi får en spredning i lufttemperaturen bak duken avhengig av høyden. At sensoren i Tunnelrommet registrerer kun temperaturen i øvre sjikt kan føre til at Frostdemningen til WG Tunnelhvelv T100 blir nedjustert.



**Figur 7-8 Forsøk F-2. Resultatene fra temperaturen i Tunnelrommet(TR), Bergrommet(BR), Luftrommet(LR) og Sprøytebetongen(SB).**

Resultatene viser at når Tunnelrommet holdt en gjennomsnittstemperatur på  $-2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , så stabiliserte temperaturen i Luftrommet seg over frysepunktet i alle høydene (LR 75, LR 115 og LR 160), Figur 7-8. Temperaturen i Tunnelrommet kunne holdt denne temperaturen i evigheten, uten at lufttemperaturen bak duken går under frysepunktet. Dette betyr på

samme tid at en uendelig høy frostmengde kunne vært påført systemet, uten at det ville forekommet noen frostitimer ( $h^{\circ}C$ ) bak Tunnelhvelv T100, Figur 7-8. Det blir derfor ikke regnet ut frostmengder for dette forsøket.

Gjennomsnittstemperatur i Luftrommet mot slutten av forsøket					
Sensor	Temperatur (døgn gjennomsnitt) [ $^{\circ}C$ ]				
	13.10	14.10	15.10	16.10	17.10
LR 75	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1
LR 115	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6
LR 160	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1

Tabell 7-13 Forsøk F-2. Gjennomsnittstemperaturer i Luftrommet siste dagene i siste periode med  $T_{TR} = -2,7^{\circ}C$

Stagnasjonstemperaturer i Luftrommet				
Sensor	Stagnasjonstemp, $T_{st}$ [ $^{\circ}C$ ] (24.08)	90 % utflating $T_{90}$ [ $^{\circ}C$ ]	Tid før 90 % utflating, $t_{90}$ [døgn]	Demping [ $^{\circ}C$ ] $T_{TR}-T_{ST}$
Tunnelrom	-2,7		-	
LR 75	0,1	1,0	3,6	2,9
LR 115	0,6	1,4	3,6	3,4
LR 160	1,1	1,9	4,8	3,9

Tabell 7-14 Forsøk F-2. Stagnasjonstemperaturer i Luftrommet.

Gjennomsnittstemperatur i Sprøytebetongen mot slutten av forsøket					
Sensor	Temperatur (døgn gjennomsnitt) [ $^{\circ}C$ ]				
	13.10	14.10	15.10	16.10	17.10
SB1	4,0	3,9	3,9	3,8	3,7
SB2	3,4	3,3	3,2	3,1	3,1
SB3	3,2	3,1	3,1	3,0	2,9
SB4	3,0	2,9	2,8	2,8	2,7
SB5	4,0	3,9	3,8	3,8	3,7
Gjennomsnitt (SB)	3,5	3,4	3,3	3,3	3,2

Tabell 7-15 Forsøk F-2. Gjennomsnittstemperaturer i sprøytebetongen siste dagene av forsøket.

Stagnasjonstemperaturer i Sprøytebetongen			
Sensor	Stagnasjonstemperatur $T_{st}$ [ $^{\circ}C$ ] (17.10)	90 % Utflating $T_{90}$ [ $^{\circ}C$ ]	Tid før 90 % utflating ( $t_{90}$ ) [døgn]
Gjennomsnitt (SB)	3,2	3,9	7,5

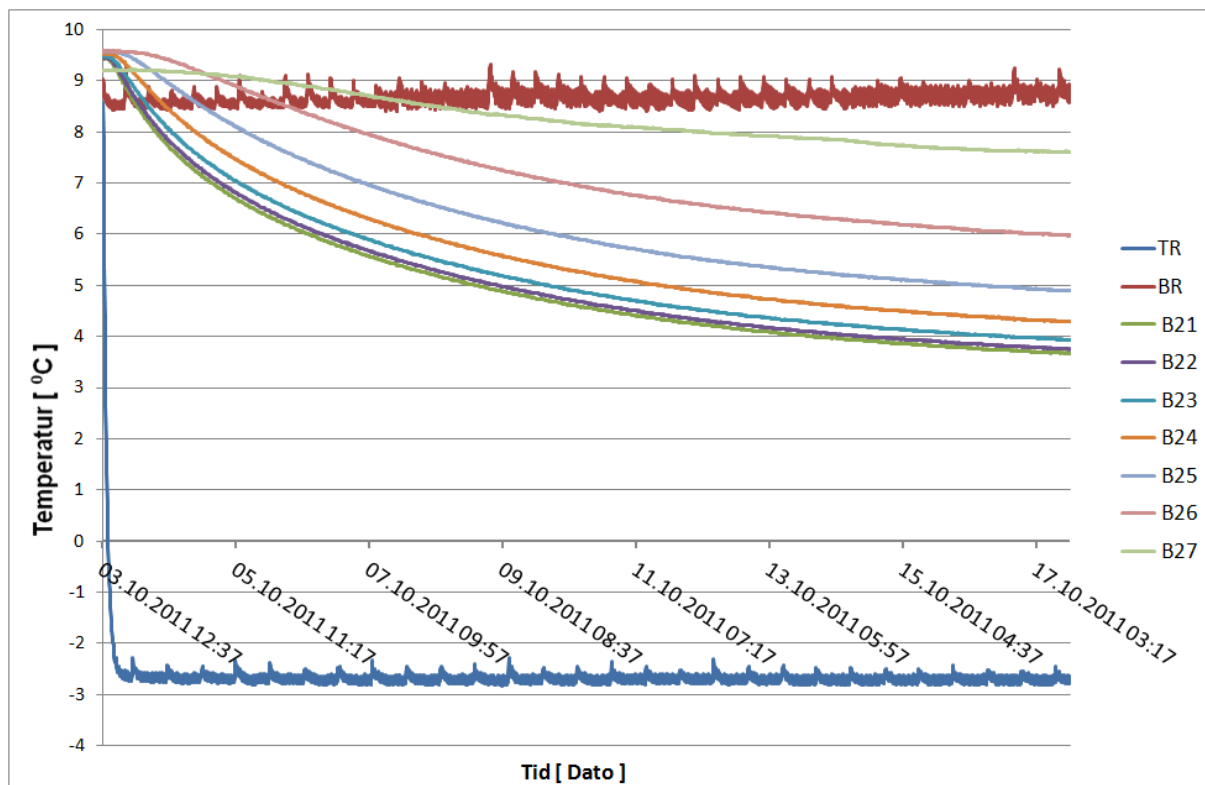
Tabell 7-16 Forsøk F-2.

I sprøytebetongen rekker temperaturen å flate ut før forsøket avsluttes.

Temperaturendringene siste døgnet (16.10-17.10) ligger på  $0,1^{\circ}C$ . Totalt sett ligger alle



temperaturene i sprøytebetongen godt over frysepunktet, og et par grader over temperaturene i Lufttrommet.



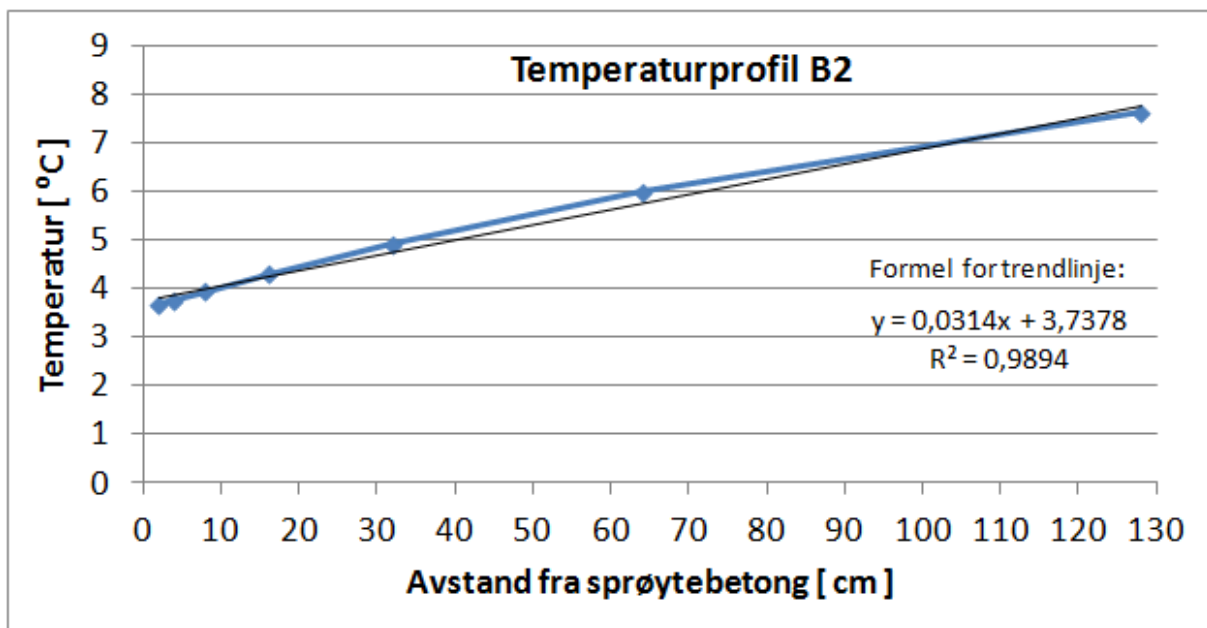
Figur 7-9 Forsøk F-2. Temperaturene i B2 blokka.

Gjennomsnittstemperatur i B2-blokka mot slutten av forsøket					
Sensor	Temperatur (døgn gjennomsnitt) [°C]				
	13.10	14.10	15.10	16.10	17.10
B21	4,0	3,9	3,8	3,7	3,7
B22	4,1	4,0	3,9	3,8	3,8
B23	4,3	4,2	4,1	4,0	4,0
B24	4,7	4,6	4,4	4,4	4,3
B25	5,3	5,2	5,1	5,0	4,9
B26	6,4	6,3	6,2	6,1	6,0
B27	7,9	7,8	7,7	7,6	7,6

Tabell 7-17 Forsøk F-1.

Stagnasjonstemperaturer i B2-blokka (17.10)			
Sensor	Stagnasjonstemperatur T <sub>st</sub> [°C] (17.10)	90 % Utflating T <sub>90</sub> [°C]	Tid før 90 % utflating (t <sub>90</sub> ) [døgn]
B21	3,7	4,3	8,25
B22	3,8	4,4	8,3
B23	4,0	4,5	8,8
B24	4,3	4,8	9,2
B25	4,9	5,4	9,4
B26	6,0	6,4	9,8
B27	7,6	7,8	11,1

Tabell 7-18 Forsøk F-2.



Figur 7-10 Forsøk F-2. Temperaturprofil i blokk B2 etter 14 dager med testkjøring (Dato: 17.10.11)

Temperaturprofilen gjennom blokka B2 starter rundt 3,75 °C ved B21, og avslutter opp mot 8°C B27, Figur 7-10. Sammenlignet med temperaturprofilen fra det første forsøket så har denne kurven en slakere stigning. Kurven starter ved en høyere temperatur i B21, og avslutter med en høyere temperatur for B27 også.

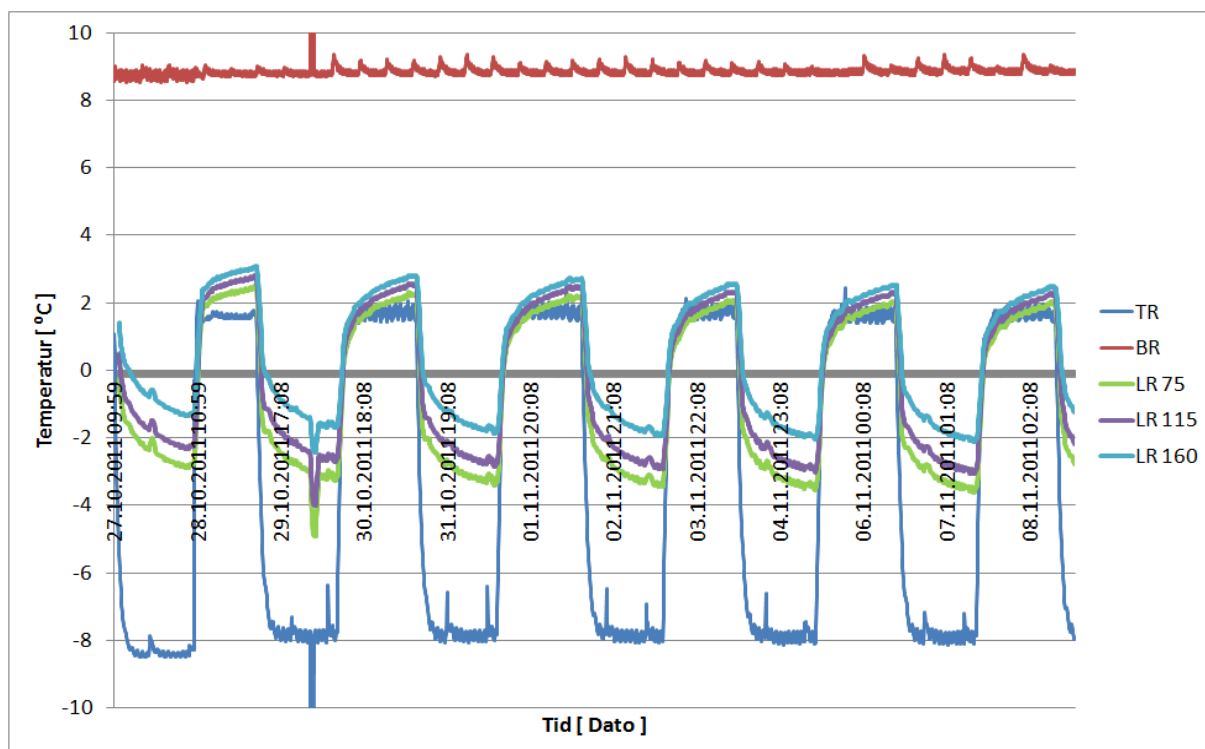
### 7.3 Forsøk F-3

De tidligere simuleringene og beregningene gjort med WG Tunnelhvelv T100 var bakgrunn for dette forsøket. Forsøk F-3 skulle bestå i steglaster mellom -10 og 0 °C. Noe tilsvarende ble simulert med WG Tunnelhvelv T100 tidligere (Moe et. al., 2007). I simuleringene var det brukt sinusvingninger mellom 0 og -10 °C over døgnet. I forsøket i laboratoriet benyttes det steglaster mellom 0 og -10 °C, med 24 timers mellomrom. Dette ble gjort fordi temperaturen skulle skiftes manuelt hver dag, og det ble derfor enklest å ha 24 timers mellomrom, slik at

skiftningene kunne foregå i arbeidstid i ukendagene. Temperaturskiftningene ble gjort kl 10:00 hver dag, inkl helgedager.

Den innstilte temperaturen på kjøleaggregatet og temperaturen som registreres av sensoren i Tunnelrommet avviker noe fra hverandre. Det var ønskelig å teste steglaster mellom -10 og 0 °C, men som resultatene viser så ble steglaster mellom -8 og +2 °C.

De overnevnte faktorene gjør at resultatene fra Frostlaboratoriet ikke er identiske med simuleringene. En sammenligning kan likevel gi nyttig informasjon, og en viss overensstemmelse kan være med på bygge opp under begge resultatene.



Figur 7-11 Forsøk F-3. Resultater fra Luftrommet (LR).

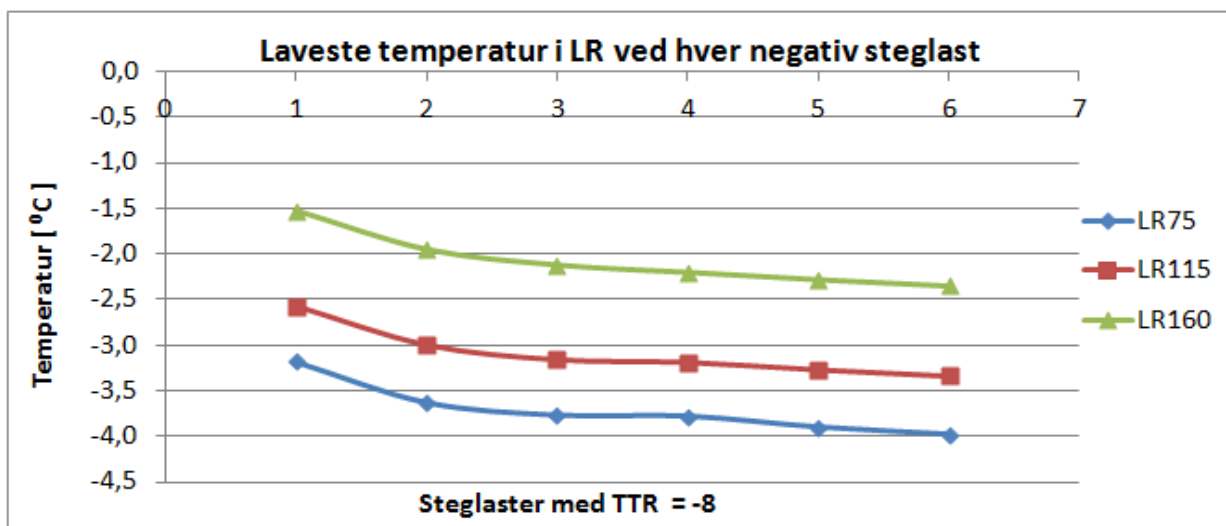
Resultatene fra Tunnelrommet og Bergrommet viser nærmest identiske forhold gjennom hele testen. Temperaturen i Tunnelrommet synker ned til rundt -8 ved hver negativ steglaster, og Bergrommet holder samme temperatur hele veien. Det skal derfor ikke være forskjeller i temperatur mellom hver steglaster.

F-3: Høyeste og laveste temperatur ved siste periode, 06.11.11-08.11.11.			
Sensor	Høyeste temperatur [°C]	Laveste temperatur [°C]	Dempning av laveste temperatur ( $T_{TR}-T_{LR}$ ) [°C]
Tunnelrom	2,0	-8,1	
LR75	2,3	-4,0	4,1
LR115	2,5	-3,3	4,8
LR160	2,7	-2,4	5,7

Tabell 7-19 Forsøk F-3. Høyeste og laveste temperatur som er målt fra 06.11.11-08.11.11.

Siden temperaturen bak duken ikke stagnerer mot en gitt temperatur er det valgt å se på temperaturintervallet mellom høyeste og laveste temperatur ved siste periode, Tabell 7-19. Resultatene viser at dempningen ved laveste temperatur ligger mellom 4,1 -5,7 °C.

Utviklingen til lufttemperaturen viser at temperaturen blir lavere etter hver negative steglaster, Figur 7-12. Grafen ser ut til å slake ut etter 4-6 negative steglaster. Hadde testen fortsatt over lengre tid ville det trolig ført til en videre utflating.

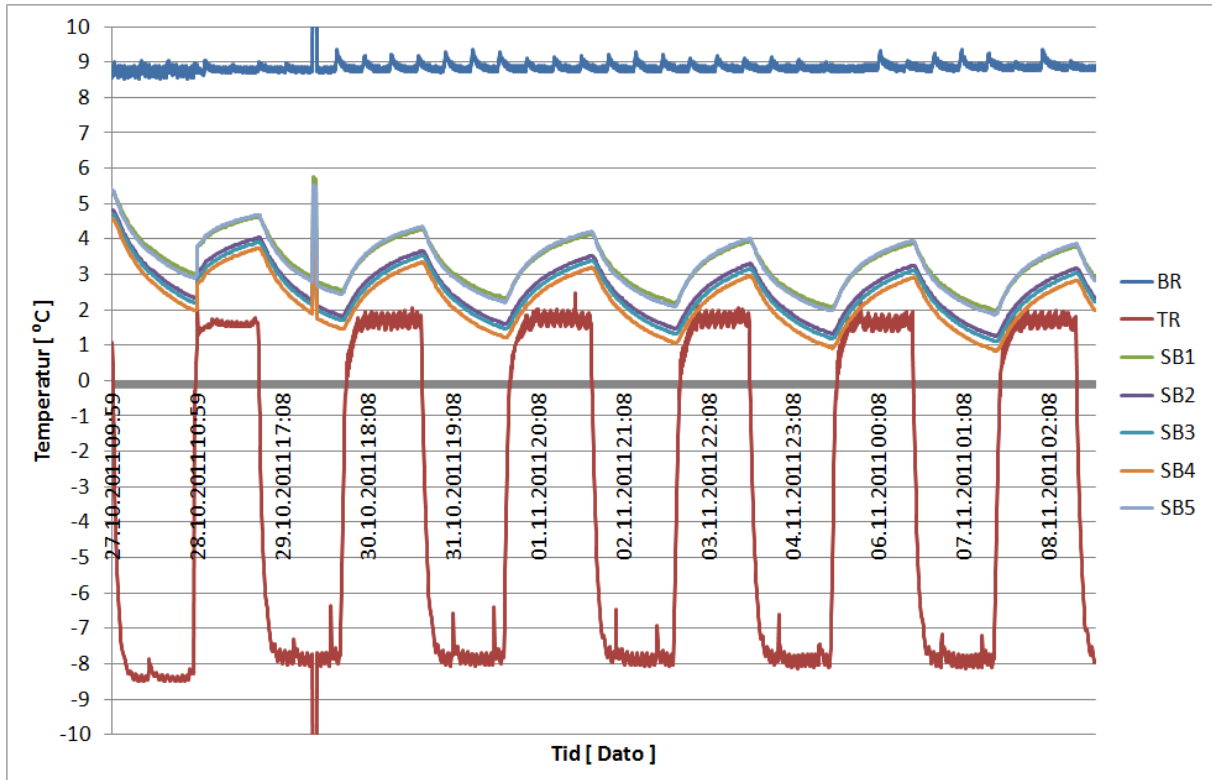


Figur 7-12 Forsøk F-3. Målt minimums temperatur i Luftrummet etter hver periode med negativ steglaster.

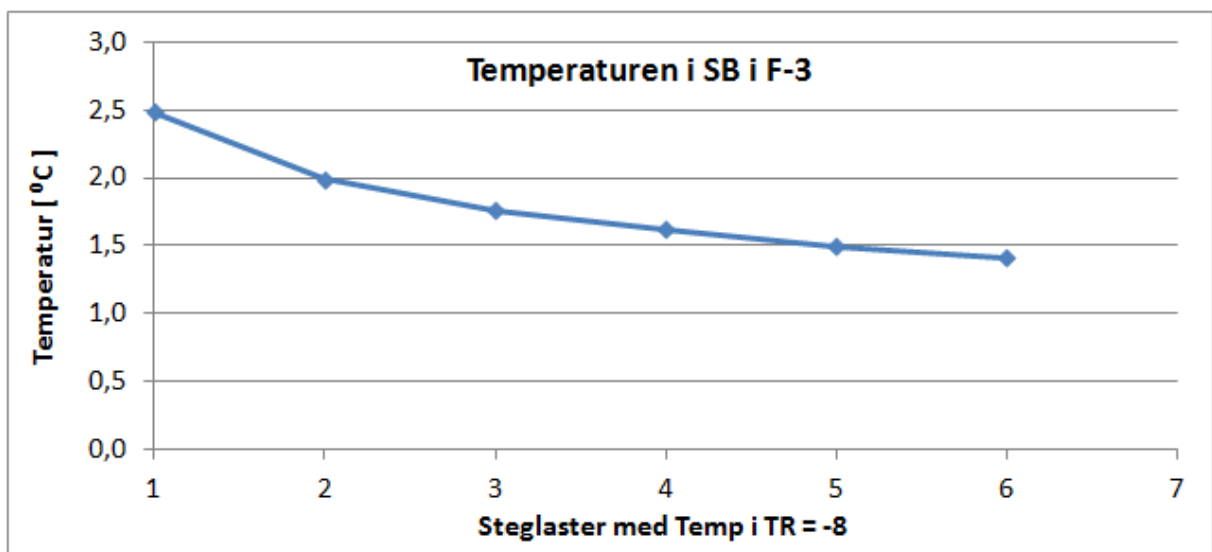
Frostmengdene etter hver steglaster i luftrummet er samlet i Tabell 7-20. Ved høyden 160 cm oppnås en frostmengde på 32 h°C etter hver steglaster, mens ved 75 cm oppnås det 69 h°C. Dette representerer mer enn en dobling i frostmengde på en høydeforskjell på 85 cm.

Frostmengde i F-3				
Sensor	Frostmengde hver periode [ h°C ]	Frostmengde bak T100 / Frostmengde i Tunnel $F_{LR} / F_{TR} [ \% ]$	Tid for å oppnå 3000 h°C bak duken, $T_{3000}$ [ døgn ]	Frostmengden i Tunnelrommet ved $T_{3000}$ i Luftrummet [ h°C ]
Tunnel rom	182,6	-	-	-
LR75	69,4	38	86,4	7893
LR115	54,8	30	109,5	9997
LR160	32,2	18	186,3	17018

Tabell 7-20 Forsøk F-3. Frostmengder i Luftrummet og Tunnelrommet.

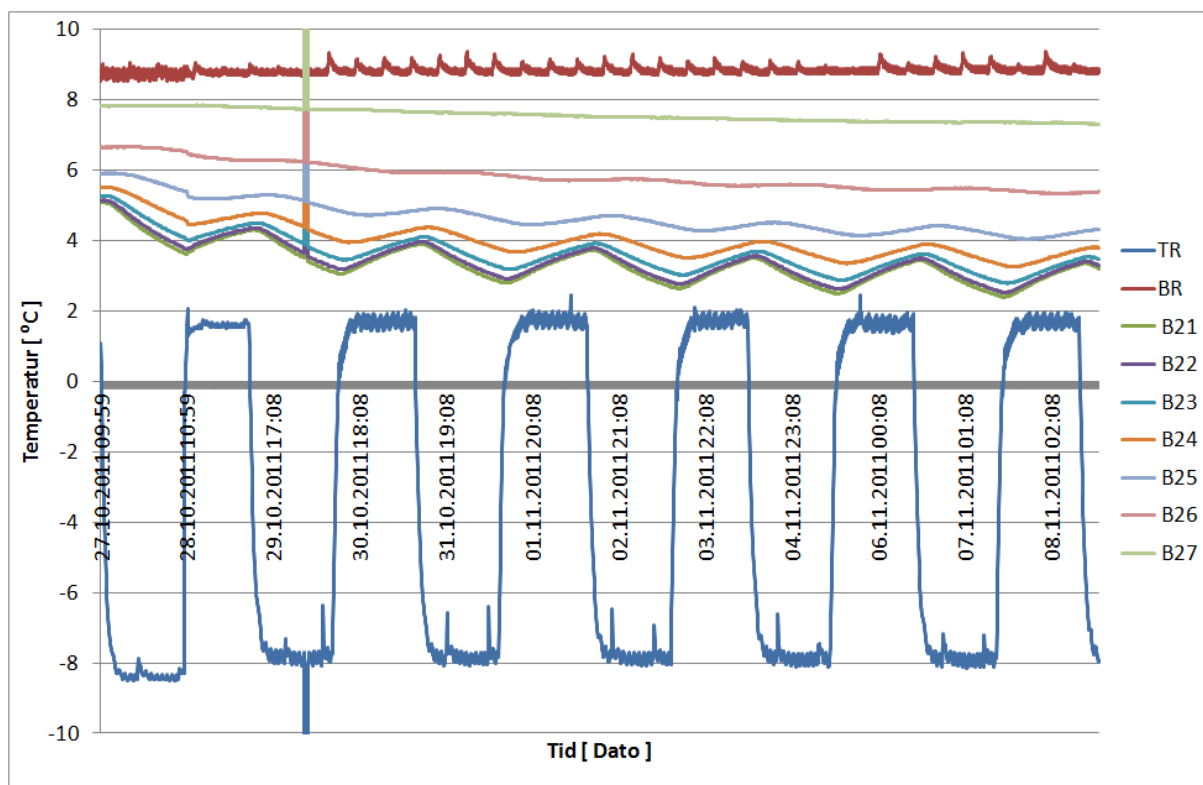


Figur 7-13 Forsøk F3. Resultater fra sprøytebetongen (SB).



Figur 7-14 Forsøk F-3. Utviklingen til gjennomsnittstemperaturen i sprøytebetongen etter hver steglaster med Temperaturen i Tunnelrommet ( $T_{TR}$ ) ned til  $-8^{\circ}\text{C}$ .

Temperaturen målt av sensorene i sprøytebetongen går ikke under null grader i løpet av testen, Figur 7-13. For å se nærmere på temperaturutviklingen er det tatt et gjennomsnitt av resultatene til alle sensorene. Det ble deretter funnet den lavest målte temperaturen ved hvert intervall ned til  $-8^{\circ}\text{C}$  i Tunnelrommet, Figur 7-14. Temperaturen faller raskest fra 1. til 2. steglaster. Deretter flater temperaturen mer og mer ut mot slutten av forsøket.



**Figur 7-15 Forsøk F-3. Resultater fra granittveggen representert ved blokk B2.**

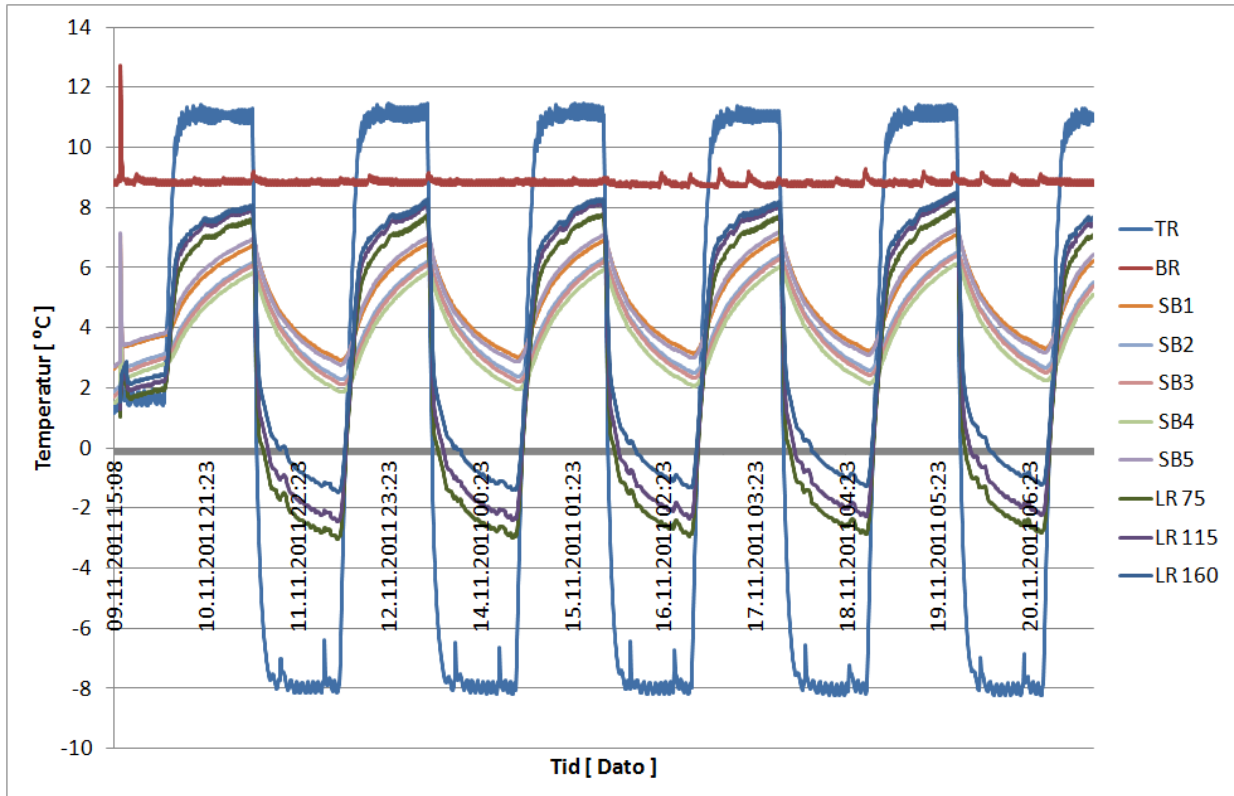
Temperaturen i B2-blokkene går ikke under null grader i løpet av forsøket, Figur 7-15. Ytterst i blokkene fra sensor B21-B26 svinger temperaturene i takt med Tunnelrommet ( $T_{TR}$ ). Temperaturen i B27 følger ikke svingningene, men synker jevnt. Temperaturene synker gjennom hele forsøket, men ser ut til å flate ut de siste par dagene (06.11-08.11).

## 7.4 Forsøk F-4

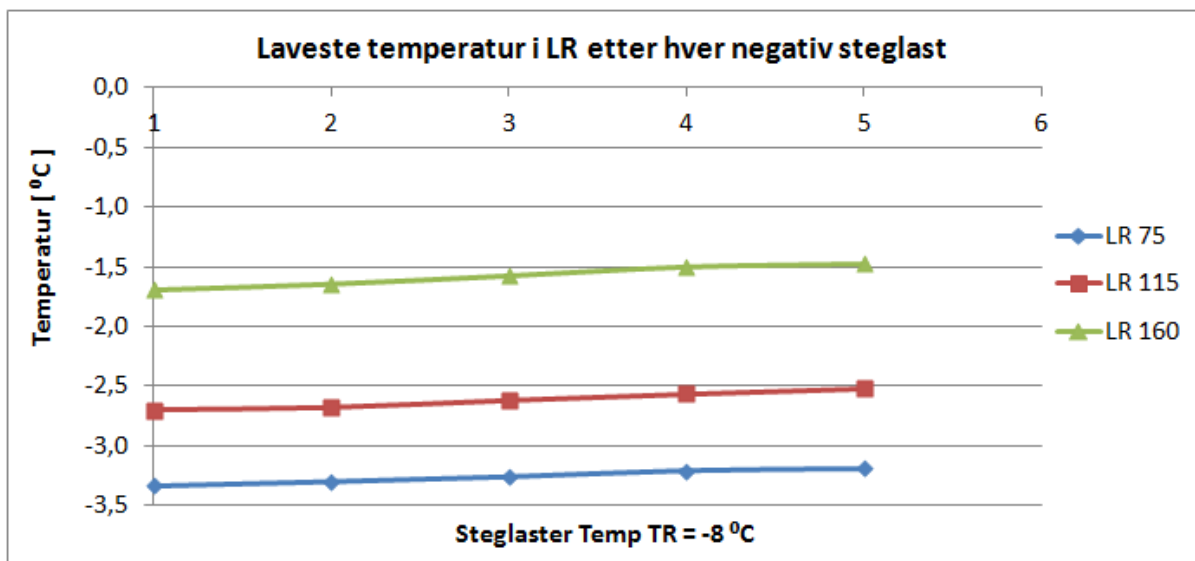
Dette forsøket er også en del av opplegget for å skaffe laboratoriedata som kan ligne på de simuleringene og beregningene som er gjort tidligere. Testen i Frostlaboratoriet skulle ligne en simulering gjort med sinussvingninger mellom  $-10$  og  $+10^{\circ}\text{C}$ . Som i F-3 ble testen forenklet til steglaster mellom  $-10$  og  $+10^{\circ}\text{C}$  over et 24 timers intervall.

Forsøk F-4 fortsatte rett etter forsøk F-3. Dette vises ved at forsøk F-4 starter med en temperatur i Tunnelrommet ( $T_{TR}$ ) på  $1,7^{\circ}\text{C}$ , Figur 7-16. Forsøket starter den 10.11 når temperaturen går opp til  $+11^{\circ}\text{C}$  den 10.11.11.

I ettertid viste resultatene at temperaturene i Tunnelrommet skulle vært sjekket og tilpasset, slik at ønsket temperatur kunne vært oppnådd i Tunnelrommet. Fordi forsøk F-4 fortsatt rett etter forsøk F-3, ble ikke dette oppdaget før etter at både F-3 og F-4 var gjennomført. Resultatene viser at steglaster endte opp mellom  $+11,5$  til  $-8^{\circ}\text{C}$  med 24-timers intervaller.



Figur 7-16 Forsøk F-4. Resultater fra luftrom (LR) og sprøytebetong (SB).



Figur 7-17 Forsøk F-4. Utviklingen av laveste temperatur i Luftrommet (LR) etter hver negative steglaster i Tunnelrommet (TR).

F-4: Høyeste og laveste temperatur ved siste steglastperioder, 19.11.11 – 21.11.11.			
Sensor	Høyeste temperatur [ °C ]	Laveste temperaturnivå [ °C ]	Dempning av laveste temperaturnivå [ °C ]
Tunnelrom	11,4	-8,2	
LR75	8,2	-3,2	5
LR115	8,6	-2,6	5,6
LR160	8,8	-1,5	6,7

Tabell 7-21 Forsøk F-4. Høyeste og laveste temperatur som er målt i siste positive og negative steglastperioder (19.11.11-21.11.11).

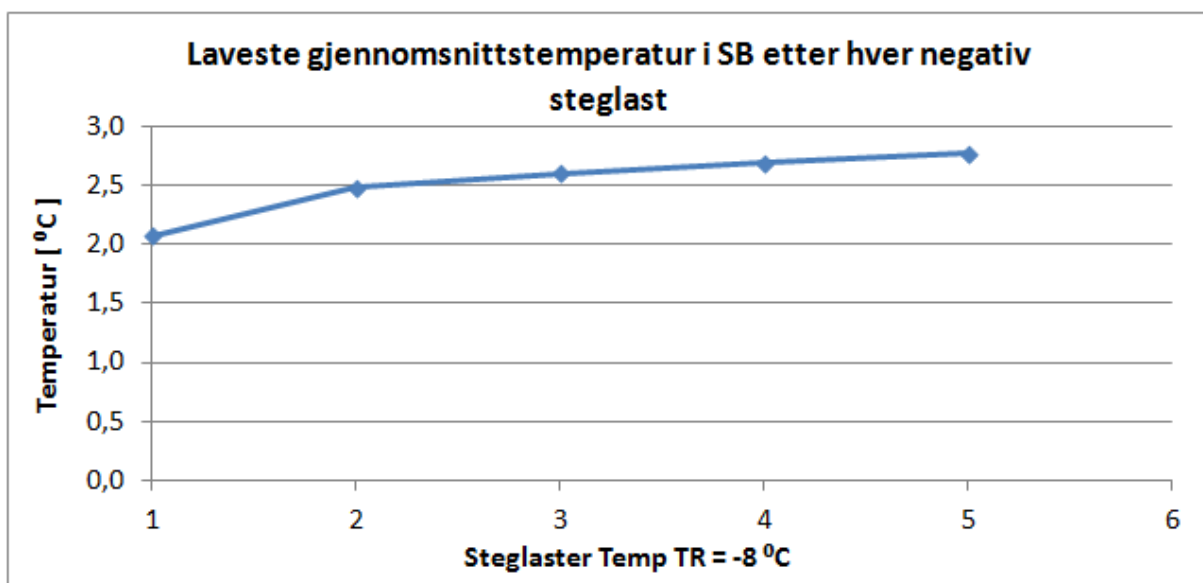
Frostmengde i F-4				
Sensor	Frostmengde hver periode [ h°C ]	Frostmengde bak T100 / Frostmengde i Tunnel $F_{LR} / F_{TR} [ \% ]$	Tid for å oppnå 3000 h°C bak T100, $F_{LR=3000}$ [ døgn ]	Frostmengden i Tunnelrommet ved $F_{LR=3000}$ i Luftrommet [ h°C ]
Tunnelrom	179	-	-	-
LR75	49	27	122	10 919
LR115	36	20	166,7	14 920
LR160	16	9	375	33 562

Tabell 7-22 Frostmengder i F-4.

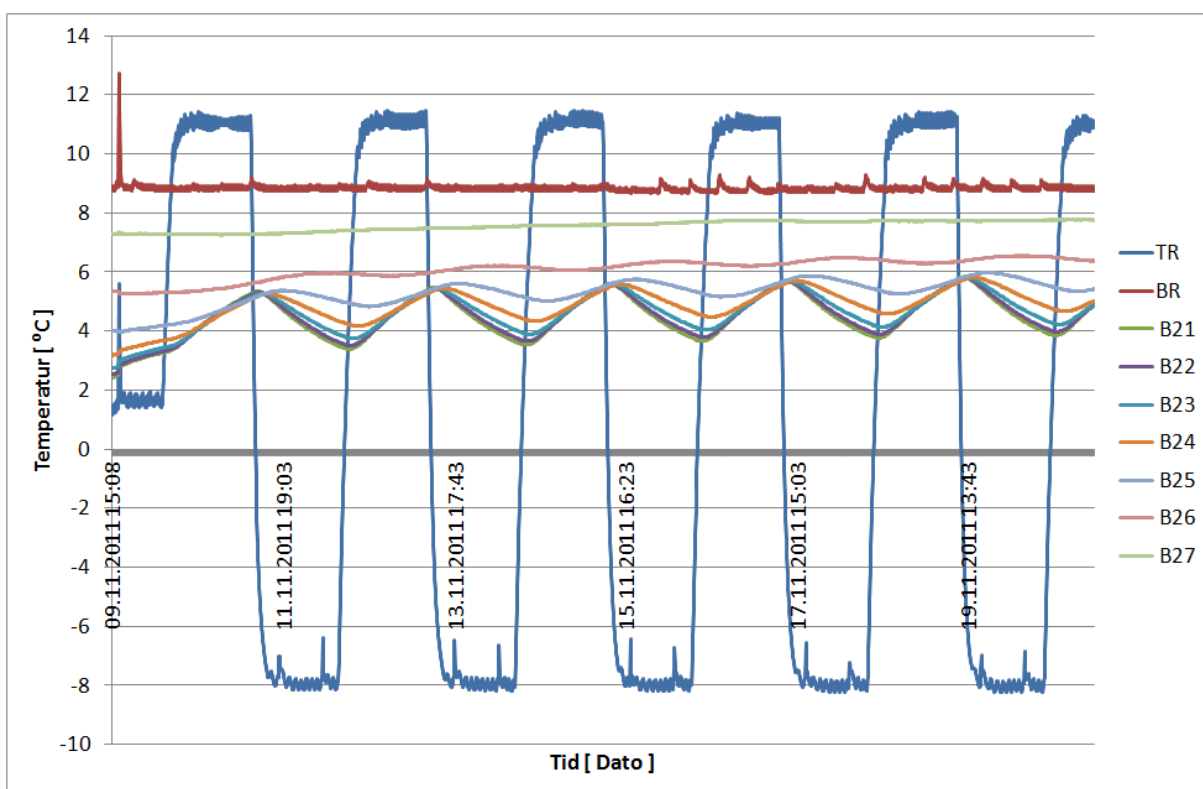
Frostmengdene for hver steglast i dette forsøket er noe lavere enn i forsøk F-3. Dette er fordi kjøleaggregatet bruker lengre tid på å justere temperaturen ned fra +11 til - 8 °C, enn fra + 2 til - 8 °C. Det tar rett i underkant av 4 timer i forsøk F-3 å kjøle ned Tunnelrommet fra +2 til - 8 °C. I forsøk F-4 tar det omtrent 4,5 timer å kjøle ned Tunnelrommet fra +11 til -8 °C. Det er denne forskjellen som gjør at frostmengden i Tunnelrommet hver periode er på 183 h°C i forsøk F-3, mens det er 179 h°C i forsøk F-4.

Når maksimumstemperaturen i Tunnelrommet ( $T_{TR}$ ) økes, viser resultatene at minimumstemperaturen som måles i Luftrommet ( $T_{LR}$ ) og sprøytebetongen ( $T_{SB}$ ) stiger, Figur 7-17 og Figur 7-18. Dette er fordi F-4 startet rett etter F-3, uten at det hadde vært kjørt en varmeperiode i mellom slik at alle temperaturene kunne stabilisert seg på +8 °C. Temperaturen i B2-blokka har også den samme utviklingen som temperaturen i Luftrommet og Sprøytebetongen og stiger mellom hver steglastperiode, Figur 7-19.





Figur 7-18 Forsøk F-4. Utviklingen av laveste gjennomsnittstemperatur i sprøytebetongen (SB) etter hver negative steglaster i Tunnelrommet (TR).



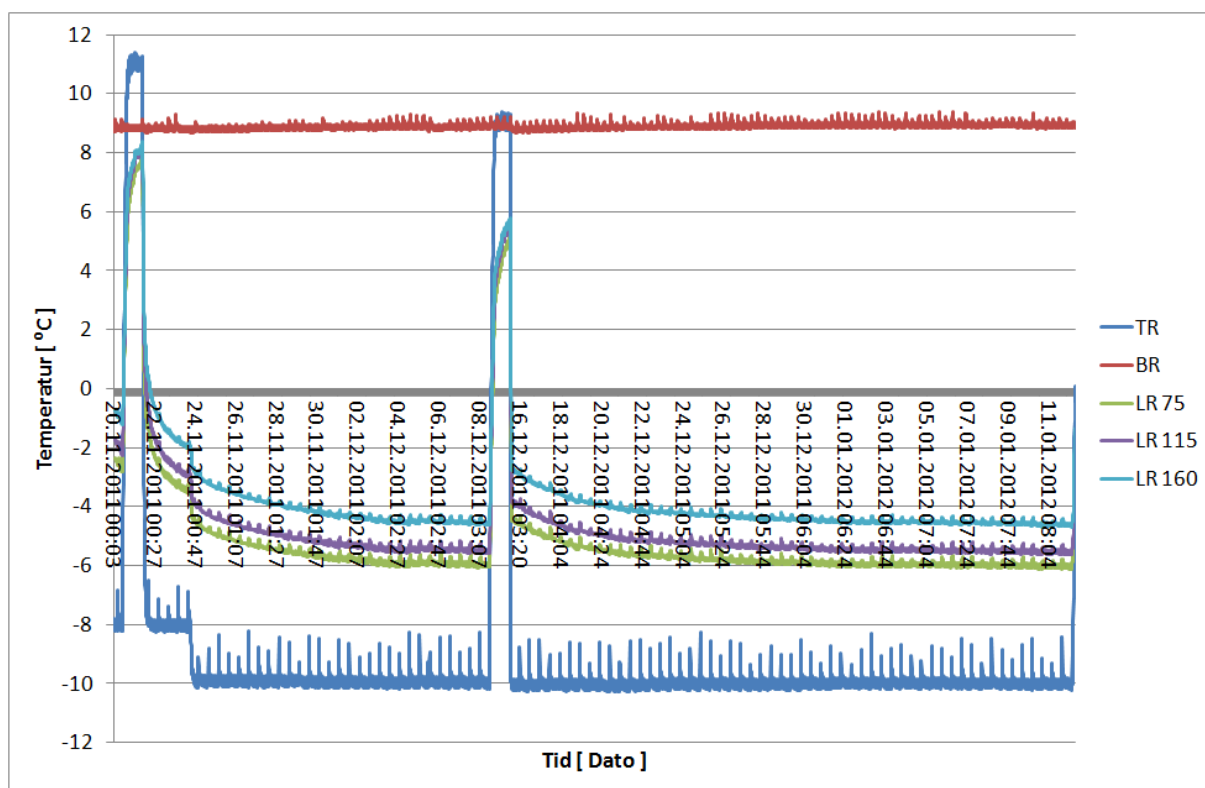
Figur 7-19 Forsøk F-4. Temperaturen i B2 blokka.

## 7.5 Forsøk F-5

Forsøk F-5 er det tredje og siste forsøket som var ment å skulle gi laboratoriedata til sammenligning med tidligere simuleringer gjort med T100. Forsøket gikk ut på å teste med jevn frostbelastning på  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Det ble valgt å kjøre forsøket i to omganger, på 2 og 4 ukers varighet. Fordelen med å teste en jevn belastning over lang tid er at resultatene da kan avsløre hvordan temperaturen i alle elementene (Luftrom, Sprøytebetong og Berg) påvirkes av tiden.

Klok av skade fra de tre foregående testene, ble innstilt temperatur på kjøleaggregatet justert etter et par dager for å oppnå ønsket temperatur i Tunnelrommet. Kjøleaggregatet til Tunnelrommet ble satt på  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ , som medførte at sensoren i Tunnelrommet registrerte  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Figur 7-20.

Den 8.12.11 ble temperaturen stilt opp til  $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$  i Tunnelrommet, og holdt slik i 6 dager. Den 13.12.11 kl 20:00 ble temperaturen stilt ned igjen til  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  frem til 12.01.12. Den 9.12 hadde loggerprogrammet hengt seg opp etter en automatisk oppdatering av datamaskinen, og ble ikke oppdaget før 15.12. Derfor er dataene fra denne perioden "mistet". Starten av temperaturforløpet etter siste stegløst fra  $+8$  til  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , vises derfor ikke i grafen, Figur 7-20.



Figur 7-20 Forsøk F-5. Resultater fra Luftrommet.

Gjennomsnittstemperatur i Luftrommet siste dagene i siste periode med $T_{TR} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$					
Sensor	Temperatur (døgn gjennomsnitt) [ $^{\circ}\text{C}$ ]				
	06.01	07.01	8.01	09.01	10.01
LR 75	-6,00	-6,00	-6,01	-6,02	-6,04
LR 115	-5,43	-5,42	-5,44	-5,45	-5,47
LR 160	-4,54	-4,54	-4,56	-4,56	-4,58

Tabell 7-23 Forsøk F-5. Gjennomsnittstemperatur siste dagene i siste periode med  $T_{TR} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Stagnasjonstemperatur ved siste stegløst ( $T_{TR} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (10.01.12)				
Sensor	Stagnasjonstemp, $T_{st}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] (10.01.12)	90 % Utflating $T_{90}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Tid før 90 % utflating $t_{90}$ [døgn]	Demping [ $^{\circ}\text{C}$ ] $T_{TR} - T_{ST}$
TR	-10,0			
LR 75	-6,0	-4,8	3,5	4
LR 115	-5,5	-4,3	3,9	4,5
LR 160	-4,6	-3,5	4,3	5,4

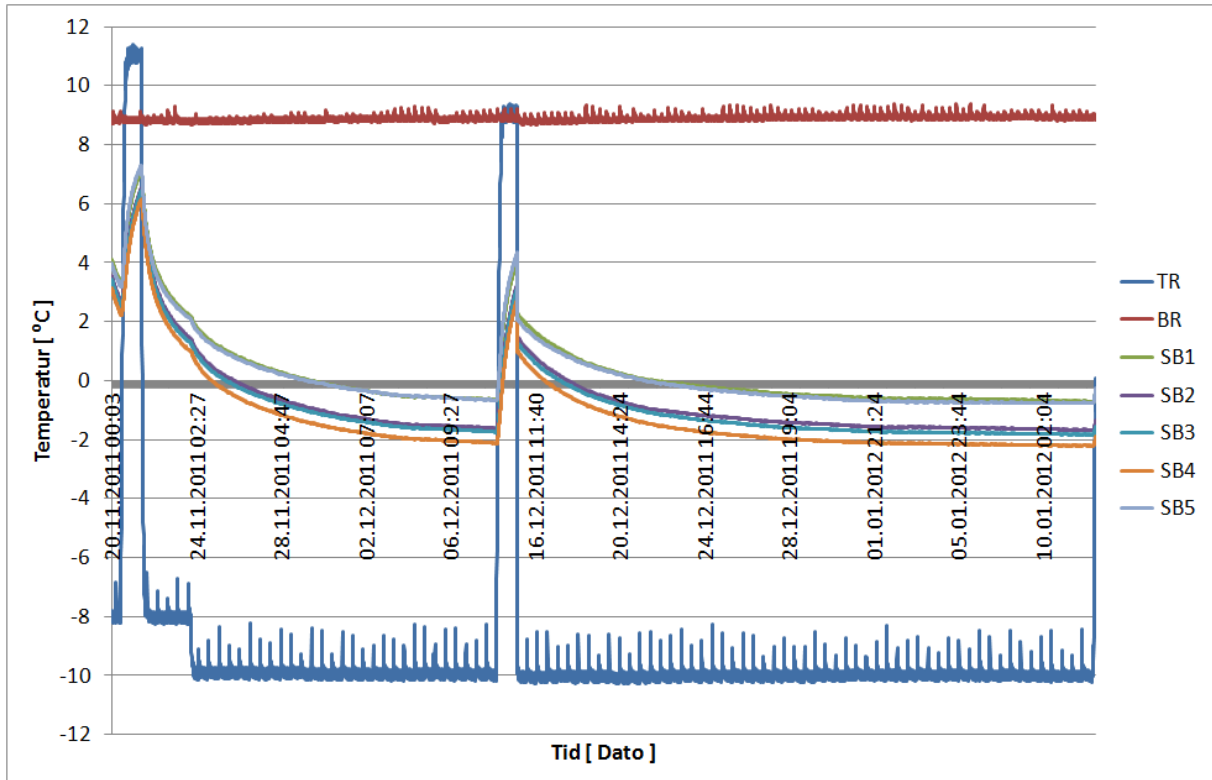
Tabell 7-24 Forsøk F-5. Stagnasjonstemperaturer i Luftrommet.

For beregninger av stagnasjonstemperaturer brukes siste kuldeperiode som eksempel. Dette er fordi her har temperaturstagneringen pågått lengst. Selv om det er mistet en del data fra de første dagene så kan fortsatt tid og temperatur ved 90 % stagnasjon leses ut.

Frostmengdene for første kuldeperiode kan berignes på vanlig måte. Oppnådde frostmengder etter første periode er presentert i Tabell 7-25. Bak T100 går ikke frostmengden over 2200 h $^{\circ}\text{C}$  i løpet av første kuldeperiode. Andre kuldeperiode blir vanskelig å beregne frostmengdene til fordi det mangler data fra de første dagene temperaturen bak T100 går under 0  $^{\circ}\text{C}$ . Det er derfor ikke regnet ut frostmengder for denne perioden.

Frostmengdeutregninger for første kuldeperiode (21.11 – 8.12.11)		
Sensor	Frostmengde [ h $^{\circ}\text{C}$ ]	Demping $F_{LR} / F_{TR}$ [ % ]
Tunnelrom (TR)	3 963	
LR 75	2 143	54
LR 115	1 934	49
LR 160	1 532	39

Tabell 7-25 Forsøk F-5. Frostmengder ved første kuldeperiode ned til -10  $^{\circ}\text{C}$ .



Figur 7-21 Forsøk F-5. Resultater fra Sprøytebetongen (SB).

Nullisothermen i sprøytebetongen og i B2-blokka blir regnet ut i den første perioden med Tunnelromtemperatur på  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dette er fordi dataene for temperaturforløpet til luftrommet er "mistet" de første dagene etter siste steglast, og det kan derfor ikke regnes ut hvilken frostmengde som er oppnådd i Luftrommet. For utregning av stagnasjonstemperaturer i sprøytebetongen og i granittblokka benyttes siste kuldeperiode.

Gjennomsnittstemperatur i Sprøytebetongen siste dagene i siste periode med $T_{TR} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$				
Sensor	Temperatur (døgn gjennomsnitt) [ $^{\circ}\text{C}$ ]			
	6.1	7.1	8.1	9.1
SB1	-0,63	-0,64	-0,65	-0,66
SB2	-1,61	-1,61	-1,62	-1,64
SB3	-1,78	-1,78	-1,79	-1,80
SB4	2,16	-2,16	-2,18	-2,19
SB5	-0,74	-0,74	-0,75	-0,75
Gjennomsnitt (SB)	1,38	-1,39	-1,40	-1,41

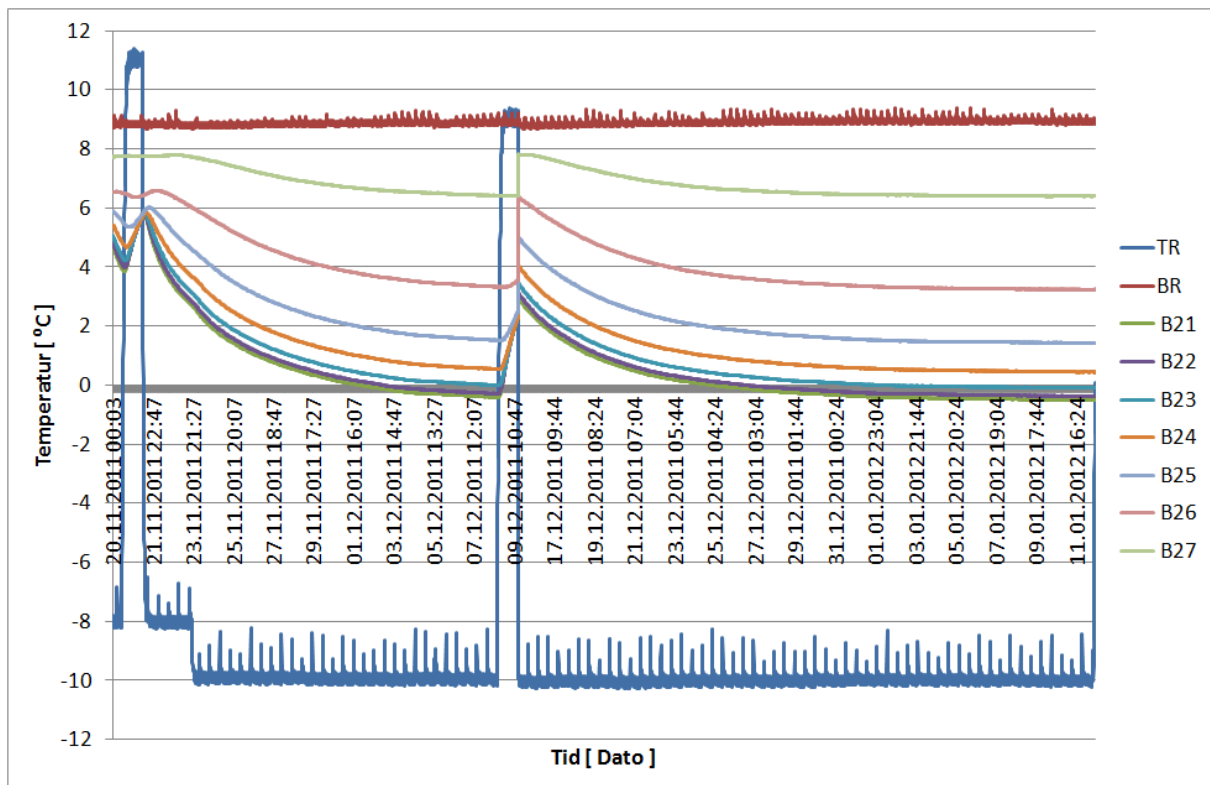
Tabell 7-26 Forsøk F-5. Døgn gjennomsnitt i sprøytebetongen (SB).

Stagnasjonstemperaturer i Sprøytebetongen (9.1)			
Sensor	Stagnasjonstemperatur, $T_{st}\text{ }[^{\circ}\text{C}](9.01.12)$	90 % Utflating $T_{90}\text{ }[^{\circ}\text{C}]$	Tid før 90% utflating ( $t_{90}$ ) [døgn]
Gjennomsnitt (SB)	-1,4	0,9	10

Tabell 7-27 Forsøk F-5. Stagnasjonstemperaturer i sprøytebetongen.

Nullisotermen i Sprøytebetongen (første kuldeperiode)			
Gjennomsnitt sprøytebetongen	Tid før det registreres negativ temperatur (Starttid: 21.11.11 kl 10:03)	Frostmengde i Tunnelrom på samme tid [h°C]	Frostmengde i Luftrom på samme tid (LR75/LR115/LR160) [h°C]
SB	5 døgn 2 timer = 122 timer (26.11.11 kl 12:07)	1 077	469/401/282

Tabell 7-28 Forsøk F-5. Nullisotermen i sprøytebetongen.



Figur 7-22 Forsøk F-5. Resultater fra granittveggen (B2).

Gjennomsnittstemperatur i B2-blokka siste dagene i siste periode med $T_{TR} = -10\text{ °C}$				
Sensor	Temperatur (døgn gjennomsnitt) [°C]			
	6.1	7.1	8.1	9.1
B21	-0,46	-0,47	-0,47	-0,48
B22	-0,34	-0,34	-0,35	-0,36
B23	-0,06	-0,06	-0,07	-0,08
B24	0,48	0,48	0,47	0,46
B25	1,46	1,45	1,44	1,44
B26	3,27	3,26	3,25	3,25
B27	6,41	6,40	6,40	6,40

Tabell 7-29 Forsøk F-5. Døgn gjennomsnitt i B2 blokka i slutten av siste periode med  $T_{TR} = -10\text{ °C}$ .

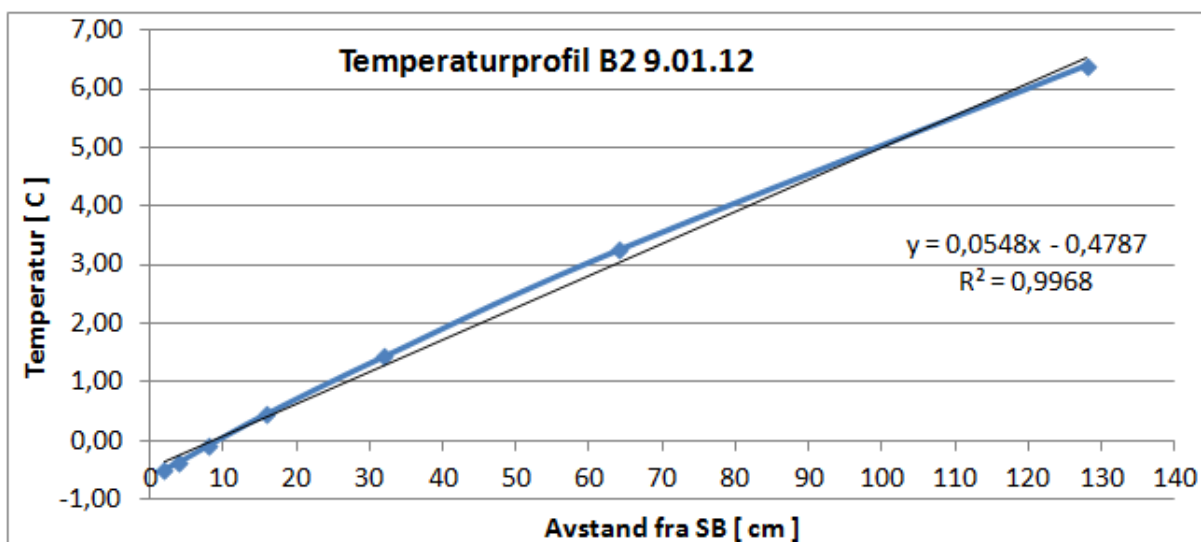
Stagnasjonstemperaturer i B2-blokka (9.1.12)			
Sensor	Stagnasjonstemperatur, Tst [°C] (9.01.12)	90 % Utflating T <sub>90</sub> [°C]	Tid før 90 % utflating (t <sub>90</sub> ) [døgn]
B21	-0,5	0,11	10,1
B22	-0,4	0,2	10,4
B23	-0,1	0,5	10,4
B24	0,5	0,9	10,9
B25	1,4	1,9	11,8
B26	3,2	3,5	14,8
B27	6,4	6,5	15,6

Tabell 7-30 Forsøk F-5. Stagnasjonstemperaturer i Granittveggen

Forsøk F-1. Nullisotermen i granittveggen (første periode med T <sub>TR</sub> = - 10 °C)			
Sensor	Tid før det registreres negativ temperatur (Starttid: 21..11.11 kl 10:03)	Frostmengde i Tunnelrom på samme tid [h°C]	Frostmengde i Luftrom på samme tid (LR75/LR115/LR160) [h°C]
B21	9,5 døgn = 252 timer (1.12.11 kl 23:47)	2380	1200/1068/817
B22	10,6 døgn = 278 timer (3.12.11 kl 01:47)	2638	1352/1207/931
B23	17 døgn = 408 timer (8.12.11 kl 09:47)	3904	2107/1902/1505

Tabell 7-31 Forsøk F-5. Nullisotermen i granittveggen første periode med T<sub>TR</sub> = - 10 °C.

Nullisotermen når 8 cm (B23) etter 17 dager i første periode med Tunnelromtemperatur (T<sub>TR</sub>) på -10 °C, Tabell 7-31. Som det fremkommer av grafen er dette da temperaturen ser ut til å ha flatet ut, Figur 7-22. 27 dager inn i andre kuldeperiode (nærmere bestemt 9.01.12) måles den stagnerte temperaturen ved 8 cm (B23) til -0,1 °C, Tabell 7-30. Temperaturprofilen gjennom B2-blokka den 9.01.12 viser at grafen krysser 0 °C ved 8-9 cm dybde. Resultatene viser god overensstemmelse for stagnasjonstemperatur og nullisotermen i begge periodene med T<sub>TR</sub> = -10 °C.



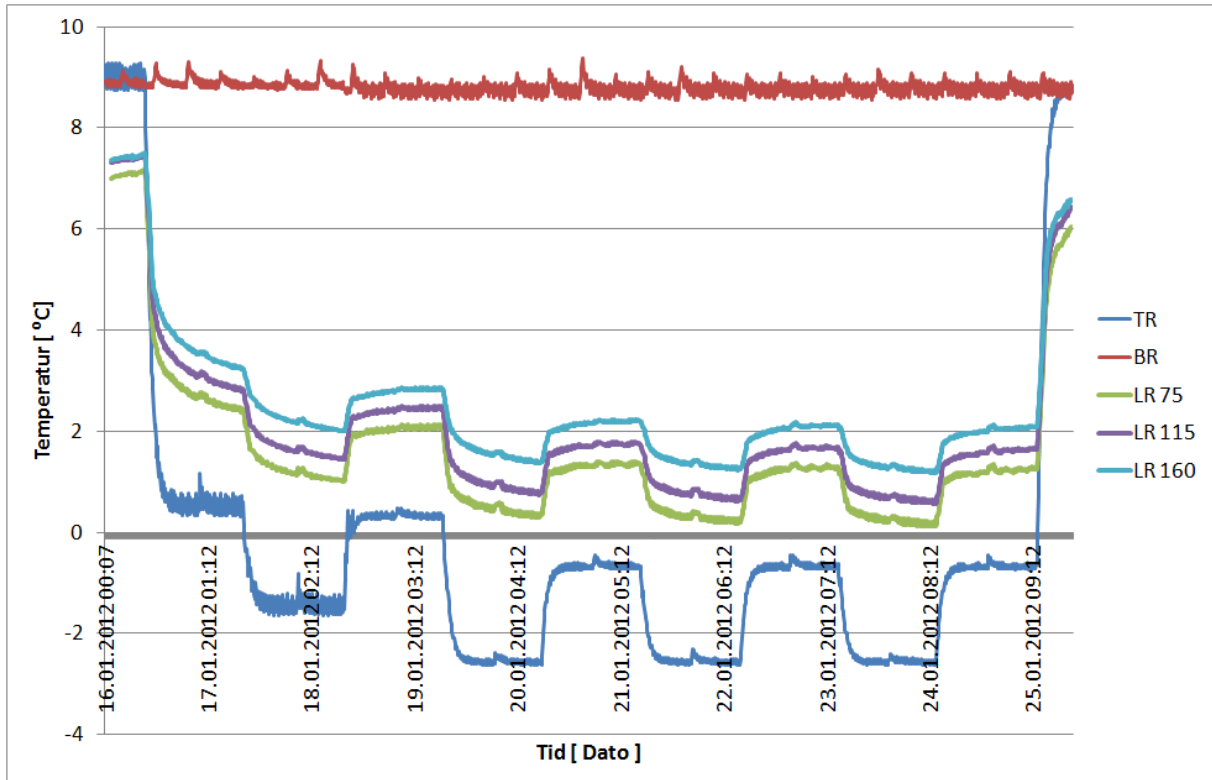
Figur 7-23 Forsøk F-5. Temperaturprofil i B2 den 9.01.12.

## 7.6 Forsøk F-6

Det var nå gjennomført tre forsøk i Frostlaboratoriet som skulle etterligne de tre scenarioene som var simulert med WG Tunnelhvelv T100 tidligere. Neste prioritering var å gjennomføre et forsøk som kunne sammenlignes med tidligere tester i frostlaboratoriet uten T100 installert. Forsøk F-6 ble derfor lagt opp slik at det skulle etterligne et forsøk fra tidligere, med steglaster mellom -3 og -1 °C med 24 timers mellomrom.

Ved den første steglasteren var temperaturen i kjøleaggregatet stilt inn på -1 og -3 °C. Etter å ha fulgt opp resultatene ble det raskt fastslått at innstillingen ga for høye temperaturmålinger fra Tunnelrommet. Innstillingen ble derfor endret til temperaturintervallene -2 og -4 °C. Målingene fra sensoren i Tunnelrommet (TR) viser steglasterne da la seg mellom -2,5 og 0,5 °C den siste perioden, Figur 7-24.

Sensoren i Tunnelrommet målte ikke -3 °C som ønsket. Forsøket avviker med 0,5 °C fra forsøket som ble gjort uten T100 tidligere. Resultatene kan likevel gi informasjon om fellestrekk og eventuelle klare forskjeller. En annen fordel med dette forsøket er at den kan analyseres sammen med resultatene fra forsøk F-2, der Tunnelrommet holdt mellom -2,5 og -2,8 over en 14 dagers periode.



Figur 7-24 Forsøk F-6. Resultater fra Luftrummet (LR).

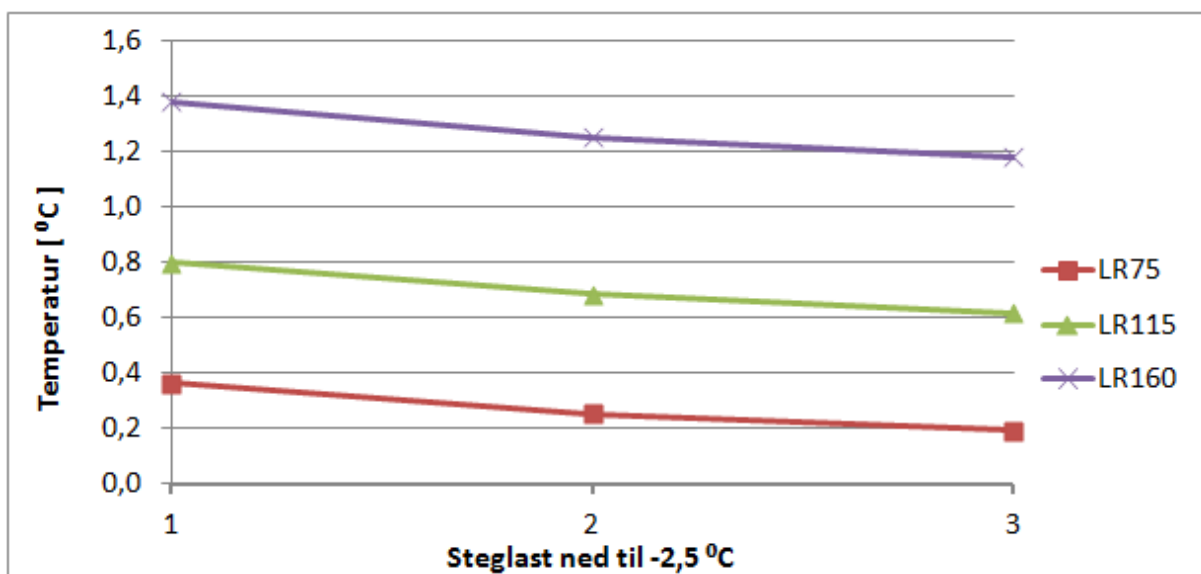
F-6: Høyeste og laveste temperatur ved siste periode (23.01 - 25.01.12)			
Sensor	Høyeste temperatur [°C]	Laveste temperaturnivå [°C]	Demping av laveste temperaturnivå [°C]
Tunnelrom	-0,6	-2,6	
LR75	+ 1,7	+ 0,19	2,79
LR115	+ 2,0	+ 0,62	3,22
LR160	+ 2,3	+ 1,18	3,78

Tabell 7-32 Forsøk F-6. Temperaturintervaller siste steglastperiode (23.01-25.01.12)

F-6: Gjennomsnitt av temperatur siste 2 timer med $T_{TR} = -2,5\text{ °C}$				
Sensor	Lavest målte temperatur de siste tre periodene [°C]			
	1.periode (T1)	2.periode (T2)	3.periode (T3)	$\Delta T (T_2-T_3)$
LR 75	+ 0,36	+ 0,25	+ 0,19	0,06
LR 115	+ 0,80	+ 0,68	+ 0,62	0,06
LR 160	+ 1,38	+ 1,25	+ 1,18	0,07

Tabell 7-33 Forsøk F-6. Gjennomsnitt av temperaturer i Luftrummet siste 2 timer av hver periode med  $T_{TR}$ (Tunnelrom temperatur) = -2,5 °C.





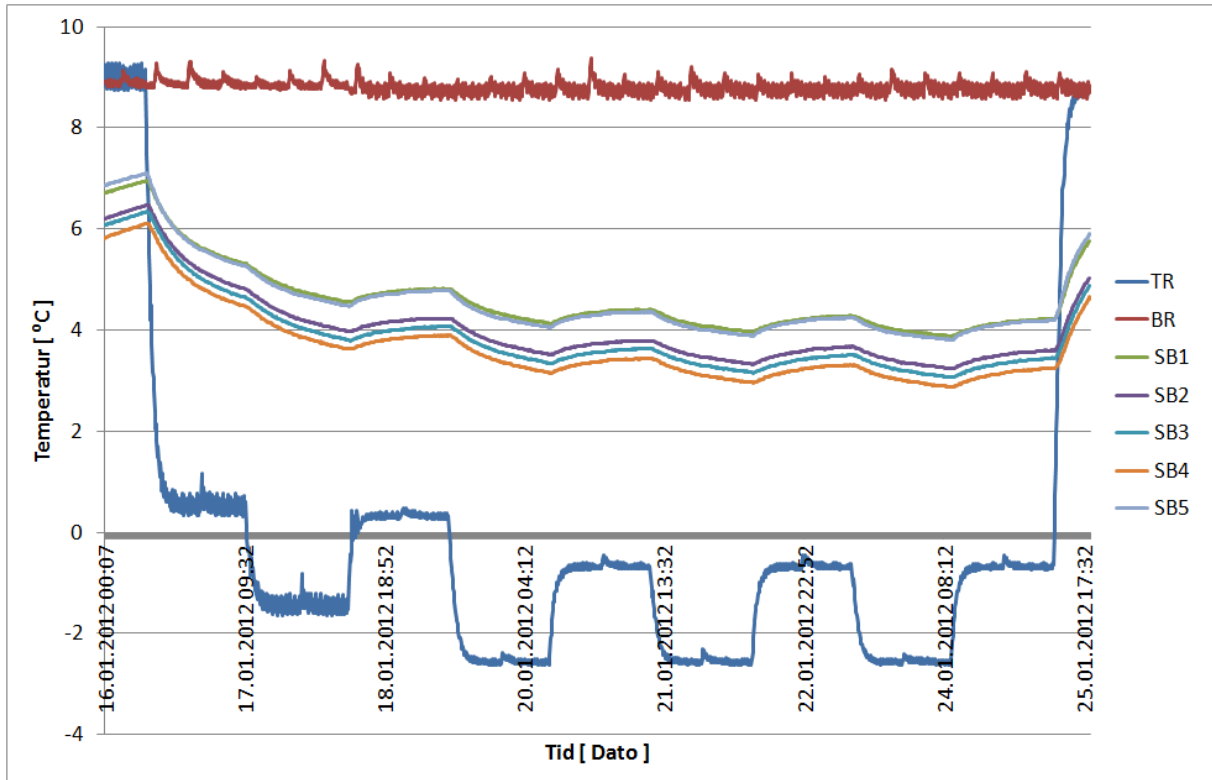
Figur 7-25 Forsøk F-6. Laveste temperaturen som ble målt i Luftrommet (LR) etter hver steglast med  $T_{TR} = -2,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

I løpet av forsøket ble det gjennomført 4 perioder med temperaturskiftninger. De tre siste periodene ble gjennomført med steglaster mellom  $-0,5$  og  $-2,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Resultatene viser at temperaturen i Luftrommet flater ut mot slutten, Figur 7-25 og Tabell 7-33. Avviket mellom laveste temperatur 2 og 3. periode ligger på mellom  $0,06$  og  $0,07 \text{ }^{\circ}\text{C}$  for alle sensorene i Luftrommet.

Det ble ikke målt frostmengder ( $\text{h}^{\circ}\text{C}$ ) i Luftrommet dette forsøket, Tabell 7-34. Siden differansen mellom laveste temperatur 2. og 3. periode er av minimal størrelse antas det at stagnasjonstemperaturen kommet til å ligge over  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  i alle høydene i Luftrommet, se Tabell 7-33. Med denne antagelsen i bakhånd ville en videre testing av steglaster mellom  $-0,5$  og  $-2,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ikke ført til frostmengder eller negative temperaturer i Luftrommet.

Frostmengde i F-6.			
Sensor	Frostmengde hver periode [ $\text{h}^{\circ}\text{C}$ ]	Frostmengde gjennom hele forsøket [ $\text{h}^{\circ}\text{C}$ ]	Demping [%] $(F_{TR} - F_{LR}) / F_{TR}$
Tunnelrom	76,5	263	-
LR 75	0	0	100
LR 115	0	0	100
LR 160	0	0	100

Tabell 7-34 Forsøk F-6. Frostmengder i Tunnelrom og Luftrom siste periode.

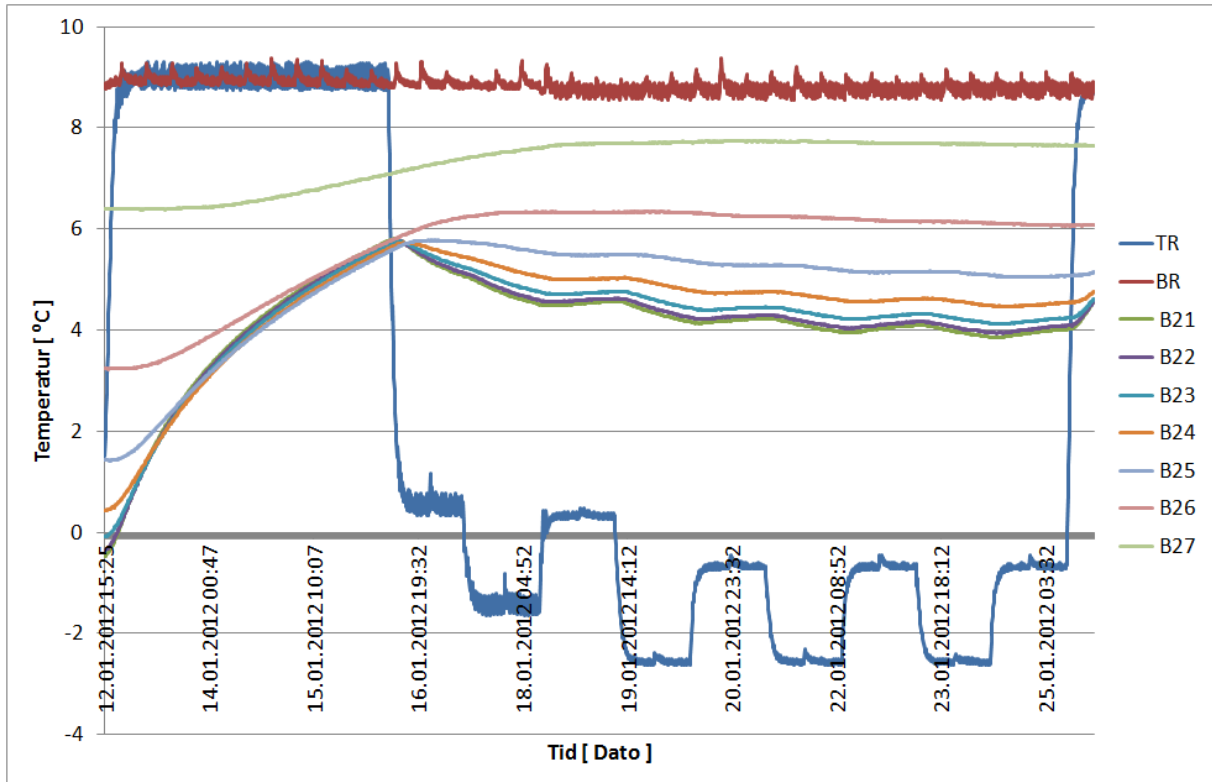


Figur 7-26 Forsøk F-6. Resultater fra Sprøytebetongen.

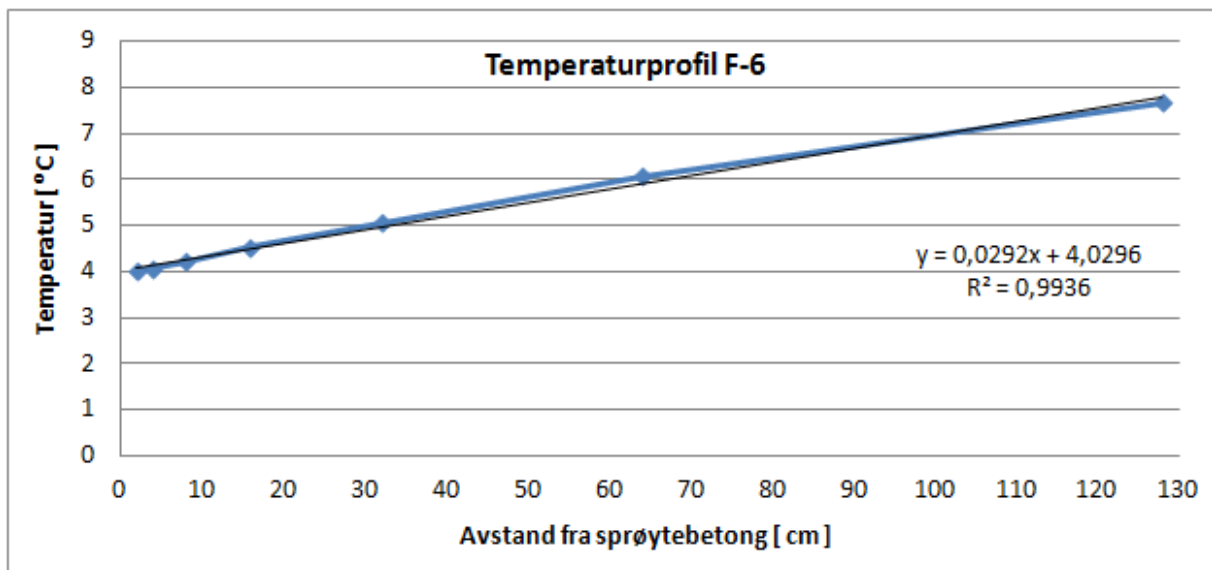
F-6: Laveste temperaturer i Sprøytebetongen (SB) siste periode (23.01 - 25.01.12)				
Målepunkt	Lavest målte temperatur de siste tre periodene [ °C ]			
	1.periode (T <sub>1</sub> )	2.periode (T <sub>2</sub> )	3.periode (T <sub>3</sub> )	ΔT (T <sub>2</sub> -T <sub>3</sub> )
SB	+ 3,64	+ 3,45	+ 3,37	0,08

Tabell 7-35 Forsøk F-6. Laveste målte temperatur i Sprøytebetongen (SB) etter hver periode.

Resultatene viser at sprøytebetongen stabiliserer seg mot en temperatur mellom 2 og 3 °C. Granittblokka B2 viser at temperaturen synker ned til 4 °C ytterst i veggen (B21, B22). Grafene avslører at sprøytebetongen og granittblokka ikke har rukket å stabilisere seg i løpet av varmeperioden til den temperaturen Bergrommet holder, Figur 7-26 og Figur 7-27. Sensoren 128 cm inn i blokka fortsetter å stige i temperatur etter at forsøket starter.



Figur 7-27 Forsøk F-6. Resultater fra granittveggen (B2).



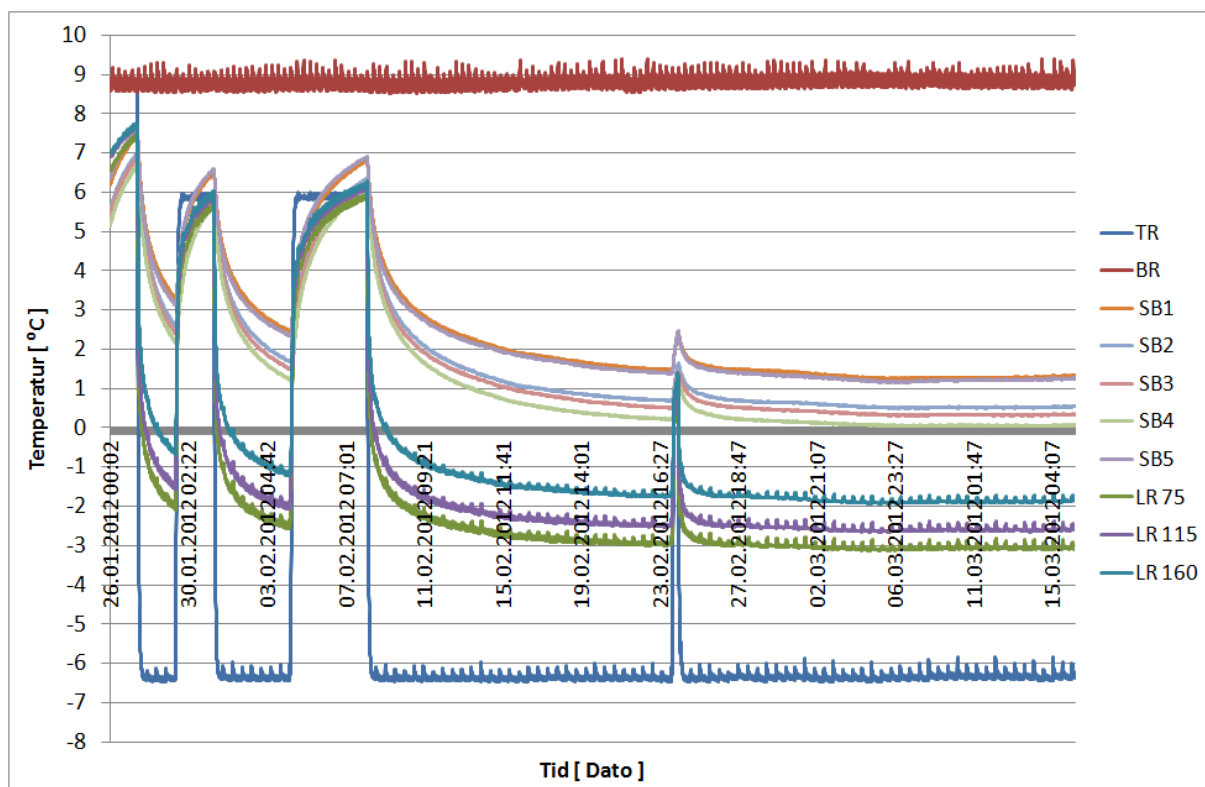
Figur 7-28 Forsøk F-6. Temperaturprofil gjennom granittveggen (B2) (dato: 25.01.12. kl 03:00).

## 7.7 Forsøk F-7

Forsøk F-7 er en blanding mellom en fluktuerende test og en langvarig stabil test. I virkeligheten fluktuierer temperaturen i stor grad, og det er derfor viktig å se på sammenhengen mellom stabile forhold og fluktuerende forhold, slik at mest mulig nyttig informasjon kan hentes ut.

Etter å ha testet med temperaturer på -15, -10, -8, -2,8 og -2,5 °C skulle det nå testes for med en temperatur som lå midt mellom, da ble det -6 °C. Av tidligere er erfaringer måles temperaturen i Tunnelrommet lavere enn den som stilles inn på kjøleaggregatet. Derfor ble kjøleaggregatet satt på -8 °C. Som resultatene viser så endte den målte temperaturen i Tunnelrommet på cirka -6,3 °C.

Temperaturforløpet i testen går som følger: Den 27.01 synker temperaturen i Tunnelrommet fra +8°C til -6,3°C, og holdes der i to døgn. Temperaturen blir deretter satt opp til +6 °C i to dager. Deretter blir temperaturen igjen satt ned til -6,3°C i 4 dager, og opp til +6°C i 4 dager, før temperaturen til slutt settes ned til -6,3 °C i en lang periode.



Figur 7-29 Forsøk F-7. Resultater fra Luftrom (LR) og Sprøytebetong (SB).

Temperaturen i luftrommet viser igjen den karakteristiske "tregheten", som går igjen i hvert forsøk, hvor temperaturen først stuper og deretter flater mer og mer ut mot en gitt temperatur. Luftrommet har en temperaturforskjell på 2 °C mellom temperaturene i høyde 75 cm og i høyde 160, mot slutten av forsøket, Figur 7-29. Det kan også se ut til at

temperaturene i luftrommet ligger omtrent midt mellom temperaturene målt i sprøytebetongen og temperaturen i Tunnelrommet.

Gjennomsnittstemperatur i Luftrommet siste del av forsøket med $T_{TR} = -6,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$					
Sensor	Temperatur (døgngjennomsnitt) [ $^{\circ}\text{C}$ ]				
	11.03	12.03	13.03	14.03	15.03
LR 75	-3,06	-3,06	-3,06	-3,07	-3,04
LR 115	-2,58	-2,58	-2,58	-2,59	-2,57
LR 160	-1,89	-1,89	-1,89	-1,89	-1,87

Tabell 7-36 Forsøk F-7. Gjennomsnittstemperaturer i Luftrommet mot slutten av siste periode med  $T_{TR} = -6,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Stagnasjonstemperatur i Luftrommet (Gjennomsnitt 14.03.12)				
Sensor	Stagnasjonstemperatur, $T_{st}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] (15.03)	90 % Utflating $T_{90}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Tid før 90% utflating ( $t_{90}$ ) [døgn]	Demping [ $^{\circ}\text{C}$ ] $T_{TR}-T_{ST}$
TR	-6,3	-		
LR 75	-3,0	-2,1	1,9	3,3
LR 115	-2,6	-1,6	2	3,7
LR 160	-1,9	-1,1	3,4	4,4

Tabell 7-37 Forsøk F-7. Stagnasjonstemperaturer i Luftrommet.

Som resultatene i Tabell 7-36 viser, så svinger gjennomsnittstemperaturen i luftrommet mellom et lite temperaturintervall, eksempelvis mellom  $-2,57$  og  $-2,59^{\circ}\text{C}$  for LR115. At temperaturen svinger skyldes naturlig nok at temperaturen i Tunnelrommet svinger på grunn av at kjøleaggregatet slår seg av og på, Figur 7-29. Frostmengdene i luftrommet ligger på 25-45 % av frostmengden i Tunnelrommet i løpet av den siste lange kuldeperioden, Tabell 7-38.

Frostmengdeutregninger (08.02.12 – 16.03.12)		
Sensor	Frostmengde [ $\text{h}^{\circ}\text{C}$ ]	Demping $F_{LR}/F_{TR}$ [ % ]
Tunnelrom (TR)	5 564	
Luftrom: LR 75	2 476	44,5
Luftrom: LR 115	2 039	36,7
Luftrom: LR 160	1 407	25,3

Tabell 7-38 Forsøk F-7. Frostmengder i Luftrommet.

Gjennomsnittstemperatur i Sprøytebetongen siste dagene i siste periode med $T_{TR} = -6,3 \text{ }^\circ\text{C}$					
Sensor	Temperatur (døgngjennomsnitt) [ $^\circ\text{C}$ ]				
	11.03	12.03	13.03	14.03	15.03
SB1	1,27	1,27	1,28	1,29	1,31
SB2	0,52	0,52	0,52	0,52	0,53
SB3	0,33	0,32	0,32	0,32	0,33
SB4	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06
SB5	1,21	1,21	1,22	1,22	1,24
SB (Gjennomsnitt)	0,68	0,68	0,68	0,68	0,7

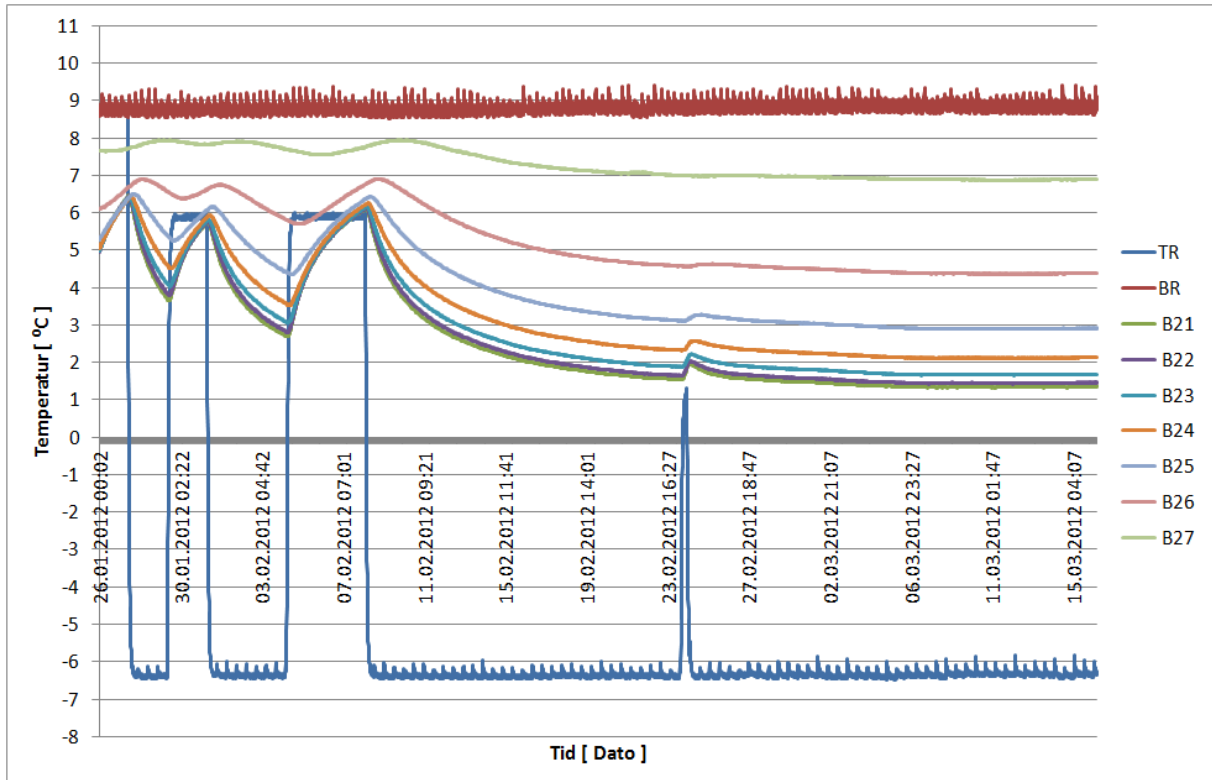
Tabell 7-39 Forsøk F-7. Døgngjennomsnitt ( $^\circ\text{C}$ ) i sprøytebetongen.

Stagnasjonstemperatur ( $T_s$ ) i sprøytebetongen (gjennomsnitt fra døgnet 14.03.12)			
Sensor	Stagnasjonstemperatur, $T_{st}$ [ $^\circ\text{C}$ ] (15.03)	90 % Utflating $T_{90}$ [ $^\circ\text{C}$ ]	Tid før 90% utflating ( $t_{90}$ ) [døgn]
SB (Gj.snitt)	0,7	1,3	6,7

Tabell 7-40 Forsøk F-7. Stagnasjonstemperatur i sprøytebetongen.

Nullisotermen når ikke inn til sensorene i sprøytebetongen i dette tilfellet. Laveste temperatur som måles er  $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ , så det kan antas at ytterste del av sprøytebetongen har en temperatur som ligger på 0 grader, og kanskje like under nullpunktet.

Det er vanskelig å avgjøre hvor lang tid det tar før utflating av temperaturen i sprøytebetongen fordi temperaturen i Tunnelrommet gjør et hopp til rett over nullpunktet den 24.02. På det tidspunktet temperaturen i Tunnelrommet stiger har ikke sprøytebetongen nådd en stagnasjonstemperatur, slik at det tar derfor mye lengre tid før stagnasjonstemperaturen nås. Ved skjønn antas det vil ta ca 16-17 dager før en fullstendig utflating av temperaturen.



Figur 7-30 Forsøk F-7. Resultater fra Granittveggen (B2)

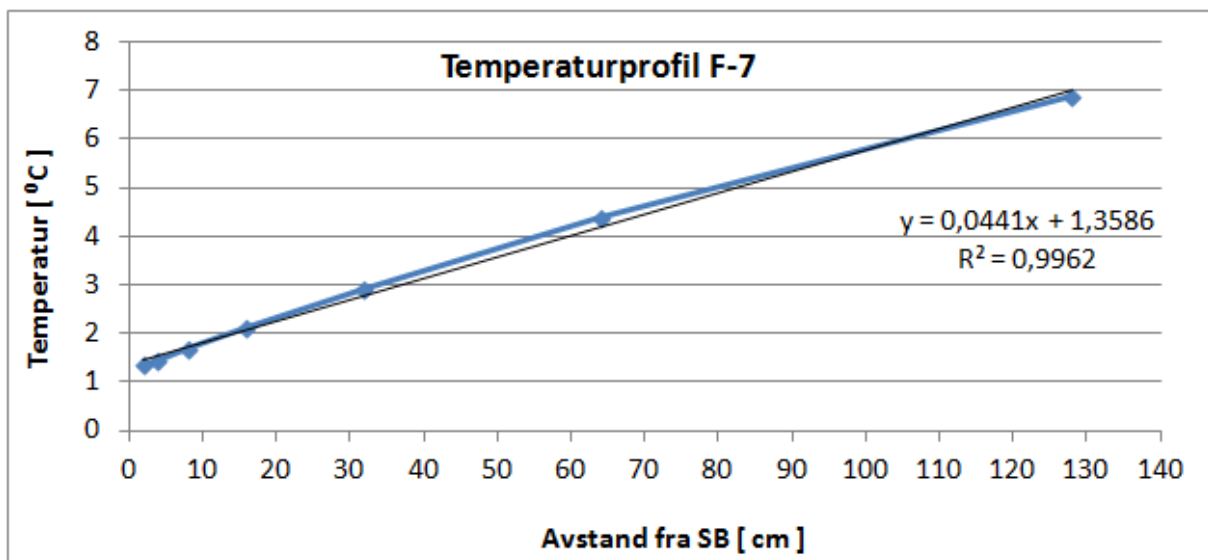
Fordi temperaturforløpet til temperaturen i Tunnelrommet ikke var jevn frem til en stagnasjon av temperaturen i Granittveggen, er det vanskelig å si noe sikkert om hvor lang tid det ville tar før en stagnasjon. Det kan antas at det tar mellom 17 – 19 dager.

Gjennomsnittstemperatur i B2-blokks siste dagene i siste periode med $T_{TR} = -6,3\text{ °C}$					
Sensor	Temperatur (dønggjennomsnitt) [°C]				
	11.03	12.03	13.03	14.03	15.03
B21	1,34	1,33	1,34	1,34	1,35
B22	1,44	1,44	1,44	1,44	1,45
B23	1,67	1,67	1,67	1,67	1,68
B24	2,11	2,11	2,11	2,11	2,12
B25	2,90	2,90	2,90	2,90	2,91
B26	4,36	4,36	4,37	4,37	4,38
B27	6,87	6,87	6,88	6,88	6,89

Tabell 7-41 Forsøk F-7. Dønggjennomsnitt (°C) i B2-blokka

Stagnasjonstemperaturer (Ts) i Granittveggen (B2)			
Sensor	Stagnasjonstemperatur, Tst [°C] (15.03)	90 % Utflating T90 [°C]	Tid før 90% utflating (t90) [døgn]
B21	1,4	1,8	9,7
B22	1,5	2	9,7
B23	1,7	2,1	11,1
B24	2,1	2,5	12,0
B25	2,9	3,3	12,9
B26	4,4	4,7	13,1
B27	6,9	7	15,6

Tabell 7-42 Forsøk F-7. Stagnasjonstemperaturer i Granittveggen.



Figur 7-31 Forsøk F-7. Temperaturprofil i B2, med stagnasjonstemperaturene Ts fra Tabell 7-42.



## 8 Frostbeskyttelsen til WG Tunnelhvelv T100 i

### Frostlaboratoriet

Etter å ha gjennomført 7 ulike tester med WG Tunnelhvelv T100 i Frostlaboratoriet summeres det nå opp de observasjoner som er gjort gjennom forsøkene.

#### 8.1 Hvordan beskytter WG Tunnelhvelv T100 mot kulde i Frostlaboratoriet?

I frostlaboratoriet er sprøytebetongen den ytterste overflaten som først eksponeres for temperaturene i luftrommet. Uten T100 vil overflaten i sprøytebetongen eksponeres direkte for temperaturen i Tunnelrommet. Den praktiske betydningen av å installere T100 i Frostlaboratoriet vil være forskjellen i temperatur mellom Luftrom og Tunnelrom. Ut fra resultatene kan det fremmes følgende påstander om frostbeskyttelsen til WG Tunnelhvelv T100:

- 1. Påstand: WG Tunnelhvelv T100 har en "dempende effekt".

Resultatene fra Frostlaboratoriet viser at stagnasjonstemperaturen i Luftrommet ( $T_{st}$ ) ligger lavere enn for Tunnelrommet i alle tilfeller når  $T_{TR} < T_{BR}$ . Hvor stor forskjell det er mellom temperaturen i Tunnelrommet og i Luftrommet varierer fra forsøk til forsøk, Tabell 8-1. Resultatene i tabellen viser at dempningen mellom temperaturene i Tunnelrom og Luftrom stiger med synkende temperatur i Tunnelrommet ( $T_{TR}$ ).

Forskjell mellom temp i Tunnelrom( $T_{TR}$ ) og stagnasjonstemperatur i Luftrom ( $T_{st}$ ) ( $T_{TR} - T_{st}$ ) [°C]				
Sensor	F-1: $T_{TR} = -15$ °C	F-5: $T_{TR} = -10$ °C	F-7: $T_{TR} = -6,3$ °C	F-2: $T_{TR} = -2,7$ °C
$T_{TR} - T_{st}$ (LR 75)	5,6	4	3,3	2,9
$T_{TR} - T_{st}$ (LR 115)	6,2	4,5	3,7	3,4
$T_{TR} - T_{st}$ (LR 160)	7,3	5,4	4,4	3,9

Tabell 8-1 Forskjell/dempning mellom temperatur i Tunnelrommet ( $T_{TR}$ ) og stagnasjonstemperatur i Luftrommet ( $T_{st}$ ).

- 2. Påstand: WG Tunnelhvelv T100's dempende effekt øker med høyden over gulvnivå.

I alle forsøkene i Frostlaboratoriet er det målt en forskjell i temperatur i Luftrommet som avhenger av høyden over gulvnivå. For alle tilfeller når  $T_{TR} < T_{BR}$  så øker temperaturen med høyden i Luftrommet. Dette er gjeldende for alle forsøk, både ved tester der temperaturen svinger, og ved tester med jevn temperatur i Tunnelrommet.

I de testene som ble kjørt med jevn temperaturbelastning i Frostlaboratoriet lå forskjellen i temperatur mellom høyeste og laveste høydenivå ( $T_{st}(LR75) - T_{st}(LR160)$ ) på 1-1,7 °C, Tabell

8-1. Temperaturforskjellen mellom høyeste og laveste nivå i Luftrommet øker med lavere temperatur i Tunnelrommet.

- 3. Påstand: WG Tunnelhvelv T100 har en "forsinkende effekt".

Temperaturen i Tunnelrommet synker brått med en gitt steglaster. Responser i luftrommet er at temperaturen synker, men med et lavere tempo. I forsøk F-1 med den største steglaster  $\Delta T_0 = 23 \text{ }^\circ\text{C}$  bruker Tunnelrommet 4,5 timer på å senke temperaturen fra +8 til -15  $^\circ\text{C}$ . Det blir sett bort ifra den tiden det tar å senke temperaturen i Tunnelrommet siden det går relativt raskt. Tiden det tar for luftrommet å nå 90 % stagnasjon blir regnet fra det øyeblikket temperaturen i Tunnelrommet starter å synke.

Samlede resultater av tiden for 90 % stagnasjon for alle forsøkene er vist i tabell?.

Resultatene viser at tiden det tar for å nå 90 % stagnasjon er svært lik for forsøkene F-1, F-5 og F-2. I forsøk F-7 tar det noe kortere tid, enn de andre forsøkene. Forsøk F-7 skiller seg også ut fra de andre forsøkene ved at starttemperaturen begynner på +6  $^\circ\text{C}$ .

Tid før 90 % utflating, $t_{90}$ [døgn]				
Sensor	F-1 $T_0(\text{TR})= 8 \text{ }^\circ\text{C}$ $(\Delta T_0 = 23 \text{ }^\circ\text{C})$	F-5 $T_0(\text{TR})= 8 \text{ }^\circ\text{C}$ $(\Delta T_0 = 18 \text{ }^\circ\text{C})$	F-7 $T_0(\text{TR})= 6 \text{ }^\circ\text{C}$ $(\Delta T_0 = 12,3 \text{ }^\circ\text{C})$	F-2 $T_0(\text{TR})= 8 \text{ }^\circ\text{C}$ $(\Delta T_0 = 10,7^\circ\text{C})$
LR 75	3,5	3,5	1,9	3,6
LR 115	3,8	3,9	2	3,6
LR 160	4,4	4,3	3,4	4,8

Tiden det tar før utflating til 90 % av stagnasjon viser at luftrommet i tillegg til å dempe temperaturen, også har en forsinkelse på rundt 3-4 dager hvor temperaturen i luftrommet ligger under 90 % av stagnasjon. Det vil si at i tidsrommet frem til 3-4 dager så er dempingen enda større enn den estimerte stagnasjonstemperaturen. Resultatene fra forsøkene med svingninger (F-3, F-4 og F-6) viser at når temperaturen i Tunnelrommet skifter oftere så rekker ikke temperaturen i Luftrommet å nå utflating, og dermed blir den laveste målte temperaturen høyere enn den som måles ved stagnasjon, og frostbelastningen på berget blir mindre.

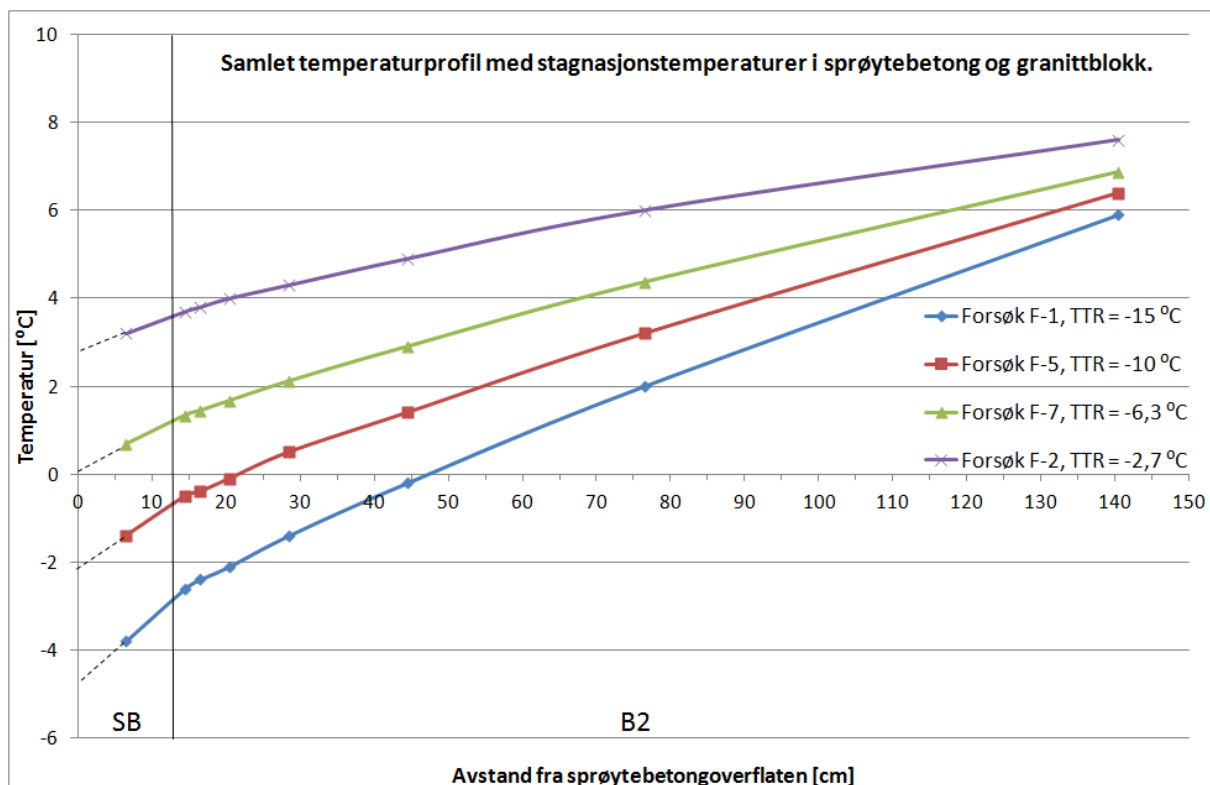
- Hvor stor frostbelastning kan WG Tunnelhvelv T100 påføres før det oppstår frostproblemer bak konstruksjonen?

For å gjøre et forsøk på å svare på dette spørsmålet må det først defineres hva som skal til for å få et frostproblem. Med fokus på frostsprengning og isdannelse så vil et frostproblem oppstå i det tilfellet når  $0^\circ\text{C}$ -isotermen når overflaten av sprøytebetongen. Dette er det tidspunktet vannet kan fryse i konturen rundt tunnelåpningen.

I resultatene ble stagnasjonstemperaturer for alle sensorer regnet ut for forsøk med jevn temperaturbelastning. For å kunne si noe om når 0°C-isotermeren når overflaten av sprøytebetongen, ble det laget diagrammer over stagnasjonstemperatur plottet mot avstand til sensor. Ved å sette overflaten på sprøytebetongen ved  $s=0$ , kan grafen forlenges frem til dette punktet for å lese av temperatur.

Stigningstallet for temperaturprofilen gjennom sprøytebetongen vil ikke være den samme som for stigningstallet til temperaturen gjennom granittblokka. Dette skyldes at materialfaktorene for termiske konduktivitet (varmekonduktivitet) er forskjellig i sprøytebetong og i granitt, kapittel 4.1. Resultatene fra temperaturprofilene for stagnasjonstemperatur viser at stigningstallet for kurven øker gjennom sprøytebetongen, Figur 8-1. Dette tyder på at sprøytebetongen har en lavere termisk konduktivitet enn granitten, og leder varme dårligere gjennom materialet.

Ved forlengelsen kurven for temperaturprofilen frem til  $s=0$  er det derfor forsøkt å følge den helningen som kurven ser ut til å ha gjennom sprøytebetongmaterialet.



**Figur 8-1 Stagnasjonstemperaturer gjennom sprøytebetongen og granittblokka fra 4 forsøk i Frostlaboratoriet.**

Ut fra forlengelsen av temperaturprofilene ser det ut til at kurven fra forsøk F-7 har en temperatur i overflaten av sprøytebetongen (mot luftrommet) som ligger rundt 0 °C. Temperaturen i Tunnelrommet i forsøk F-7 er -6,3 °C. Resultatene fra Frostlaboratoriet tilsier derfor at når temperaturen i Tunnelrommet er høyere enn -6,3 °C så vil ikke overflaten på sprøytebetongen ( $s = 0$  cm) fryse.

## 8.2 Resultater fra tester i Frostlaboratoriet uten WG Tunnelhvelv

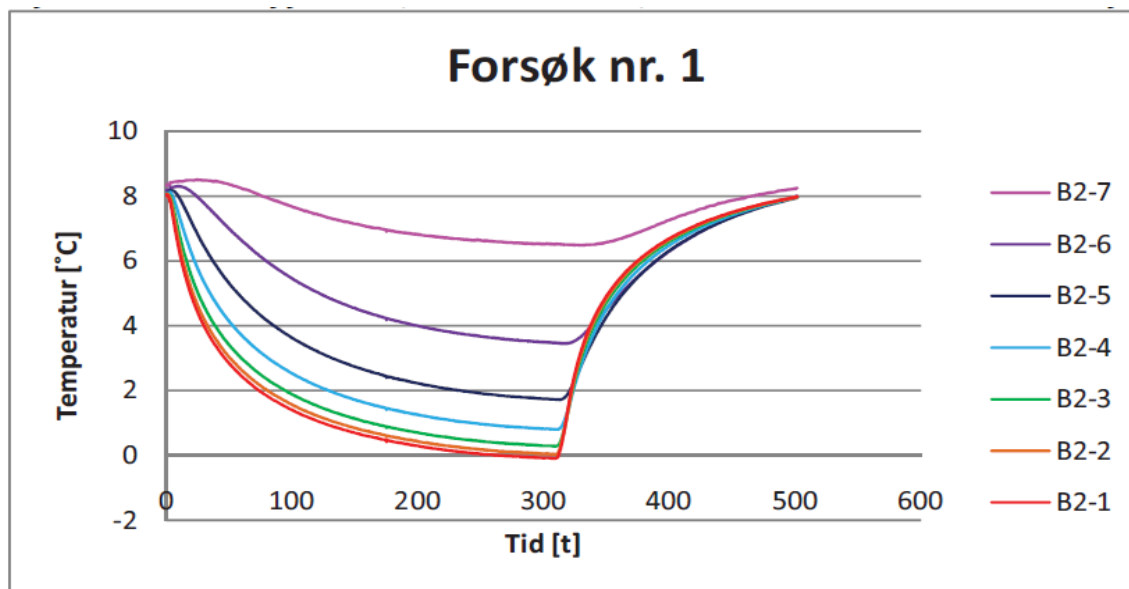
### T100.

Frostlaboratoriet ble bygd opp i et fellesprosjekt for å teste vann og frostsikringskonseptet med sprutbar membran mellom to lag av sprøytebetong. Det ble gjort flere tester med sprutbar membran, men de som nevnes her er kun de som har fellestrekk med tester som er gjort med T100. For nærmere beskrivelser rundt resultatene uten T100 vises det til tidligere rapport, (Grøv & Vassenden, 2011). Merk at i rapporten er sensorene som her refereres til som "sprøytebetong 1-5 (SB)", kalt for "Membran 1-5".

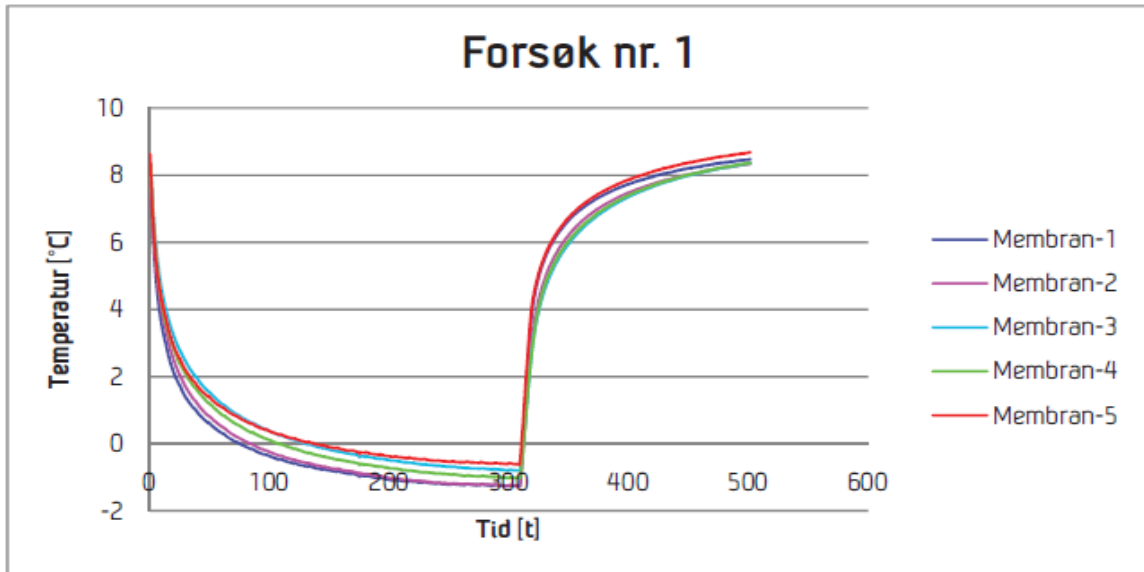
Forsøk uten T100 med jevn temperaturbelastning			
Forsøk	Temperatur i Tunnelrom ( $T_{TR}$ ) [°C]	Temperatur i Bergrom( $T_{BR}$ ) [°C]	Varighet [timer]
Forsøk nr.1	-3,6	+8,5	310
Forsøk nr.2	-17,5	+9,5-11,5	190

Tabell 8-2 Tidligere forsøk uten T100 med jevn temperaturbelastning (Grøv & Vassenden, 2011).

Ut fra testkjøringen uten T100 er det to forsøk som er gjennomført med jevn temperatur i tunnelrommet, Tabell 8-2. I forsøk nr. 1 uten T100 viser resultatene at temperaturen har flatet ut. Representativ sluttemperatur er funnet ved å ta gjennomsnittstemperatur i sprøytebetong(membran) og i B21 de siste 2 timene før temperaturen i Tunnelrommet justeres tilbake til +8 grader. Det ser ut til at grafene har nådd utflating, men det er likevel valgt å kalle dette for sluttemperaturer.

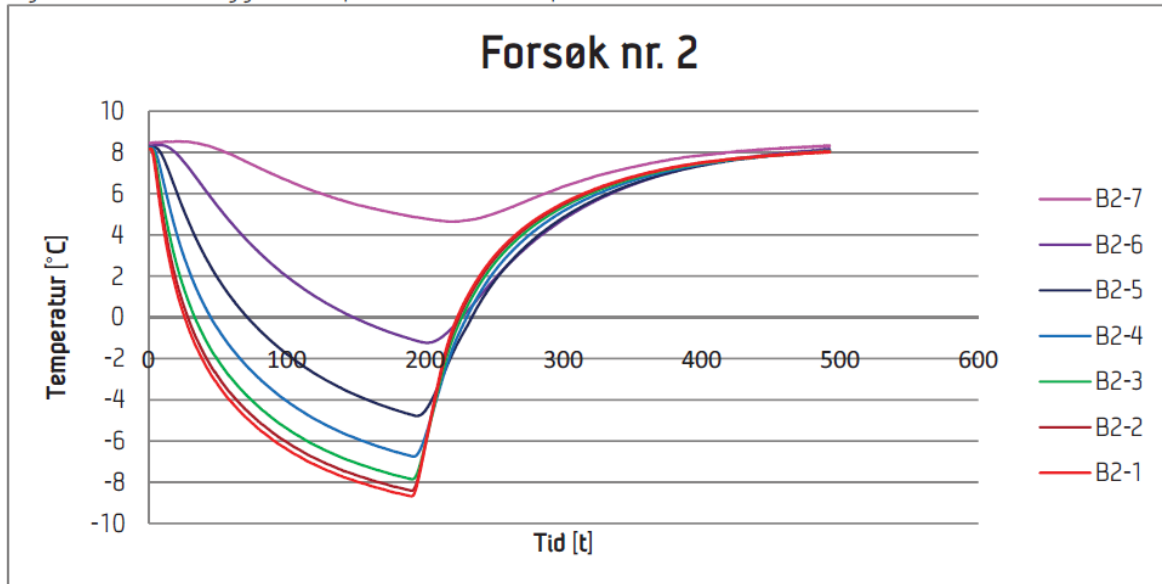


Figur 8-2 Resultater fra granittblokka i forsøk nr. 1 uten T100. Temperaturen i Tunnelrommet holdt -3,6 °C (Grøv & Vassenden, 2011).

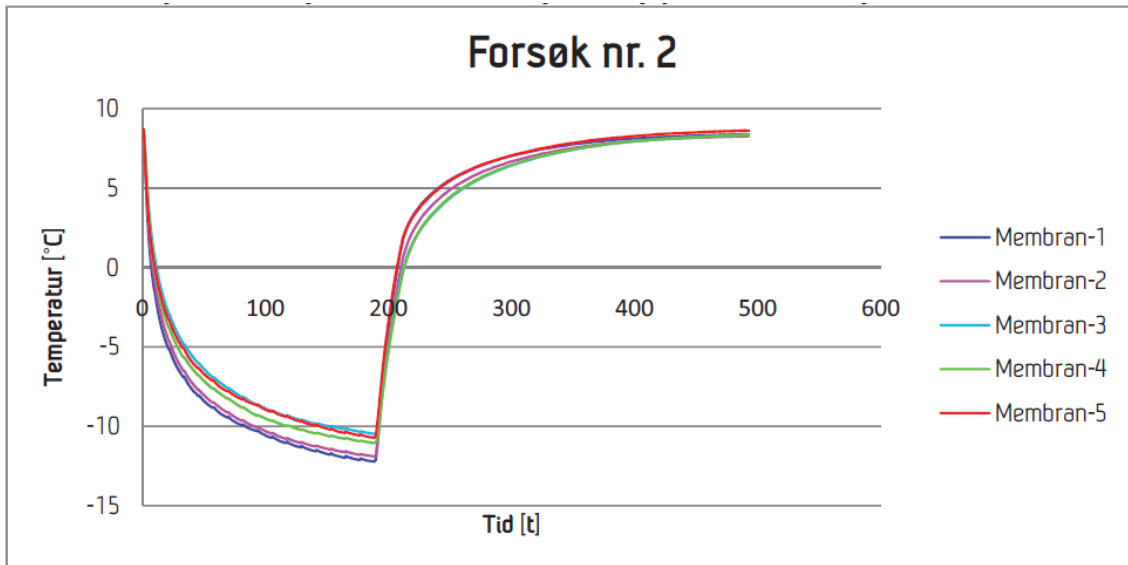


**Figur 8-3** Resultater fra sprøytebetongen i forsøk nr. 1 uten T100. Temperaturen i Tunnelrommet holdt  $-3,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Grøv & Vassenden, 2011).

Forsøk nr.2 ble gjennomført med jevn temperatur i Tunnelrommet i 190 timer. Det ser ikke ut til at temperaturen har rukket å stagnere verken i granittblokka eller sprøytebetongen. I dette forsøket vil derfor stagnasjonstemperaturen ( $T_{st}$ ) være noe lavere enn sluttemperaturen ( $T_s$ ).



**Figur 8-4** Resultater fra granittblokka i forsøk nr. 2 uten T100. Temperaturen i Tunnelrommet holdt  $-9,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Grøv & Vassenden, 2011).

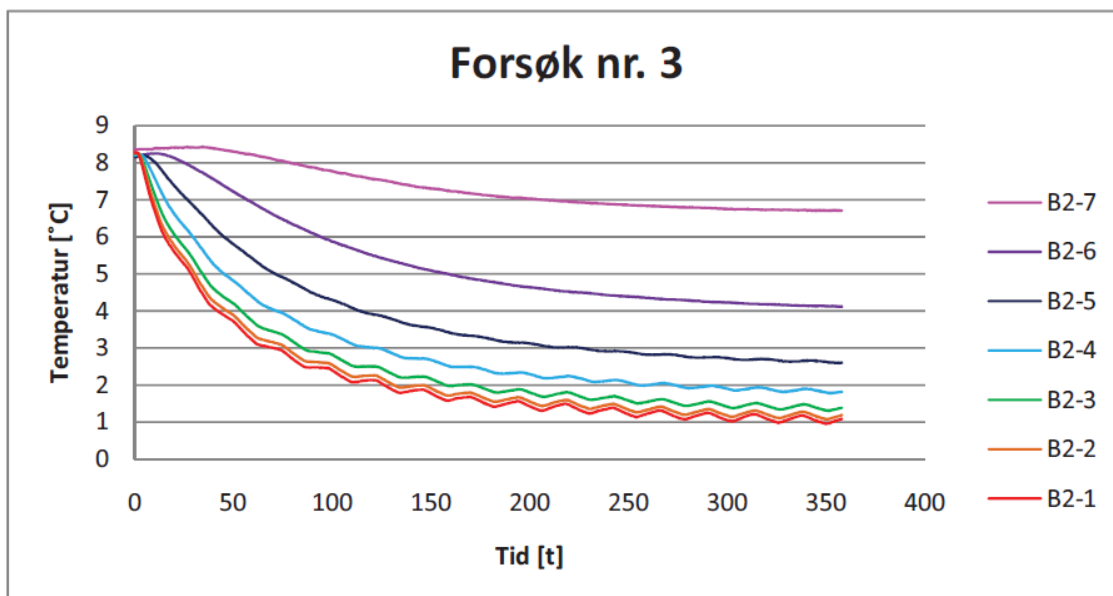


Figur 8-5 Resultater fra sprøytebetongen i forsøk nr. 2 uten T100. Temperaturen i Tunnelrommet holdt -9,5 °C (Grøv & Vassenden, 2011).

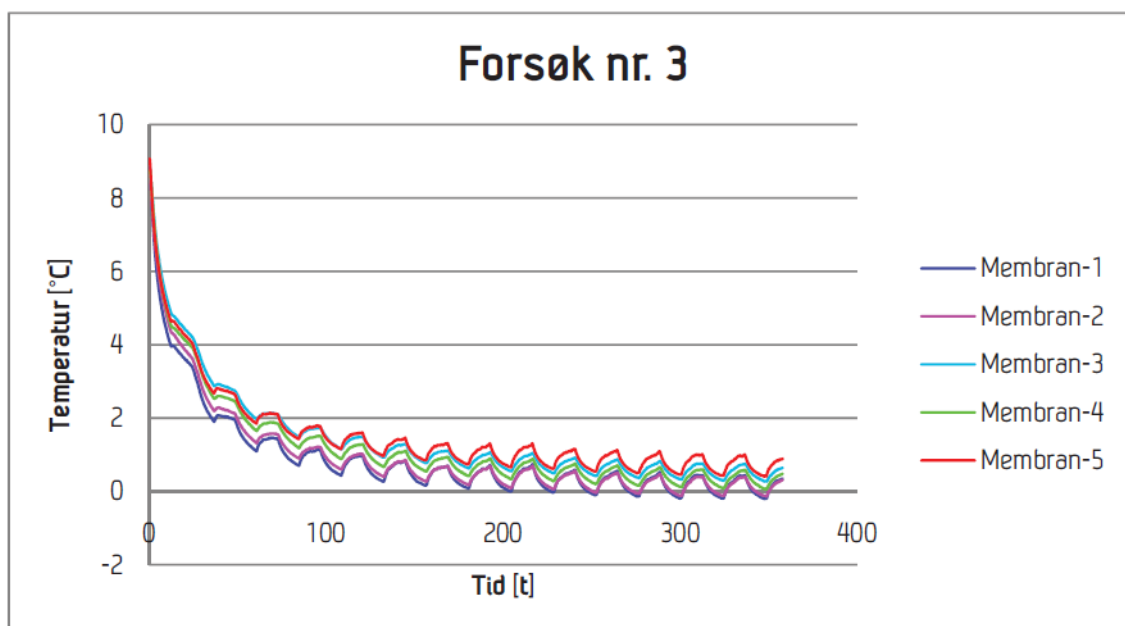
Forsøk med steglaster		
Forsøk	Maksimum temperatur [°C]	Minimum temperatur [°C]
Forsøk nr. 3	-3	-1

Tabell 8-3 Forsøk nr. 3 uten T100 med steglaster.

Forsøk nr.3 uten WG Tunnelhvelv T100 ble gjort med steglaster mellom -1 og -3 °C med skiftninger hver 12 time. Forsøket pågikk i ca 350 timer, som ser ut til å være nok for å oppnå utflåting av temperatur både i sprøytebetong (membran) og i granittblokka.



Figur 8-6 Resultater fra granittblokka i forsøk nr.3 uten T100 (Grøv & Vassenden, 2011).



Figur 8-7 Resultater fra sprøytebetongen i forsøk nr.3 uten T100 (Grøv & Vassenden, 2011).

### 8.2.1 Sammenligning av resultater med og uten WG Tunnelhvelv T100

Effekten av å installere WG Tunnelhvelv T100 i Frostlaboratoriet kan enklest mulig finnes ved å sammenligne resultater fra forsøk med og uten T100 installert. Det er valgt ut tre forsøk fra tidligere testkjøring i Frostlaboratoriet, som kan sammenlignes med forsøkene som er gjort med T100. To av forsøkene som blir benyttet er forsøk nr.1 og nr.2 som er gjort med jevn temperaturbelastning over en viss tid. Det siste forsøket som blir benyttet er et forsøk med skiftninger/steglaster over 12. timer, kapittel 8.2.

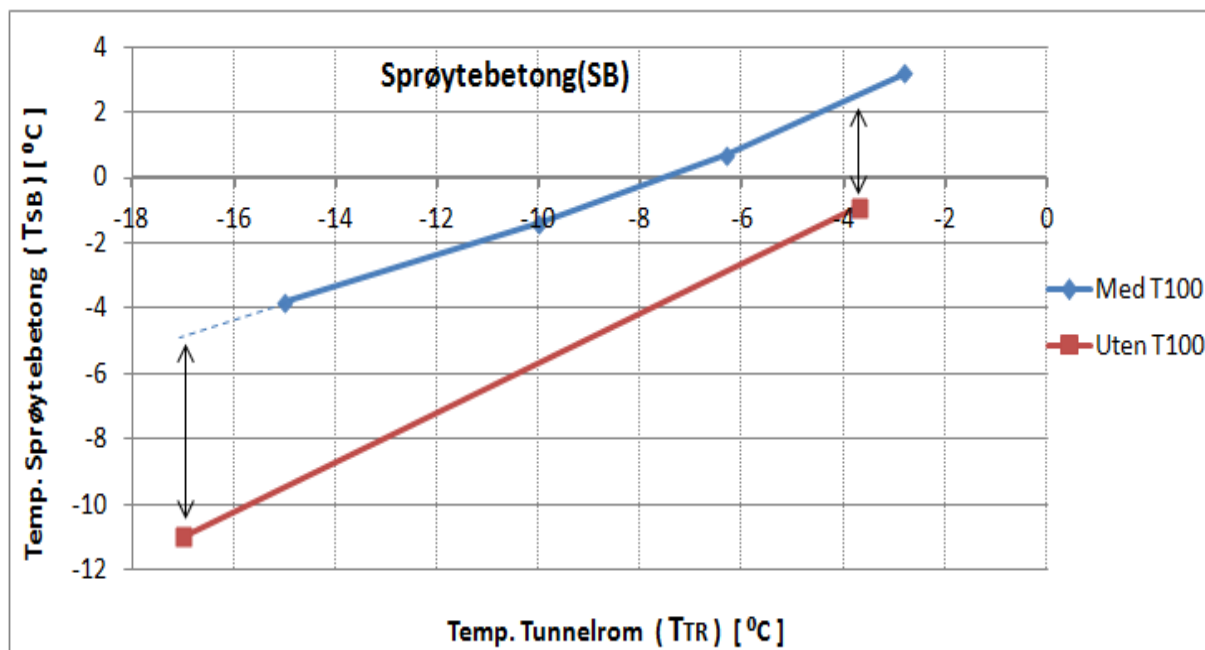
#### 8.2.1.1 Sammenligning av tester med jevn temperatur i Tunnelrommet

Det som enklest kan sammenlignes er sluttemperaturer i sprøytebetongen og granittblokka. Det kan antas at forsøk nr.1 uten T100 har oppnådd en stagnasjonstemperatur. I forsøk nr.2 er ikke stagning oppnådd, det vil derfor bli sammenlignet sluttemperaturer.

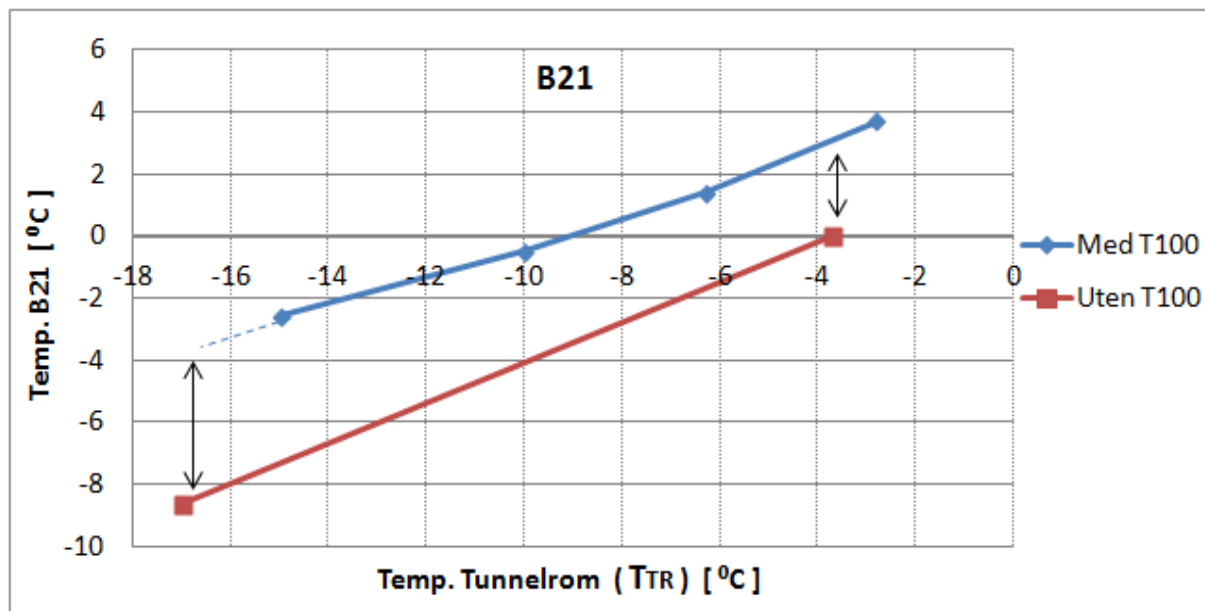
Resultatene for sluttemperaturer er illustrert grafisk i Figur 8-8 og Figur 8-9. Det er antatt lineær utvikling mellom de to registrerte sluttemperaturene i Sprøytebetongen og B21, uten T100. Det er vist tidligere at stagnasjonstemperaturene med T100 følger en tilnærmet lineær utvikling, kapittel 8.1. Grafen med T100 kan derfor projiseres slik at den trekkes ned til en temperatur  $T_{TR} = -17\text{ °C}$  (stiplet linje), så kan det leses av differansene kun i punktene med registrerte stagnasjonstemperaturer uten T100 (vist med piler).

Forskjellen mellom grafene med og uten T100 er at grafene med T100 representerer stagnasjonstemperatur, det vil si den absolutt laveste temperaturen som kan oppnås under de gitte betingelsene. Grafene for sluttemperaturer uten T100 viser sluttemperaturer, og representerer derfor ikke den laveste oppnåelige temperaturen.

Forskjellen mellom temperaturen i sprøytebetongen med og uten installert WG Tunnelhvelv T100 er mellom 3,5 °C på det laveste ( $T_{TR} = -3,6$ ) °C, og 6 °C ( $T_{TR} = -17$  °C) på det største, Figur 8-8. I følge grafene øker temperaturredifferansen med synkende temperatur i Tunnelrommet ( $T_{TR}$ ). For  $T_{TR} = -17$  °C vil temperaturredifferansen være noe større enn den som er skissert inn her, fordi temperaturen uten T100 ikke har rukket å stagnere i dette punktet.



Figur 8-8 Sammenligning mellom sluttemperaturer i sprøytebetongen for resultater med og uten T100 i Frostlaboratoriet.



Figur 8-9 Sammenligning mellom sluttemperaturer i B21 for resultater med og uten T100 i Frostlaboratoriet.



Dempningseffekten med og uten T100 i B21 er på minimum  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  for  $T_{\text{TR}} = -3,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , og  $-4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  for  $T_{\text{TR}} = -17\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Figur 8-9. Også her øker temperaturdifferansen med lavere temperatur i Tunnelrommet ( $T_{\text{TR}}$ ). Som Figur 8-4 viser så har temperaturen i granittblokka ikke flatet ut like raskt som temperaturen i sprøytebetongen (Figur 8-5). Dette kan være grunnen til at største dempning er noe lavere i B21 for  $T_{\text{TR}} = -17\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Grafene for temperaturene i B21 med og uten T100 skjærer nullpunktet for ulike temperaturer i Tunnelrommet. Uten T100 installert når B21 nullpunktet rundt  $T_{\text{TR}} = -3,6$ . Når T100 er installert flyttes skjæringspunktet  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  mot venstre, slik at  $T_{\text{TR}}$  må være  $-8,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  før B21 krysser frostgrensen.

Som nevnt tidligere så representerer temperaturdifferansene over en lavere verdi enn den som egentlig kunne ventes hvis forsøkene uten T100 hadde pågått noe lengre, slik at temperaturene hadde flatet mer ut. Tallene representerer derfor en verdi som heller underestimerer dempningseffekten, enn å overestimere den. Selv med en underestimert dempningseffekt så er den laveste temperaturforskjellen på  $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  i sprøytebetongen og  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  i granittblokka(B21).

### **8.2.1.2 Sammenligning av forsøk nr. 3 med steglaster**

Forsøk F-6 med T100 skulle etterligne forsøk nr.3. Etter endt forsøk bestod F-6 av steglaster mellom  $-0,5$  og  $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  med skiftninger hver 24. time. Temperaturene i Tunnelrommet er derfor ikke helt like, noe som må tas hensyn til i sammenligningen.

Resultatene uten T100 i forsøk nr.3 viser at temperaturen i sprøytebetongen stabiliserer seg like over  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Figur 8-7. Resultatene fra forsøk F-6 med T100 viser at temperaturene i sprøytebetongen stabiliserer seg rundt  $+3,5$  og  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dempningseffekten representerer en temperaturforskjell på  $3,5-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , men denne verdien er nok litt for høy. Det er snakk om at det er en forskjell i på temperaturen i Tunnelrommet på maksimalt  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , slik at dempningseffekten vil være i nærheten av disse verdiene. Alt i alt så peker pilen i samme retning også ved temperatursvingninger i Tunnelrommet. Resultatene kan oppsummeres til at dempningseffekten av å installere T100 er på det laveste rundt  $3-3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , og at dempningseffekten i form av temperaturdifferanse øker med lavere temperatur i tunnelen.

### 8.3 Resultater fra Frostlaboratoriet sammenlignet med resultatene fra tidligere teoretiske beregninger og simuleringer

Forsøk F-3, F-4 og F-5 var planlagt å være de forsøkene som skulle etterligne de scenariene som ble brukt i tidligere beregninger og simuleringer. Forsøk F-3 og F-4 skulle bestå av steglaster mellom henholdsvis 0 til  $-10^{\circ}\text{C}$ , og  $+10$  til  $-10^{\circ}\text{C}$ . Resultatene viser at temperaturene i Tunnelrommet ikke ble helt som planlagt, og forsøkene holdt dermed ikke de samme temperaturene som ble brukt i 2. og 3. scenario, Figur 8-10. I simuleringene ble det også benyttet sinussvingninger, og ikke steglaster slik som i Frostlaboratoriet. Simuleringene den gang ble kjørt frem til  $3000\text{ h}^{\circ}\text{C}$  ble oppnådd bak duken.

Noe som vanskeliggjør sammenligningen mellom teori og laboratoriet er de store forskjellene i beregnede frostmengder i Luftrommet i Frostlaboratoriet. I forsøk F-3 varierer frostmengdene som må til i Tunnelrommet for å få  $3000\text{ h}^{\circ}\text{C}$  bak T100 fra  $7-17\ 000\text{ h}^{\circ}\text{C}$  mellom  $75$  og  $160\text{ cm}$  høyde. I forsøk F-4 varierer frostmengden med litt over  $10\ 000\text{ h}^{\circ}\text{C}$  for LR  $75$  med over  $33\ 000\text{ h}^{\circ}\text{C}$  for LR  $160$ .

Forsøk F-5 var det forsøket som skulle etterligne 1. scenario. Resultatene viste at ved første kuldeperiode rakk det ikke å bygge seg opp  $3000\text{ h}^{\circ}\text{C}$  bak T100. Ved andre kuldeperiode i forsøk F-5 er de første 4-5 dagene med data tapt. De første dagene er da luftrommet holder den høyeste temperaturen før den flater ut. Dette gjør at det ikke er godt nok grunnlag å sammenligne resultatene på.

Forsøk F-4 skulle etterligne 2. scenario. Resultatene viser at frostmengden fra simuleringene ligger mellom den frostmengden som er målt i høyde  $75$  og  $115\text{ cm}$  i Luftrommet. Det er likevel usikkert sammenligningsgrunnlag siden temperaturene ikke er helt like.

Forsøk F-3 skulle etterligne 3. og siste scenario fra simuleringene. I forsøk F-3 ligger beregnet frostmengden i Tunnelrommet lavere enn den som er målt i laboratoriet for alle høyder. Dette er trolig på grunn av at temperaturen i Tunnelen i F-3 lå rundt  $2$  grader over minimumstemperaturen som ble brukt i simuleringene.

Scenario	Frostmengde i tunnel [ $\text{h}^{\circ}\text{C}$ ]	Frostmengde bak duk [ $\text{h}^{\circ}\text{C}$ ]	Frostmengde bak duk/ frostmengde i tunnel
1. Plutselig fall til konstant $-10^{\circ}\text{C}$ i tunnel	5440	3000	55 %
2. Temperatur i tunnel varierer mellom $-10^{\circ}\text{C}$ og $10^{\circ}\text{C}$ med sinuskurve over døgnet	11816	3000	25 %
3. Temperatur i tunnel varierer mellom $-10^{\circ}\text{C}$ og $0^{\circ}\text{C}$ med sinuskurve over døgnet	6078	3000	49 %

**Figur 8-10** Resultatene fra simuleringer og beregninger av WG Tunnelhvelv T100, (Wachenfelt et. al., 2007).

Oppsummeringen som ble gjort ut fra simuleringene og beregningene sa at T100 dempet fjellveggen mot temperatursvingninger og også mot frost (Wachenfelt et.al., 2007). Det ble også konkludert med at frostdempningen var avhengig av temperaturforløpet i tunnelen.

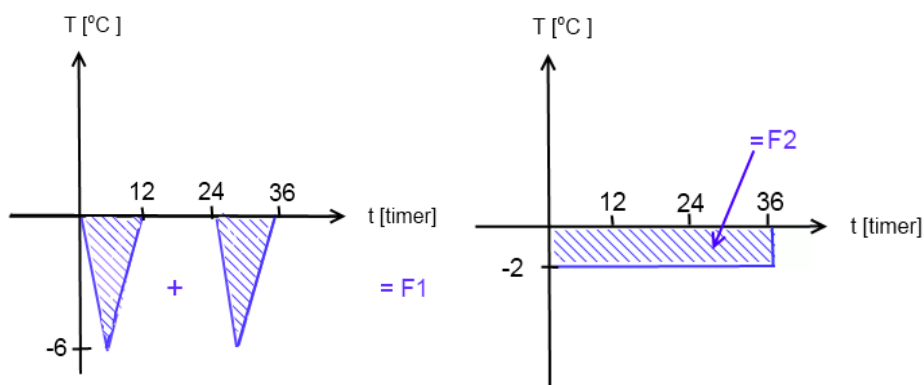
Den frostdempende virkningen økte ved temperatursvingninger og var lavere ved jevne og stabile temperaturer, slik som resultatene viser, Figur 8-10. Disse konklusjonene er også erfaringer som gjøres i resultatene fra Frostlaboratoriet, se kapittel 8.1.

## 8.4 Frostmengdebegrepet i Frostlaboratoriet

I Frostlaboratoriet finnes det ingen sammenheng mellom frostmengdene som er beregnet i hvert forsøk. I forsøk som er gjort med jevn temperatur spriker frostmengdeforholdet ( $F_{LR}/F_{TR}$ ) på mellom 0-55 %. I forsøk som er gjort med svingninger er frostmengdeforholdet mellom Tunnelrom og Luftrom ( $F_{LR}/F_{TR}$ ) på 0-38 %.

I forsøk F-2 og F-6 med jevn temperatur i Tunnelrommet på henholdsvis  $-2,7$  og  $-6,3$  °C, ble det ikke registrert negative temperaturer bak T100. Tiden kunne derfor løpt til evig tid uten at det ville blitt registrert frostmengder i luftrommet bak T100. I tilfeller hvor temperaturen svinger ned til maksimalt  $-2,5$  °C ikke måles det ikke negative temperaturer, eller frostmengder bak T100. Det er derfor ikke et poeng å sette én fast grense på antallet frosttimer, siden det er avhengig av temperaturen i Tunnelrommet. Per dags dato er kravet til frostmengder for WG Tunnelhvelv T100  $3000 \text{ h}^\circ\text{C}$ . I Frostlaboratoriet tåler konstruksjonen mye mer.

En tydelig ulempe med begrepet frostmengde er at et gitt antall frosttimer kan representere helt ulike temperaturforhold. Eksempel på dette er vist i Figur 7-11. Grafene illustrerer helt ulike temperaturforløp, som likevel gir samme verdi for frostmengde. Ulike temperaturforløp kan by på helt ulike problemer med hensyn til frost.



$$F1 = (6 \text{ }^\circ\text{C} \cdot 12\text{h})/2 + (6 \text{ }^\circ\text{C} \cdot 12\text{h})/2 = \underline{72 \text{ h}^\circ\text{C}}$$

$$F2 = -2 \text{ }^\circ\text{C} \cdot 36 \text{ h} = \underline{72 \text{ h}^\circ\text{C}}$$

Figur 8-11 Eksempel på frostmengdeutregninger som gir likt resultat.

## 9 Feltnålinger i Melkøysundtunnelen

Som et supplement til laboratoriemålinger og teoretiske beregninger ble det gjort feltnålinger i en tunnel der WG Tunnelhvelv allerede er installert. Feltnålinger kan avsløre om det er en overensstemmelse mellom laboratoriemålinger og feltnålinger, og også hvor godt forsøkene i laboratoriet gjenspeiler virkeligheten. Er det stor forskjell, er det i så fall viktig å finne ut hvorfor. Ulempen med feltnålinger er at dataene kun representativt for ett område. Derfor er det viktig å gjøre flere målinger i felt for å unngå å gjøre antagelser basert på lokale fenomen. Bakdelen med feltnålinger er at forholdene (temperaturer, temperatursvingninger og lufthastigheter) er underlagt naturens gang, og det er ikke sikkert en vinter med målinger er nok til å gi svar på spørsmålene som stilles.



Figur 9-1 Bilder fra Melkøysundtunnelen, med helhvelv ((Giertsen Tunnel AS, 2012).

### 9.1 Feltlokasjon – Melkøysundtunnelen

Melkøysundtunnelen er en privateid undersjøisk tunnel som gir veiforbindelse mellom Kvaløya og Melkøya, like utenfor Hammerfest. Tunnelen er 2,3 km lang og når ned til et dyp på 62 meter under havet. Den ble ferdigstilt i 2003 med 40 000 m<sup>2</sup> helhvelv (Lindstrøm, 2005). Kriteriet til det området der feltnålingene skulle gjennomføres var at området måtte være utsatt for relativt høye frostmengder. Melkøysundtunnelen ble ansett som en egnet lokasjon, da Hammerfest har en dimensjonerende frostmengde på  $F_{10} = 21\,000\text{ h}^{\circ}\text{C}$ .

## 9.2 Måleutstyr

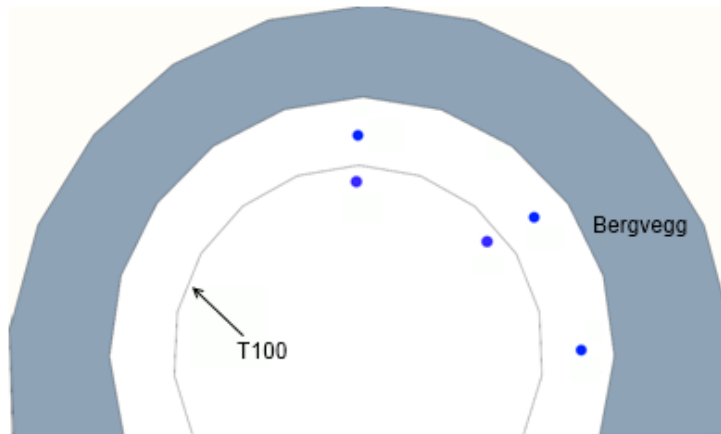


Figur 9-2 TinyTag View 2 TV-4050 (Gemini Data Loggers, 2011)

Målingene ble gjort med temperaturloggere av typen TinyTag View 2 TV-4050, produsert av Gemini Data Loggers. Dette er en robust temperaturlogger med innebygd temperatursensor med en målernøyaktighet på 0,5 °C. Loggeren er batteridrevet og lagrer data frem til minnet er fullt eller batteriet lades ut. For mer informasjon om produktet vises det til leverandørens egen produktbeskrivelse, (Gemini Data Loggers, 2011).

## 9.3 Utførelse

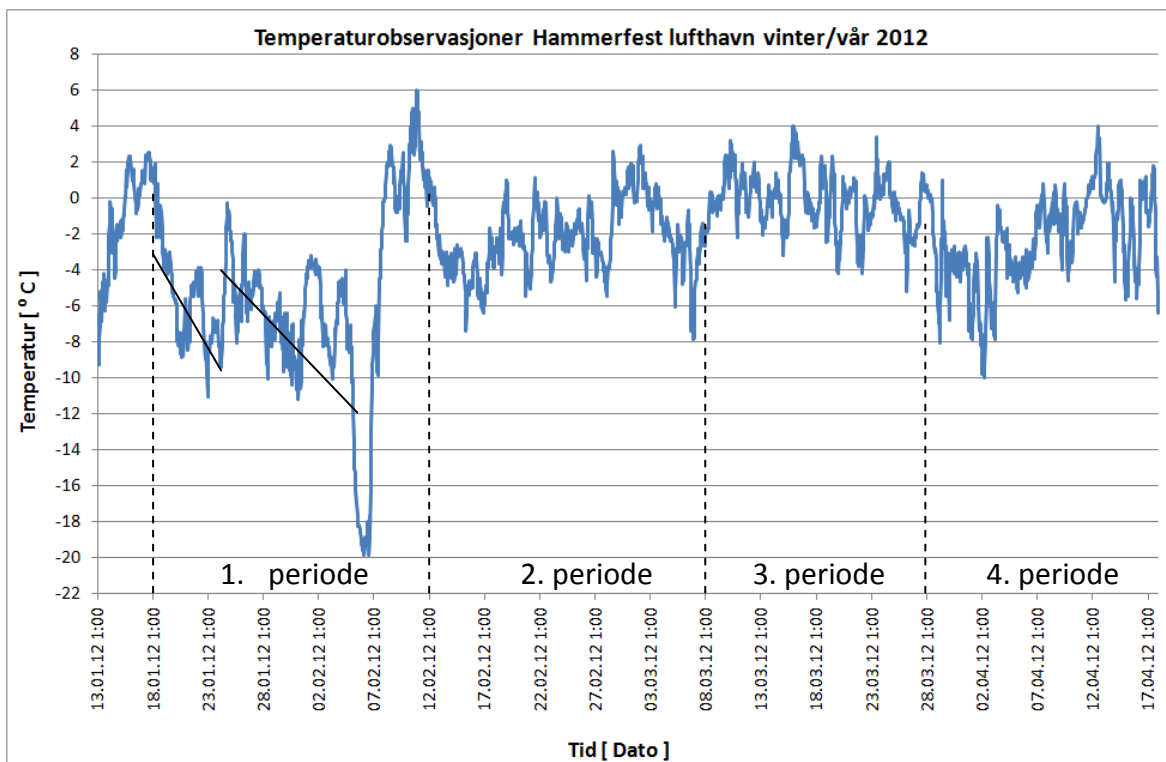
Loggerne ble montert i Melkøysundtunnelen den 12.01.12, og tatt ned den 18.04.12. Totalt 15 temperaturloggere av typen TinyTag View 2 TV-4050 ble montert opp. Det ble gjort målinger ved tre lokaliteter i tunnelen; 100 meter, 300 meter og 600 meter inn fra tunnelmunningen. Ved hvert målested/lokalitet ble loggerne montert opp etter profilanvisning i Figur 9-3. Hvert profil bestod av fem loggere, der tre loggere ble montert mellom duken og bergveggen, og to loggere foran duken i Tunnelen, Figur 9-3. Nøyaktig plassering av alle loggerne blir illustrert for hvert målested.



Figur 9-3 Profiltegning av loggerplasseringen Melkøysundtunnelen.

## 9.4 Resultater

I dette underkapittelet presenteres resultatene for alle fem loggerne på hvert målested i et diagram. For å dokumentere temperatuere og frostmengden i området utenfor tunnelen er det brukt klimadata fra Meteorologisk institutt. Måledataene er hentet fra en målestasjon på Hammerfest lufthavn, (Meteorologisk institutt, 2012).



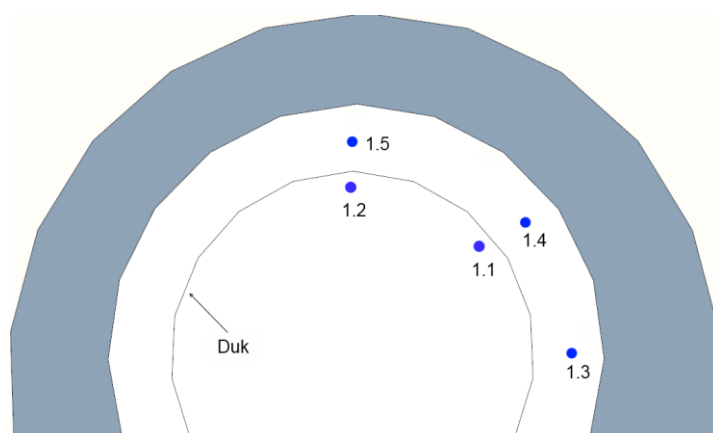
Figur 9-4 Resultatene fra Hammerfest lufthavn, med periodeinndeling (Meteorologisk institutt, 2012).

Målestasjon	Tidsperiode	Frostmengde, F [h°C ]
Hammerfest Lufthavn	13.1.12 tom 17.4.12	6732,7 ~ 6733

Tabell 9-1 Frostmengde Hammerfest.

### 9.4.1 1. Målested

Første målested ligger cirka 100 meter inn fra tunnelmunningen. Skisse over loggernavn og plasseringer er vist i Figur 9-5. Målerne 1.1 og 1.2 ligger cirka 10 cm utenfor duken. Logger 1.4 og 1.5 er plassert omtrent midt mellom duk og fjellvegg. Den totale avstanden mellom duk og fjellvegg er 85-90 cm i dette området. Logger 1.3 ligger nærmest bergveggen, og har en avstand på 120 cm mellom duk og bergvegg. Nøyaktig beskrivelse av plassering av loggerne bak duken finnes i Tabell 9-2.



Figur 9-5 Loggernavn og loggerplassering 1. Målested

Loggerplasseringer mellom duk og bergvegg		
Loggernummer	Avstand til duk [m]	Avstand til berg [m]
1.3	0,9	0,3
1.4	0,5	0,4
1.5	0,4	0,45

Tabell 9-2 Loggerplassering

#### 9.4.1.1 Resultater 1. Målested

Resultatene viser at temperaturene som måles av sensorene 10 cm utenfor duken (sensor: 1.1 og 1.2) er så å si helt identiske, se

Figur 9-6. Det er valgt å bruke lysere farger på sensorene innefor duken, slik at det er lettere å skille sensorene fra hverandre. Temperaturmålingene fra sensorene bak duken viser at temperaturen bak duken varierer med høyden. Frem til mars måned måles det en høyere temperatur under hengen enn i vegg og gulv, fordi sensor 1.5 som er plassert øverst måler den høyeste temperaturen. Fra mars ser det ut til at 1.5 måler den laveste temperaturen bak duken.

Generelt viser grafen at temperaturene bak duken gjenspeiler temperaturforløpet utenfor duken, bare at den holder jevnt over en høyere temperatur. Temperaturen bak duken er "dempet" i forhold til alle utslagene og svingningene som måles utenfor duken.

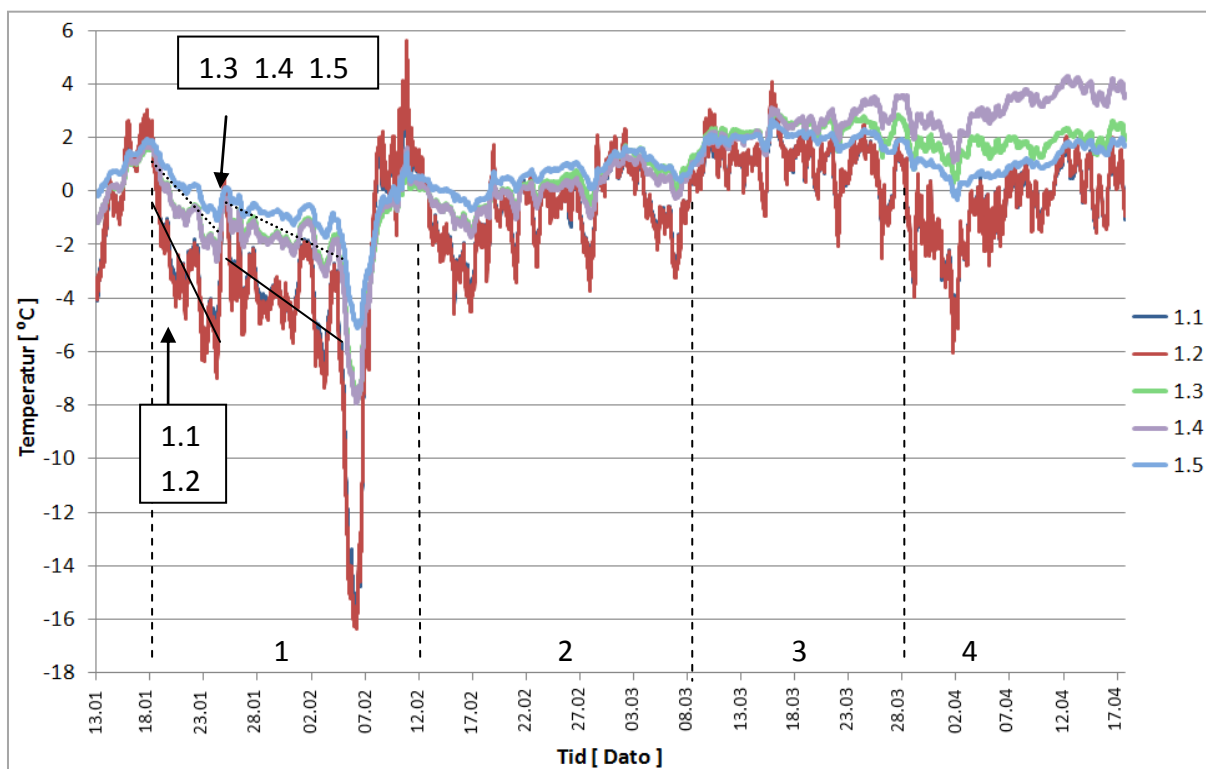
Den 1. perioden strekker seg fra 18.01 til cirka 12.02. Temperaturen utenfor duken (1.1 og 1.2) synker gradvis med en gjennomsnittstemperatur på -2,5 til -5 °C, fra 18.02 til cirka 03.02. Deretter måles en kuldetopp ned til -16 °C rundt 06.02. Temperaturen bak duken i perioden 18.02 til 03.02 synker med en gjennomsnittstemperatur fra 0 til -2 °C. Ved kuldetoppens maksimum rundt den 06.02 måles den laveste temperaturen i veggen (1.3 og 1.4) på -8 °C, mens under hengen (1.5) er den laveste temperaturen som oppnås -5 °C.

Den 2. perioden varer fra 12.02 til ca 09.03 varierer temperaturen utenfor duken mellom -4,5 og +2 °C. Temperaturen bak duken stiger gradvis til over 0 °C gjennom perioden. Når temperaturen utenfor duken er lavere enn -2 °C, så følger temperaturen bak duken etter og synker under null hver gang dette skjer. I denne perioden er det en variasjon med temperatur i høyden, men den er ikke like synlig som i 1. kuldeperiode.

Den 3. perioden ligger gjennomsnittstemperaturen utenfor duken like over 0 °C. Den er to kuldetopper utenfor duken i perioden; den første er ned til -1 °C og den andre er ned til -2 °C. Bak duken måles det ikke temperaturer under +1 °C gjennom hele perioden.

I den 4. perioden varierer temperaturen utenfor duken mellom +2 og -6 °C. Den 4. kuldeperioden har en lavere gjennomsnittstemperatur utenfor duken enn både den 2. og den 3. perioden. Bak duken skjer det noe uventet i denne perioden; den laveste temperaturen måles nå under hengen i 1.5. I tillegg økes temperaturforskjellene mellom sensorene bak duken. Sensor 1.5 er den eneste som registrerer temperatur under frysepunktet, og dette skjer en gang. Temperaturen til 1.5 registrerer et fall så vidt under 0 °C under en kuldetopp utenfor duken ned til -6 °C, rundt den 02.04. Temperaturen utenfor duken har flere kuldetopper mellom -1 og -4 °C, men det måles ikke negative temperaturer bak duken som følge av dette.





Figur 9-6: 1. Målested. Resultater fra feltmålinger i Melkøysundtunnelen 13.1.2012 – 17.4.2012.

Frostmengde perioden 13.01.12 til og med 17.4.12		
Logger	Frostmengde, F [ h°C ]	Dempning $F_{\text{Logger}} / F_{\text{Tunnel}}$ [%]
1.1	3338	
1.2	3472	
$F_{\text{Tunnel}}$ (Snitt 1.1 & 1.2)	3405	
1.3	1171	34
1.4	1234	36
1.5	575	17

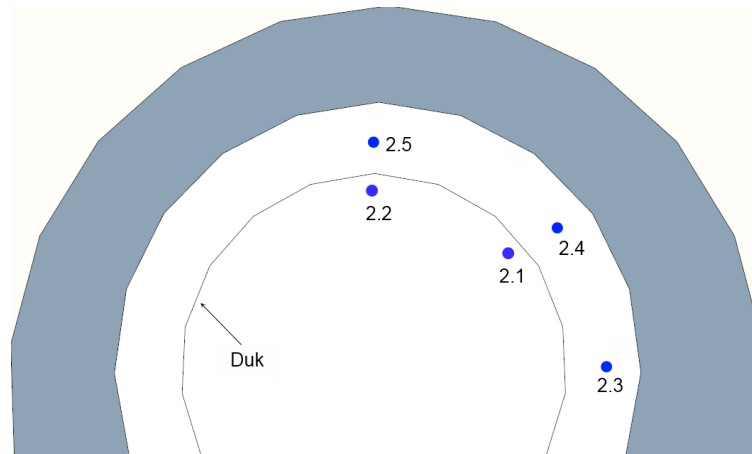
Tabell 9-3 Frostmengder 1. Målested

Resultatene fra frostmengdeberegningene viser at frostmengden i tunnelen er omtrent halvert i forhold til temperaturen som måles i tunnelen utenfor T100. Registrert frostmengde bak T100 er redusert til mellom 17 og 36 % av den påførte frostmengden fra tunnelen, Tabell 9-3. I hengen reduseres frostmengden bak duken til 17 % av frostmengden i tunnelen, mens i veggen ligger frostmengden på 34-36 %.

I periode 3 og 4, som er tegnet inn i diagrammet er det ikke frostdannelse bak T100, bortsett fra ett unntak der sensoren i hengen går ned til 0 °C en kort periode når temperaturen i tunnelen er -6 °C, før den svinger opp igjen. Generelt sett så vil det i denne perioden samles opp mange frosttimer i tunnelen, uten at det registreres frosttimer bak T100.

## 9.4.2 2. Målested

2. Målested i tunnelen lå cirka 300 meter inn fra tunnelmunningen mot Hammerfest. Sensorene som er plassert 10 cm utenfor duken er 2.1 og 2.2. Sensor 2.1 er plassert i øverste delen av veggen, mens 2.2 er plassert like under hengen. Nærmere beskrivelse av loggerplassering mellom berg og T100 finnes i Tabell 9-4.



Figur 9-7 Loggernavn og loggerplassering 2. Målested

Loggerplasseringer mellom duk og bergvegg		
Loggernummer	Avstand til duk [m]	Avstand til berg [m]
2.3	0,90	0,20
2.4	0,35	0,40
2.5	0,30	0,40

Tabell 9-4 Loggerplassering 2. Målested.

### 9.4.2.1 Resultat 2. Målested

Som erfart fra 1. Målested så er det temperaturforløpet målt i loggerne utenfor duken identiske, og temperaturene bak duken avhenger av høyden over grunnen, Figur 9-8. Frem til slutten av februar måles det høyere temperaturer i hengen(2.5) enn i veggen (2.3 og 2.4). Deretter registreres den høyeste temperaturen i loggeren som er plassert lavest i veggen (2.3) frem til slutten av mars, da temperaturen under hengen(2.5) igjen viser høyest temperatur.

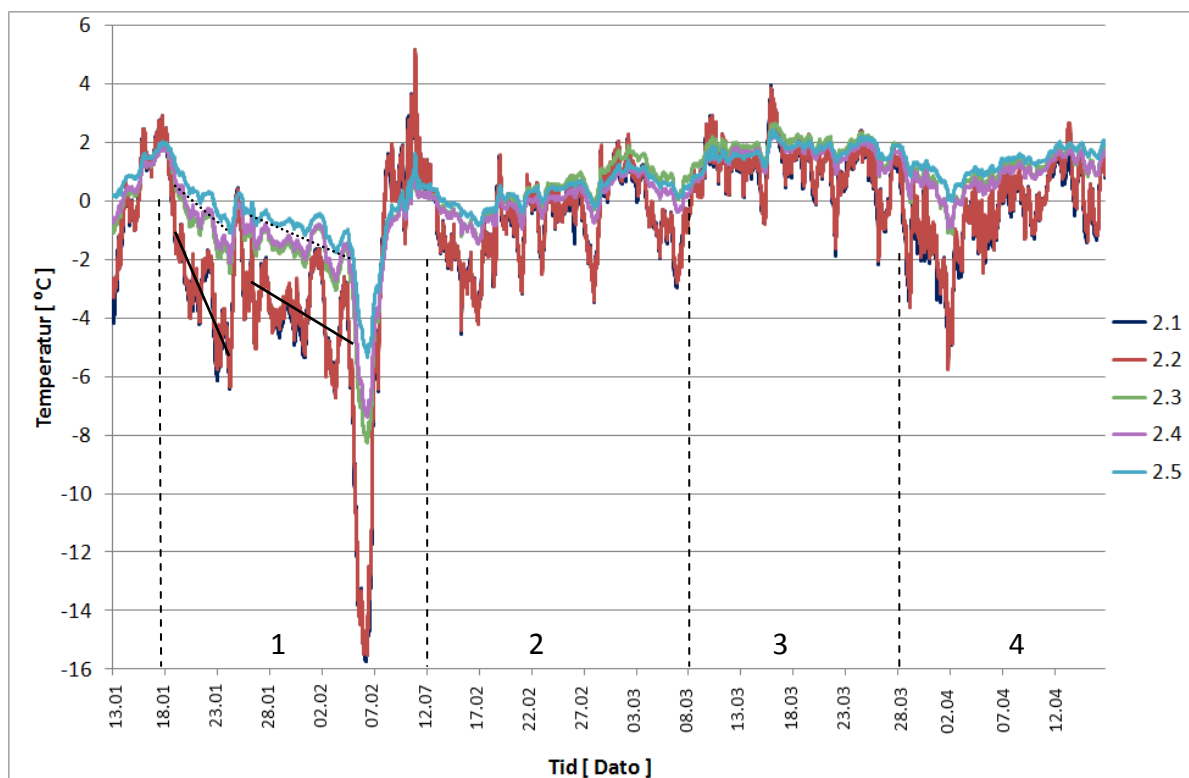
Temperaturen i tunnelrommet (foran duken) holder en lavere temperatur enn luftrommet bak duken. Temperaturen bak duken "dempes" for de store svingningene som måles i tunnellufta.

Resultatene deles inn i flere perioder. Den 1. perioden ligner forløpet som ble målt i 1. Målested (100 meter inn fra tunnelmunningen). Temperaturen utenfor duken synker i snitt fra 0 til -5 °C, i perioden 18.01 til 24.01. Deretter stiger temperaturen noe, før den igjen synker i snitt fra -2,5 til -5 °C, fra 25.01 til 03.02. Rundt den 06.02 måles en kuldetopp ned til -15,5 °C.

I 1. periode følger temperaturen bak duken hovedtrendene til temperaturene utenfor duken. I tidsrommet fra 18.02 til 24.01 måles snitt temperaturen fra +1 til -1 °C. I tidsrommet fra 25.01 til 03.02 faller temperaturen fra ca -1 til -2 °C. Ved kuldetoppen rundt den 06.02 måles temperaturen i luftrommet nederst i veggen (2.3) til -8 °C, mens lufta i øvre del av veggen (2.4) holder -7 °C og i hengen (2.5) -5 °C.

I 2. periode stiger temperaturene i snitt både utenfor og innenfor duken. Temperaturen bak duken stiger til over frysepunktet rundt den 22.02, og holder seg over 0 °C resten av perioden bortsett fra at 2.4 har et utslag så vidt under 0 °C rundt den 07.03.

I 3. periode svinger temperaturen i tunnellufta stort sett mellom +2 og -2 °C. Temperaturen bak duken svinger med samme frekvens men med mindre utslag. Temperaturen bak duken ligger stort sett mellom +1 og +2 °C. Den 01.04 går temperaturen i veggen (2.3 og 2.4) under frysepunktet når tunnellufta har et utslag ned til nesten -6 °C. Ellers har tunnellufta flere mindre utslag ned til omtrent -2 °C, uten at temperaturen i lufta bak duken går under frysepunktet.



Figur 9-8 Resultat 2. Målested

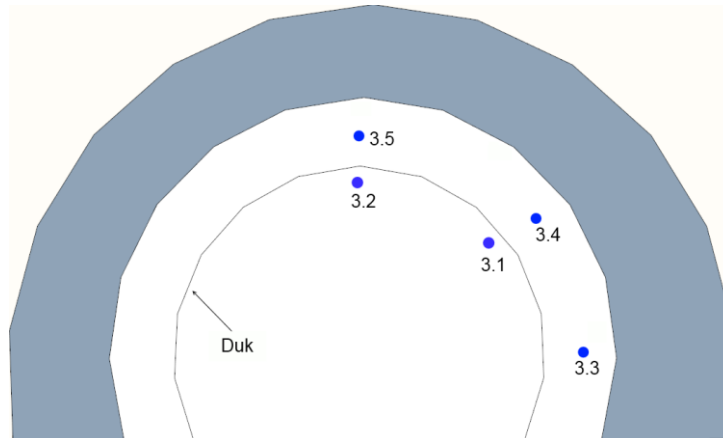
Frostmengde perioden 13.01.12 til og med 16.4.12		
Logger	Frostmengde, F [ h°C ]	Dempning $F_{\text{Logger}} / F_{\text{Tunnel}}$ [%]
2.1	3198	
2.2	3084	
$F_{\text{Tunnel}}$ (Snitt 2.1 & 2.2)	3141	
2.3	1106	35
2.4	1034	33
2.5	570	18

Tabell 9-5 Frostmengder 2. Målested

Resultatene fra frostmengdeberegningene viser at frostmengden målt i veggen bak T100 er dempet til 33-35 % av frostmengden i tunnelen, mens frostmengden registrert i hengen er 18 % av frostmengden i tunnelen, Tabell 9-5.

### 9.4.3 3. Målested

Det siste målestedet i tunnelen ligger cirka 600 meter inn fra tunnelmunningen. Også her er loggerne montert 10 cm utenfor duken i tunnelen. Plasseringene til loggerne mellom duken og bergveggen er montert i litt ulike avstander, nærmere beskrivelse finnes i Tabell 9-6.



Figur 9-9 Loggernavn og loggerplassering 3. Målested

Loggerplasseringer mellom duk og bergvegg		
Loggernummer	Avstand til duk [m]	Avstand til berg [m]
3.3	0,80	0,20
3.4	0,50	0,30
3.5	0,30	0,20

Tabell 9-6 Loggerplassering 3. Målested

#### 9.4.3.1 Resultater 3. Målested

I resultatene er det kun presentert data fra 3. Målested frem til den 27.03. Dette er fordi temperaturene til sensorene bak duken etter hvert stiger til + 55 °C etter den 27.03. Det er ikke noe bevis for hvorfor dette skjer, men det må ha en sammenheng med et eller annet bak duken i dette området.

I motsetning til tidligere så er temperaturen bak duken avhengig av høyden gjennom hele forsøket. Med det menes at temperaturen i nedre del av vegg (3.3) ligger lavest gjennom hele testen. På det meste er temperaturforskjellen mellom nedre vegg (3.3) og øvre vegg/heng (3.4 og 3.5) på over 2 °C.

I 1. periode skjer det samme som tidligere, at det skjer en nedkjøling i tidsrommet 18.01 til 24.01. I dette tilfellet synker temperaturen utenfor duken fra 2 til -5 °C. I samme tidsrom bak duken går temperaturen i nedre del av vegg (3.3) fra 2 til -1,5 °C, mens i øvre del av vegg og heng (3.4 og 3.5) synker temperaturen fra 2 til -0,5 °C.

I tidsrommet fra 24.01 til 03.02 i 1. periode synker temperaturen fra 0 til -5,5 °C utenfor duken. Bak duken går temperaturen fra cirka 0 til maksimum -2 °C i nedre vegg (3.3), mens i heng/øvre vegg går temperaturen fra 0,5 til -0,7 °C.

Kuldetoppen i 1. periode inntreffer nøyaktig samtidig som tidligere, 06.02. I tunnellufta når temperaturen ned til -14 °C. Bak duken oppnås det en temperatur på litt under -6 °C i nedre vegg, og i øvre vegg/heng oppnås -4 °C.

2. periode svinger temperaturen i tunnellufta mellom +1 og -2,5 °C. Temperaturen bak duken stabiliserer seg over frostgrensen. I nedre vegg faller temperaturen like under 0 °C ved et par anledninger, mens øvre vegg/heng ikke faller under 0 °C i løpet av perioden.

I 3. periode svinger tunnellufta mellom -2 °C på det laveste og 4 °C på det høyeste. Lufta bak duken går ikke temperaturen under frysepunktet under noen omstendighet.



Figur 9-10 Resultater 3. Målested

Frostmengde perioden 13.01.12 til og med 28.3.12		
Logger	Frostmengde, F [ h°C ]	Dempning $F_{\text{Logger}} / F_{\text{Tunnel}}$ [%]
3.1	2084	
3.2	2023	
$F_{\text{Tunnel}}$ (Snitt av 3.1 & 3.2)	2054	
3.3	636	31
3.4	281	14
3.5	255	12

Tabell 9-7 Frostmengder 3. Målested

Resultatene fra frostmengdeberegningene viser at frostmengdene ved 3. målested varierer mellom 12 – 31 % av den frostmengden som opptrer i tunnelen. I nedre vegg registreres en frostmengde på 31 % av den i tunnelen, mens i øvre del av vegg og heng måles det henholdsvis 14 og 12 % av frostmengden i tunnelen, Tabell 9-7.

## 9.5 Sammenstilling av resultatene fra feltmålingene

Resultatene viser at temperaturforløpet ved samtlige målesteder i tunnelen følger temperaturtrendene som er målt ved Hammerfest lufthavn, Figur 9-4. For å illustrere likheten er tegnet inn med trendlinjer i 1. periode i alle grafene (Figur 9-4, Figur 9-6, Figur 9-8 og Figur 9-10). Hovedtrendene er helt like, men minimumstemperaturen dempes med avstanden inn fra tunnelmunningen.

Ved hvert målested i tunnelen er temperaturene registrert på utsiden av WG Tunnelhvelv T100 identiske. Det tyder på god sirkulasjon, slik at det ikke oppstår temperaturforskjeller med høyden i tunnelprofilen.

### 9.5.1 Frostbeskyttende egenskaper ved WG Tunnelhvelv T100

Temperaturene bak T100 på samme målepunkt, varierer med høyden over sålen. Gjennomsnittlig så er temperaturen høyere i hengen enn i øvre og nedre vegg. Dette kommer tydelig frem i frostmengdeutregningene ved hvert målested, hvor frostmengden i hengen er lavere enn 50 % av frostmengden i veggen. Dette er en indikasjon på at luftrommet ikke påvirkes av sirkulasjoner som skjer i tunnelen, som betyr at T100 opptrer som lufttett. Helt generelt så viser resultatene to gjennomgående frostbeskyttende egenskaper ved WG Tunnelhvelv T100;

1. Lufta bak T100 holder en åpenbart høyere temperatur enn tunnelufta i alle tilfeller der  $T_{\text{Tunnel}} > 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Sensorene i luftrommet bak T100 måler en høyere temperatur enn sensorene i tunnelen. Hvor stor forskjell det er mellom temperaturene på innsiden og utsiden av T100 varierer avhengig av hvilken temperatur lufta i tunnelen holder. På det meste er temperaturforskjellen  $8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , Figur 9-6.

2. Temperaturen bak T100 "dempes" for de store temperatursvingningene i tunnelen.

Denne egenskapen er avhengig av den første. Når temperaturen i tunnelen svinger raskt oppover eller nedover, så er amplitudeutslaget som måles i luftrommet bak T100 mindre.

### 9.5.2 Temperaturforløpet og dens relevans til frostmengden

Temperaturen i Tunnelrommet fluktuierer gjennom hele måleperioden. Resultatene viser at temperaturen i luftrommet bak T100 er direkte avhengig av temperaturen i Tunnelrommet fordi den følger den samme utviklingen hver gang temperaturen i Tunnelrommet faller ned til det samme temperaturnivået. Dette kommer tydelig frem i andre og tredje periode for resultatene ved 3. målested, Figur 9-10. Dette viser at temperaturforløpet bak T100 ikke er

avhengig av hvor mange sykluser som påføres, men hvilke temperaturer som påføres fra tunnelen. Dermed er tidsparameteren uvesentlig for å beskrive hvilke temperaturer som opptrer bak T100.

## 10 Konklusjon

Resultatene fra tester med WG Tunnelhvelv T100 i laboratoriet og i felt viser at konseptet har en dempende og en forsinkende effekt. Den dempende effekten er åpenbar ved at temperaturen i luftrommet bak T100 holder en høyere temperatur enn temperaturen i tunnelen når  $T_{\text{tunnel}} < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Hvor stor dempningen er avhenger av temperatur og temperaturforløp. Med forsinkende effekt menes at temperaturen i luftrommet bruker lengre tid, vanligvis flere dager, før den stabiliserer seg mot et minimumsnivå. Dette minimumsnivået er kalt stagnasjonstemperaturen ( $T_{\text{st}}$ ) i denne oppgaven. Forsinkelseeffekten gjør derfor at frostdempningen er større de første dagene med negative temperaturer i tunnelen.

Den frostdempende effekten til T100 er avhengig av temperaturforløpet i tunnelen. Den største dempningen oppnås ved variasjoner i temperaturen. Dette er helt i tråd med de erfaringene som ble gjort under de teoretiske beregningene og simuleringene av WG Tunnelhvelv T100 i 2006. Ved installasjon av T100 i tunnel viser teori, felt og laboratoriemålinger at bergoverflaten vil utsettes for mindre frost og høyere temperaturer enn den som er i tunnelen. Konseptet viser seg derfor å ha en isolerende evne.

Resultatene i Frostlaboratoriet viser at ved gitte temperaturer i tunnelrommet finnes det gitte minimumstemperaturer/stagnasjonstemperaturer i alle elementer fra tunnelen og inn til det punktet i bergmassen som holder en konstant temperatur. Tiden det tar før stagnasjonstemperatur oppnås er vist til å ta flere dager i Frostlaboratoriet. Stagnasjonstemperaturen representerer derfor "worst case".

Ut fra resultatene er det ikke funnet en fornuftig sammenheng mellom frosttimer og temperaturforløpene i de ulike forsøkene. I to av forsøkene (F-2 og F-6) er det vist at en uendelig frostmengde kan påføres systemet fra tunnelen uten at det vil oppnås frostutvikling bak T100. Det er også vist at en gitt frostmengde kan representere flere ulike temperaturforløp, som igjen kan forårsake helt forskjellige frostpåkjenninger.

Systemet som her er ment som luftrom, sprøytebetong og berg, ser ikke ut til å være påvirket av hvor mange eller hvilke frostsykluser det har vært utsatt for tidligere. Temperaturforløpet i systemet ved en gitt temperatur i tunnelen gjentas på identisk vis hver gang. Dette ble observert både i laboratoriet og i felt. Det ser derfor ut til at det er enkelt hendelsen som har betydning for temperaturforløpet. Den temperaturen som påføres systemet er styrende for hvilken temperatur som kan ventes. Tidsparameteren har en



betydning frem til stagnasjon er oppnådd, deretter er den uvesentlig. De samme erfaringene ble gjort ut fra forsøkene i Frostlaboratoriet uten WG Tunnelhvelv T100.

## Referanser

- Brattli, B. (2009). *Fysisk og kjemisk hydrogeologi. Tredje utgave*. Trondheim: NTNU.
- Farstad, A. (2011). *Planlegging og testing av vann og frostsikringsløsning WG Tunnelhvelv T100. Prosjektoppgave NTNU*.
- Gaut, S. (2011). *Beskyttelse av grunnvannsanlegg – en veileder*. Norges geologiske undersøkelse, 45 s. ISBN 978-82-7385-145-1.
- Gemini Data Loggers. (2011). *Datablad TinyTag View 2 TV-4050, 4. utgave*. Hentet April 12, 2012 fra [http://www.geminiataloggers.com/file/loggers\\_variant/datasheet/tv-4050.pdf](http://www.geminiataloggers.com/file/loggers_variant/datasheet/tv-4050.pdf)
- Giertsen Tunnel AS. (2012). *Giertsen Tunnel AS: Referanser Tunnelhvelv*. Hentet Mars 16, 2012 fra <http://tunnelsealing.com/Referanser/Tunnelhvelv-bilder.aspx>
- Grøv, E., & Vassenden, S. (2011). *Bygging av Frostlaboratorium og forsøk utført med BASF-Masterseal 345*.
- Lindstrøm, M. (2005). *Teknologirapport nr 2412. Tunnelduk, Erfaringer fra norske tunneler 1994-2004*. Vegdirektoratet.
- Matsuoka, N., & Murton, J. (2008). Frost Weathering : Recent advances and future directions. *Permafrost and periglacial processes, 19(2)* , ss. 195-210.
- Meteorologisk institutt. (2012). *met.no*. Hentet April 2012 fra <http://eklima.met.no>
- Midttømme, K., & Hilmo, B. O. (2000). *Kartlegging av grunnvarme fra fjell-sluttrapport*. NGU Rapport nr: 2000.034.
- NGU. (2008, Januar 3). *Georessurser - Grunnvarme - Bergvarme*. Hentet Februar 12, 2012 fra Norges Geologiske Undersøkelse: <http://www.ngu.no/no/hm/Georessurser/Grunnvarme/Bergvarme/>
- Pedersen, K. B. (2002). *Frostmengder i tunneler. Intern rapport 2301*. Statens Vegvesen.
- Rathore, M. M., & Kapuno, R. R. (2008). *Engineering Heat Transfer, second edition*.
- Skistad, H. (2012). (A. M. Farstad, Intervjuer)
- Tharp, T. (1987). Conditions for crack propagation by frost wedging. *Geological Society of America Bulletin 99(1)* , ss. 94-102.
- Thue, J. V. (2010). *Husbygningsteknikk Bygningsfysisk grunnlag*. NTNU Institutt for bygg, anlegg og transport.
- Vassenden, S. (2010). *Frostlaboratoriet – testing av varme/kuldeutveksling mellom tunnel og omkringliggende bergmasse*. Masteroppgave NTNU.

Vegvesen. (2010). *Håndbok 021 Vegtunneler*.

Vegvesenet. (2006). *Håndbok 163, Vann og frostsikring i tunneler*.

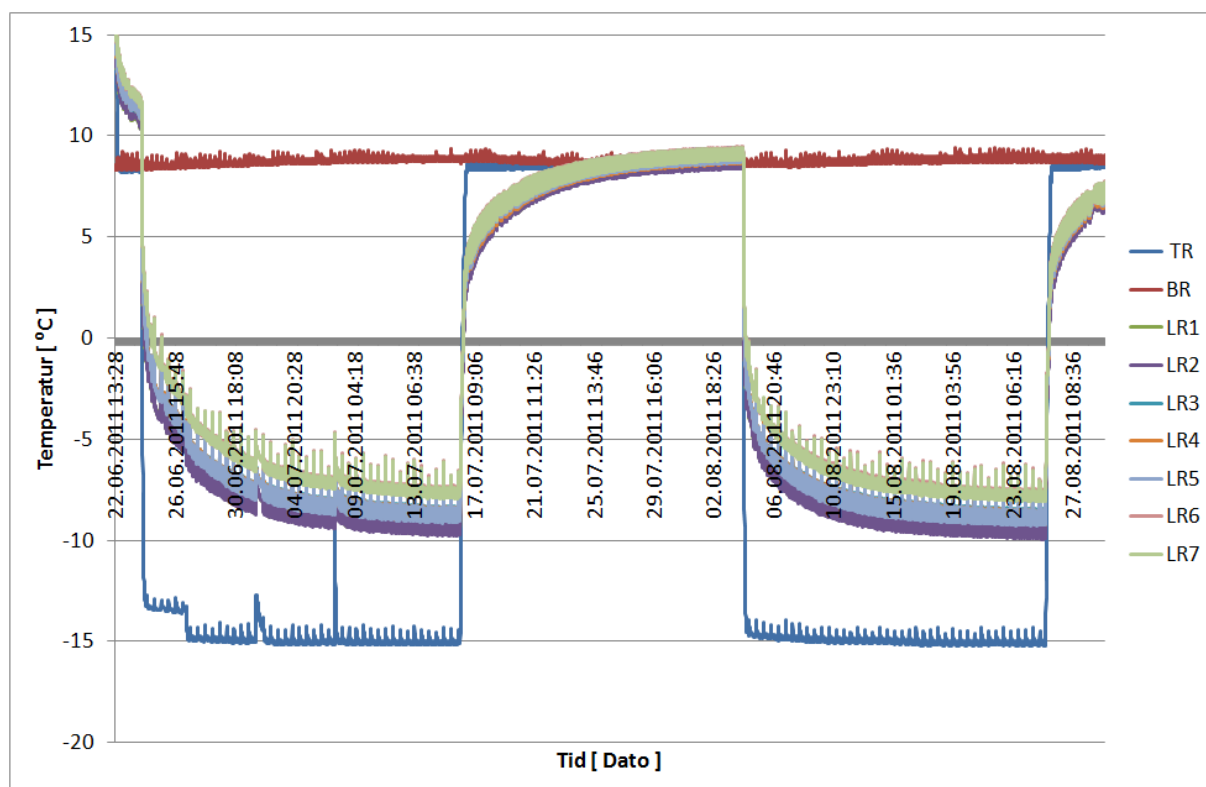
Wachenfelt, B., Skistad, H., & Moe, H. L. (2007). *WG Tunnelhvelv T100 og frostmotstand*. SINTEF Byggforsk.

# Vedlegg A

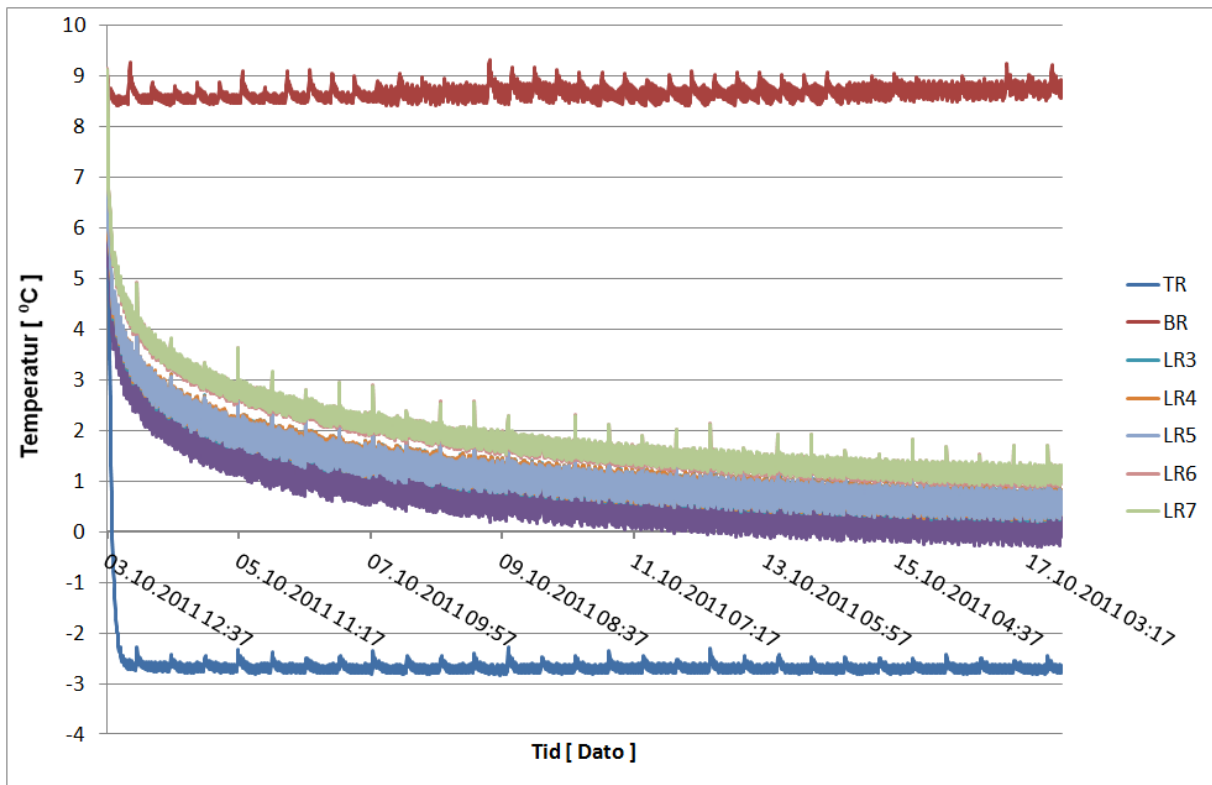
## Frostlaboratoriet - Resultater fra luftrommet

Dette vedlegget inneholder diagrammer for resultater fra Frostlaboratoriet som ikke er bearbejdet på noe vis. Det ble gjort forenklinger i presentasjonene av luftrommet i resultatdelen, for å gi bedre oversikt.

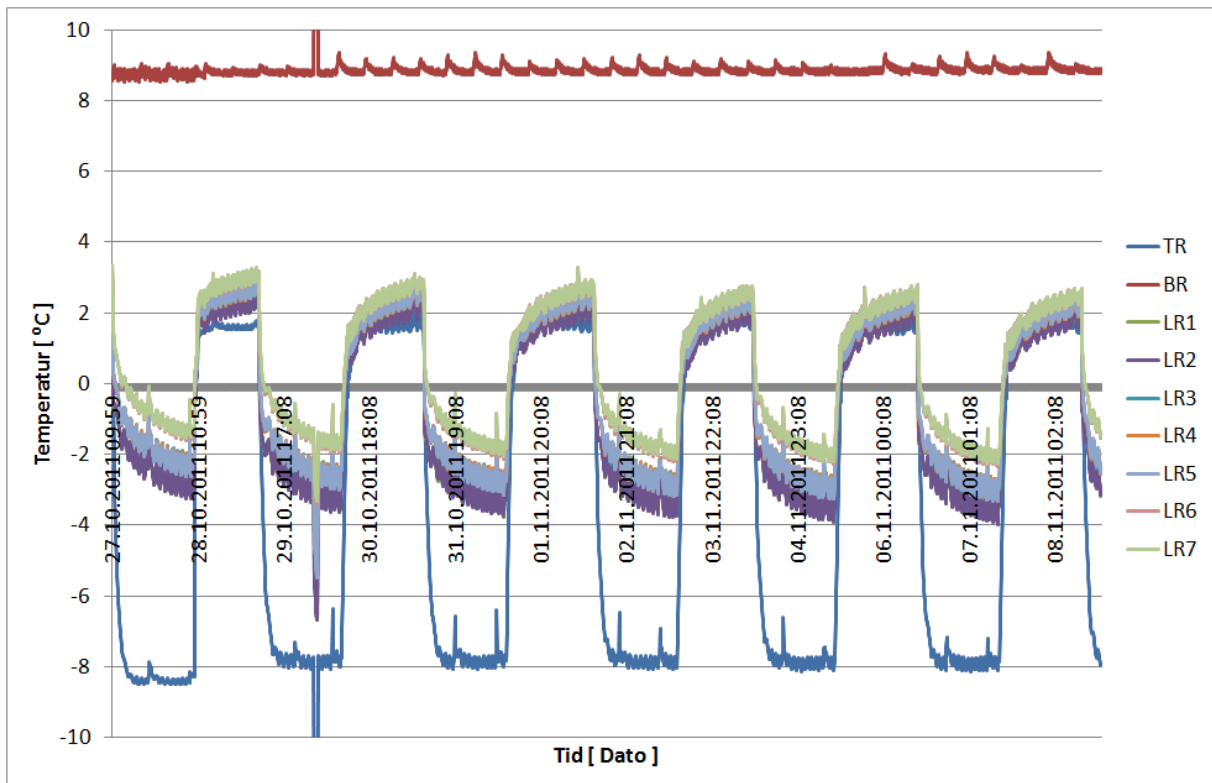
### Forsøk F-1.



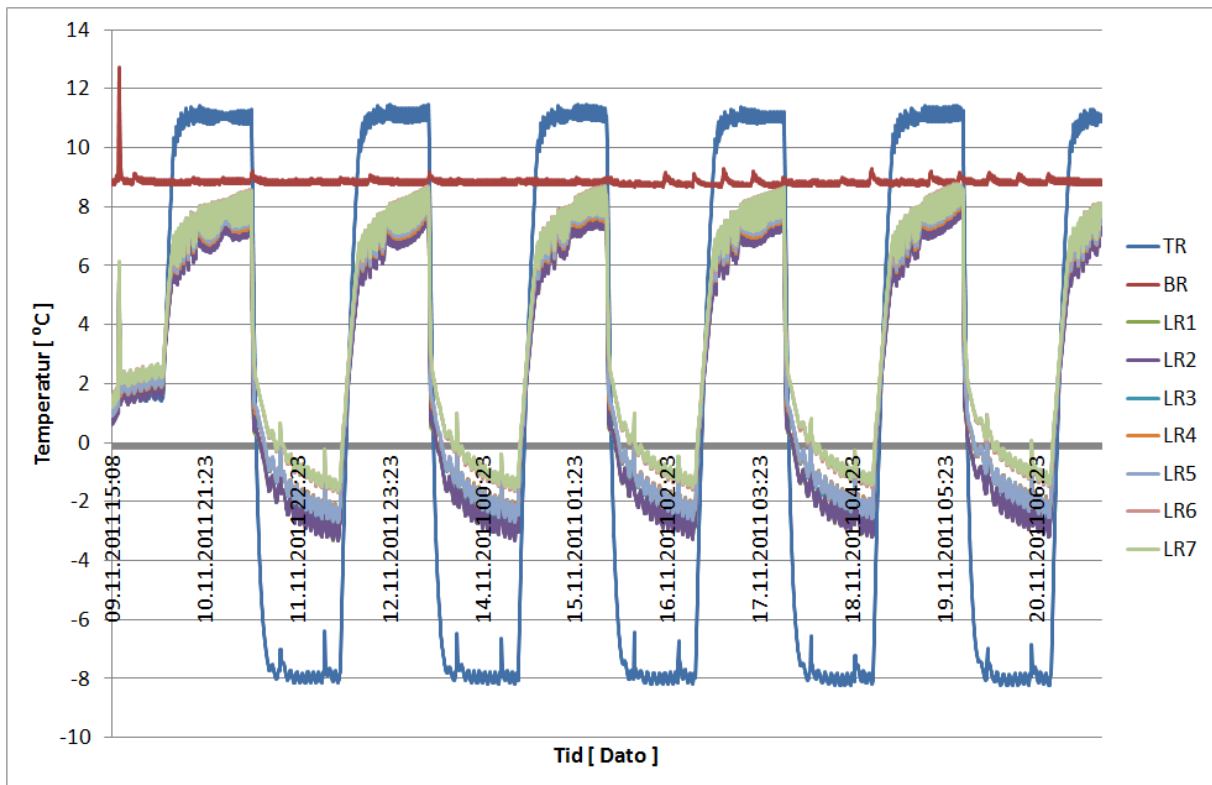
### Forsøk F-2:



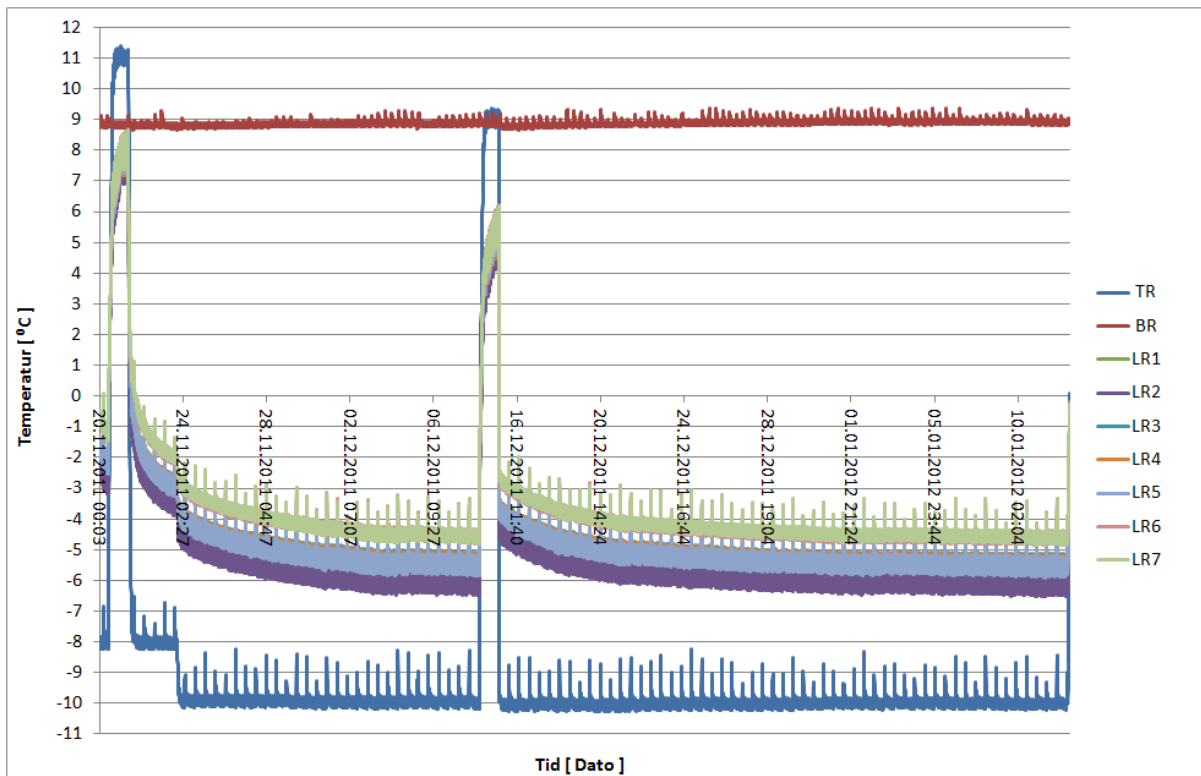
### Forsøk F-3:



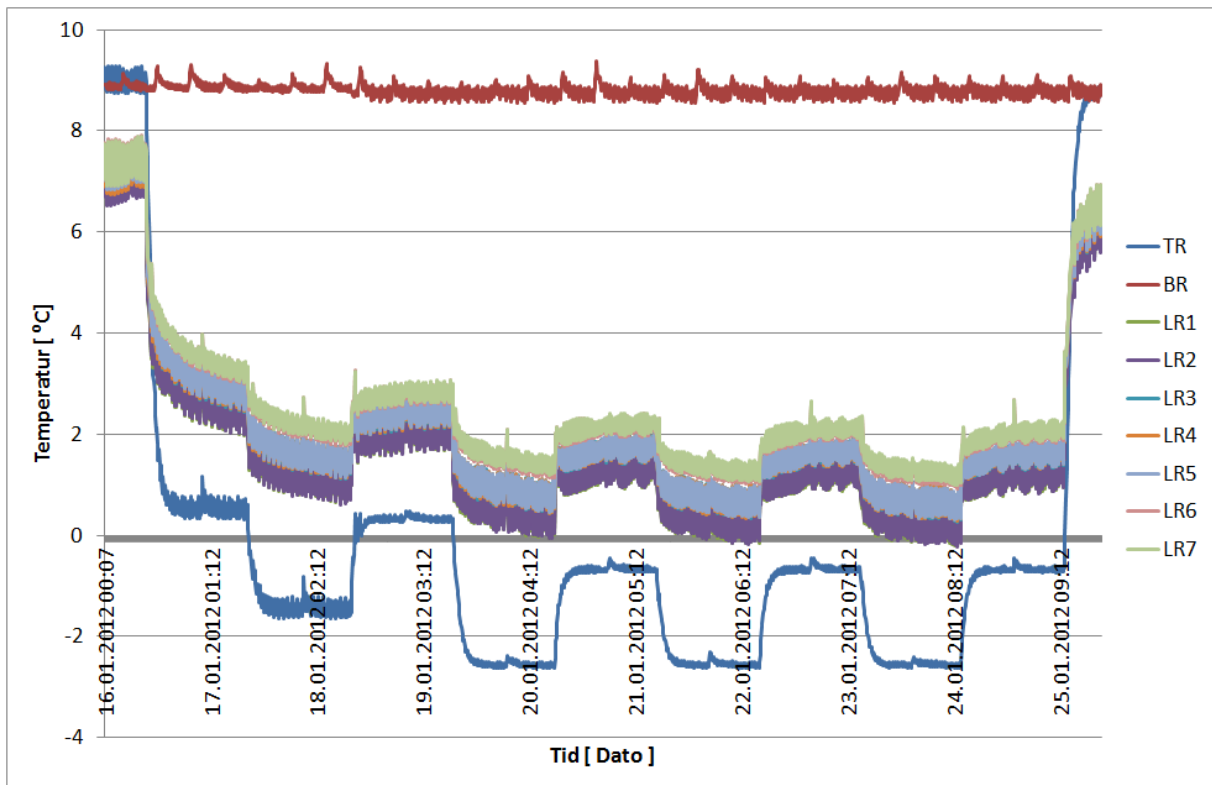
### Forsøk F-4:



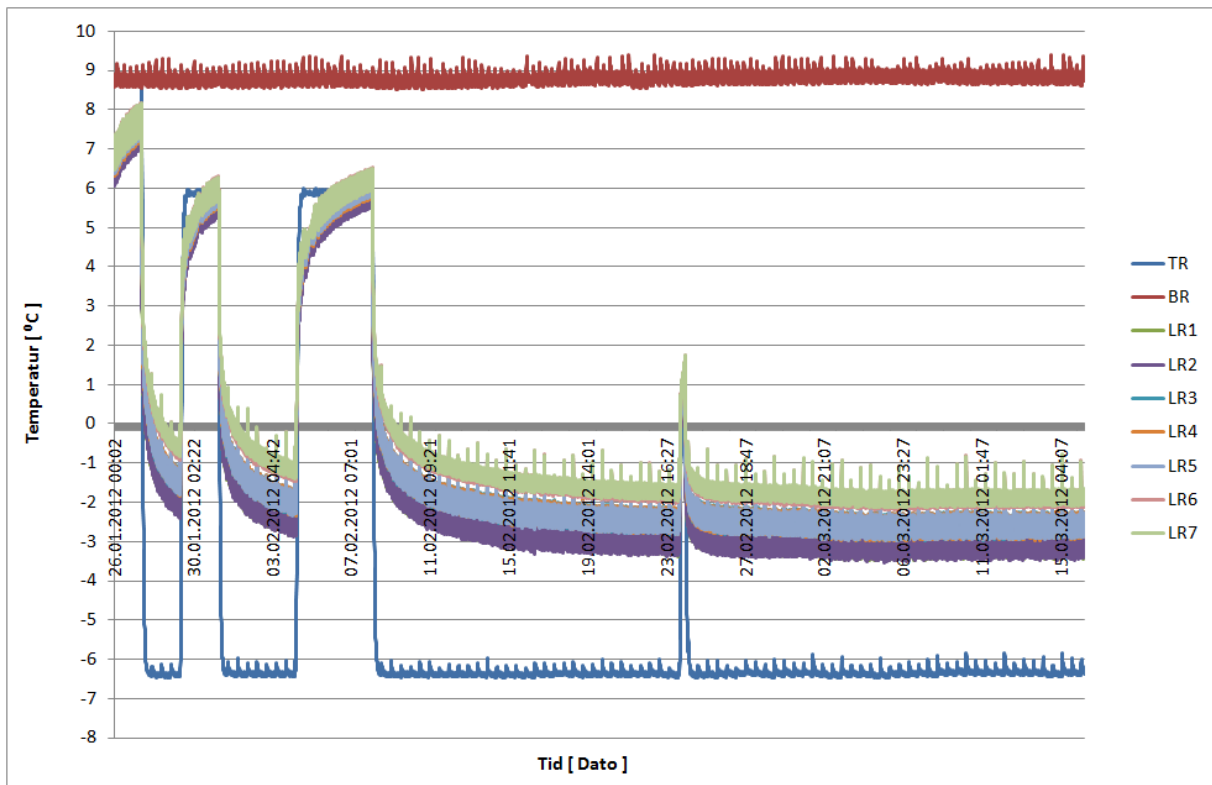
### Forsøk F-5:



### Forsøk F-6:



### Forsøk F-7:

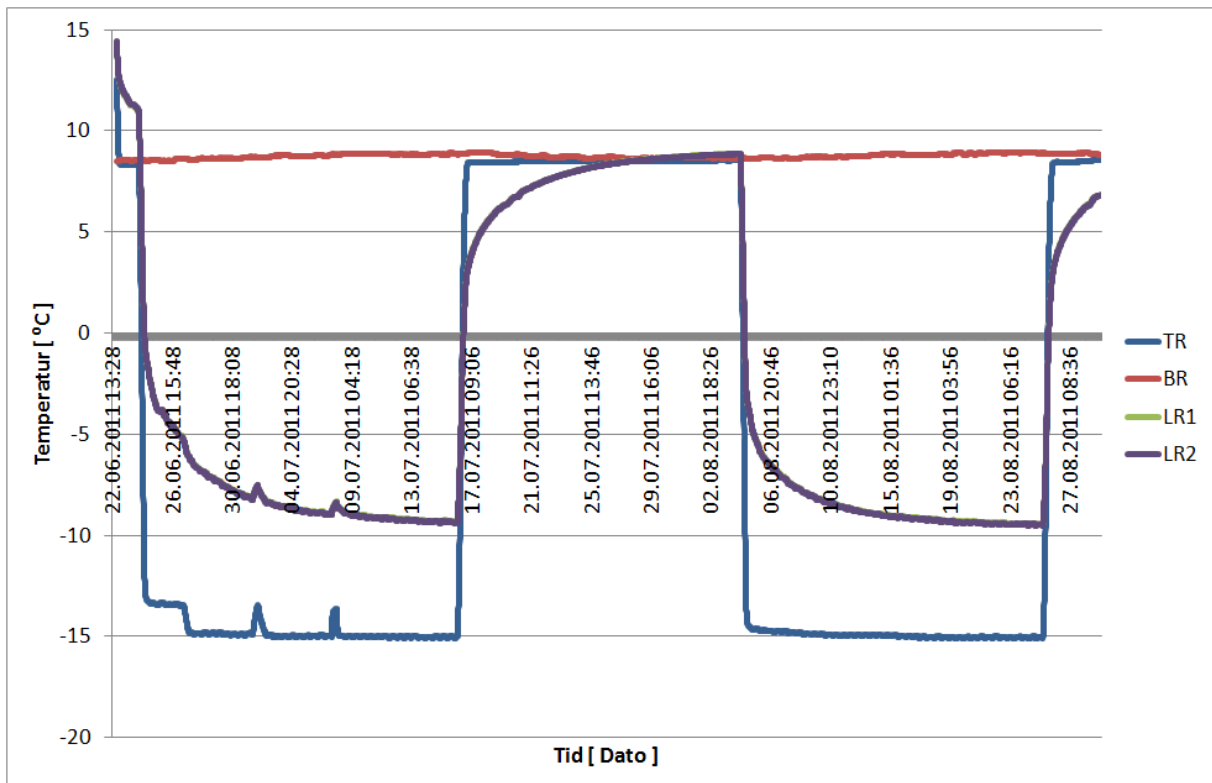


## Vedlegg B

### Frostlaboratoriet – Forsøk F-1

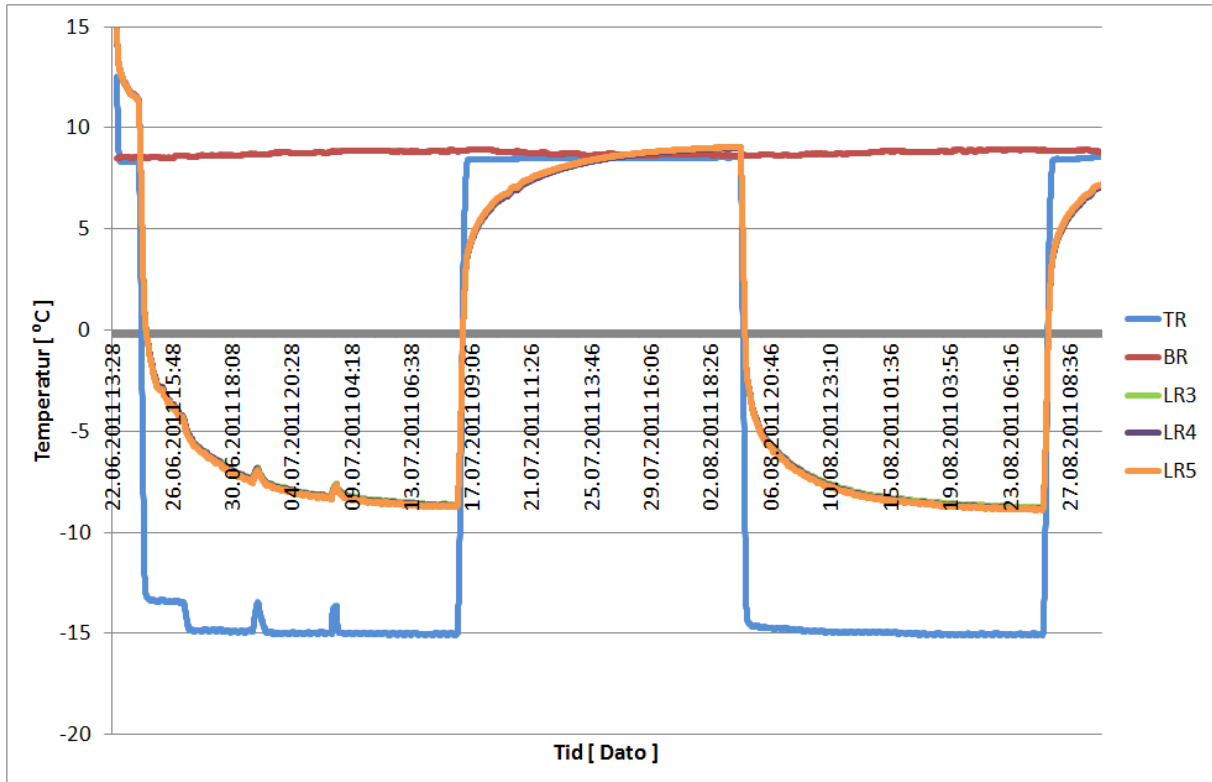
Denne vedleggsdelen viser diagrammer som er noe av bakgrunn for de forenklingene som er gjort med hensyn på å presentere resultater fra luftrom og granittvegg i Frostlaboratoriet.

#### B.1 Luftrommet - Sammenligning av resultater fra sensorer i samme høyde i Luftrommet.

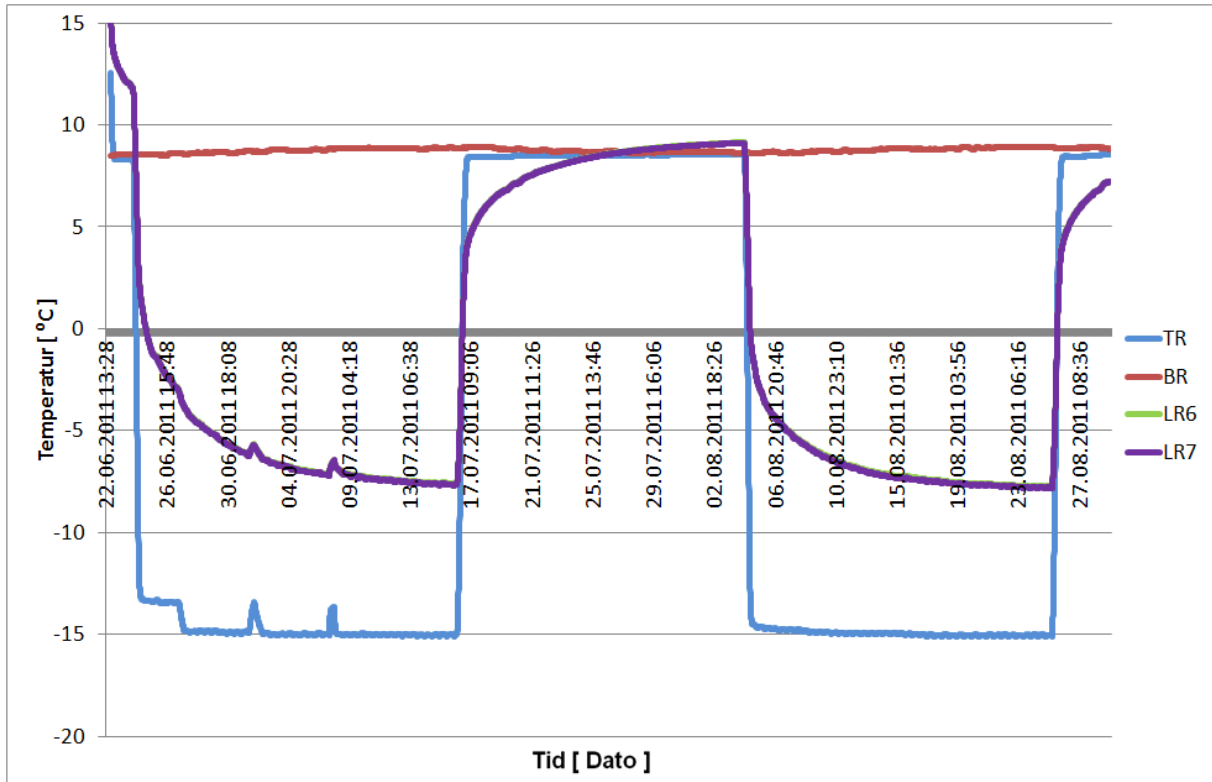


Figur 0-1 Forsøk F1: Resultatene fra sensorene i Luftrommet LR1 og LR2 som er plassert i 75 cm høyde.





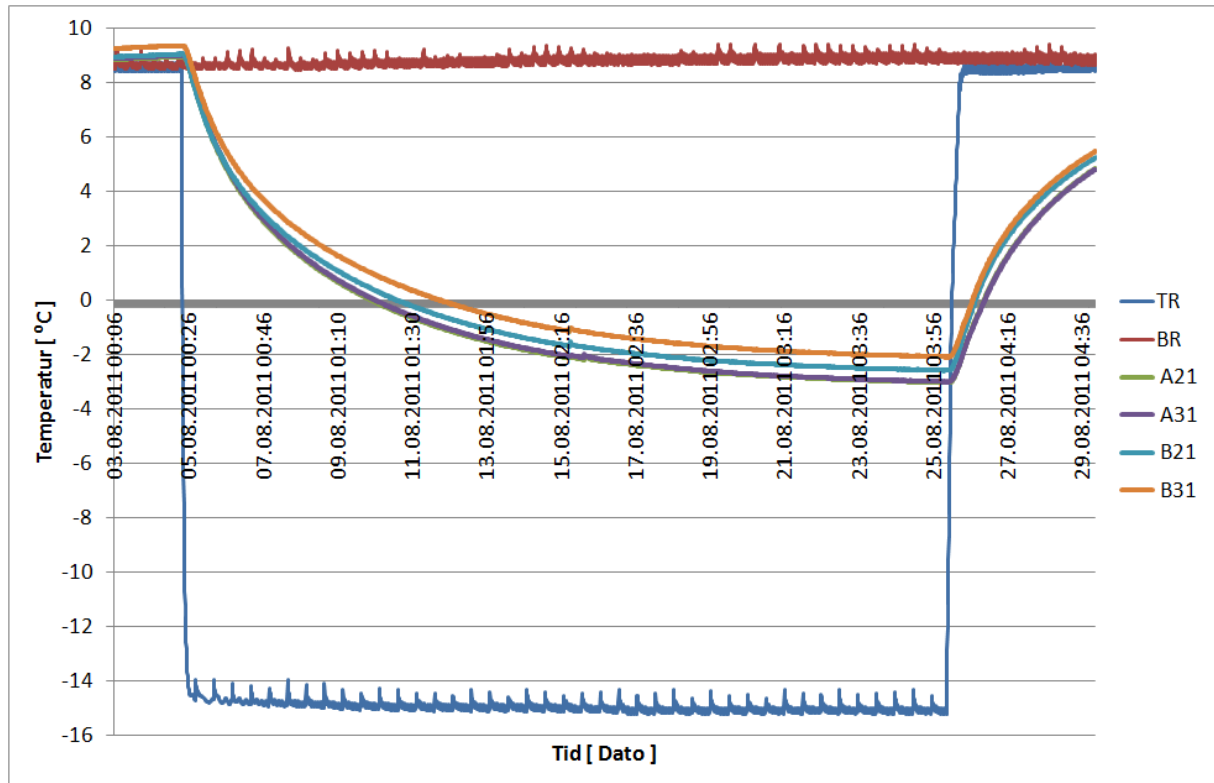
Figur 0-2 Forsøk F1: Temperaturer for sensorene LR3, LR4 og LR5 i Luftrommet i høyden 115 cm over gulvet.



Figur 0-3 Forsøk F1: Temperaturer for sensorene LR6 og LR7 i Luftrommet i høyden 160 cm over gulvet.

## B.2 Forsøk F1. Granittveggen - Sammenligning av resultatene fra granittblokkene A2, A3 og B3.

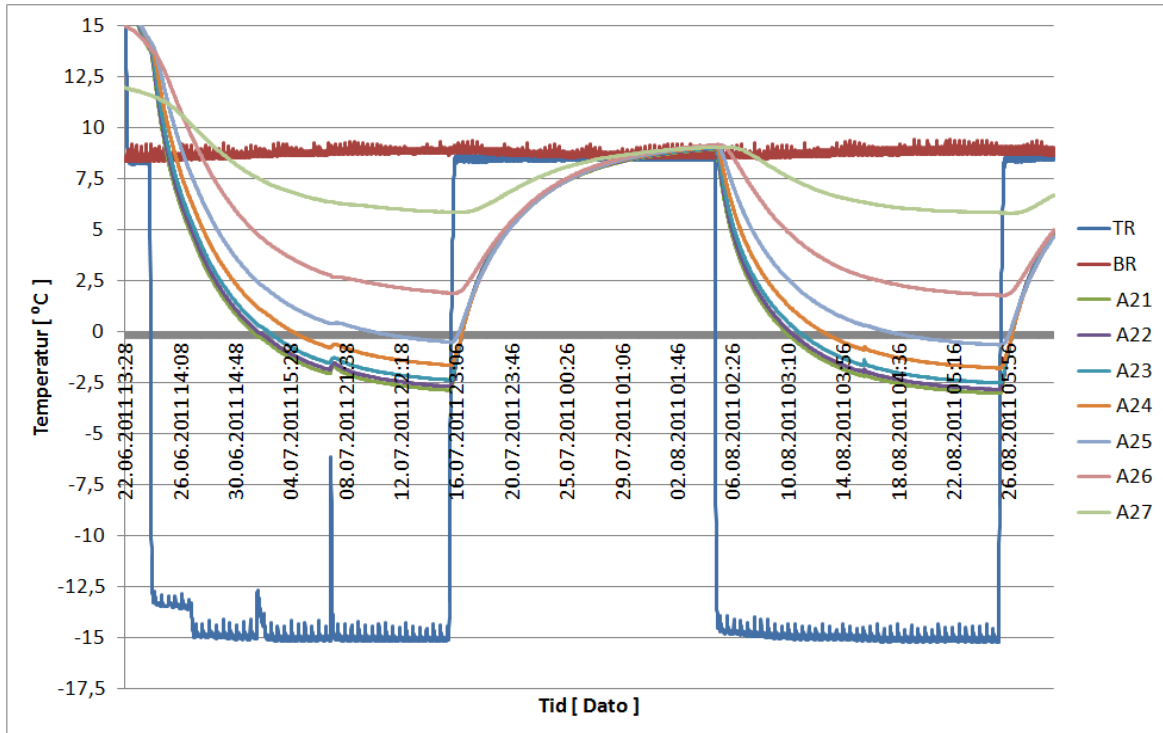
Argumentasjon for at blokk B2 blir benyttet:



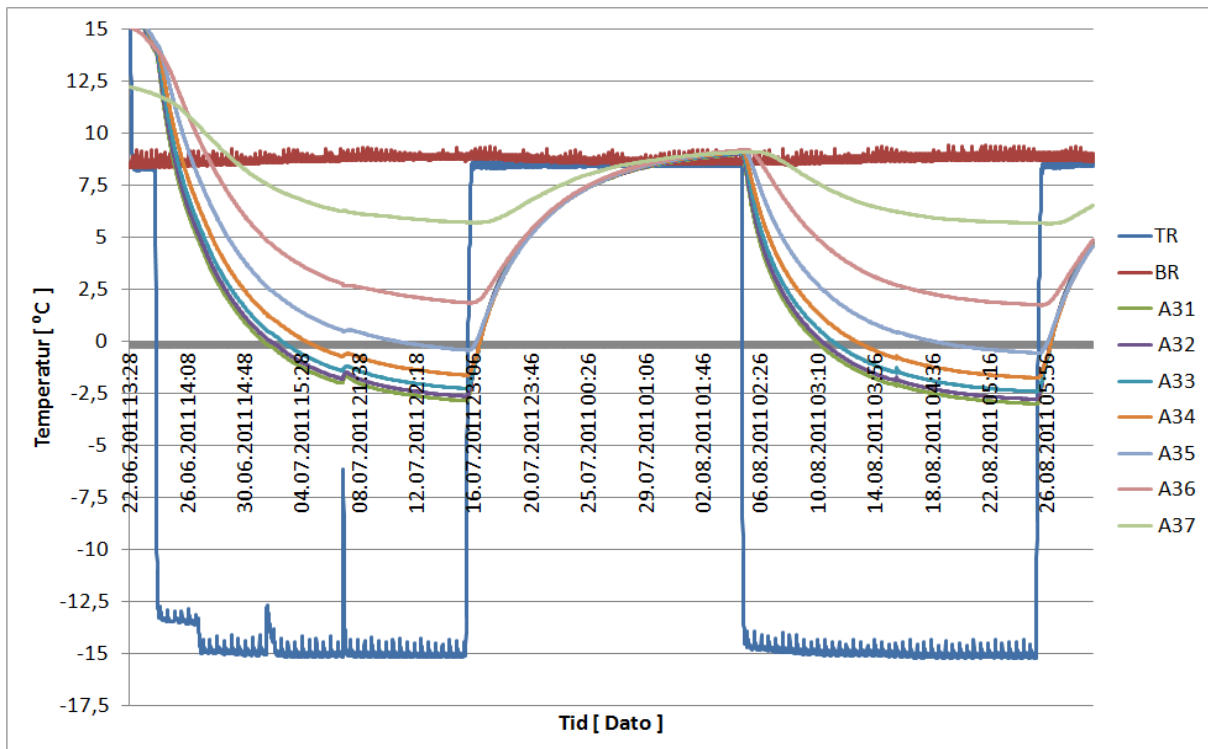
Figur 0-4 Forsøk F1: Temperaturene i granittblokkene A21, A31, B21 B31 som ligger 20mm inn i granittblokkene.

### B.3 Forsøk F1 – Temperaturprofiler i granittveggen

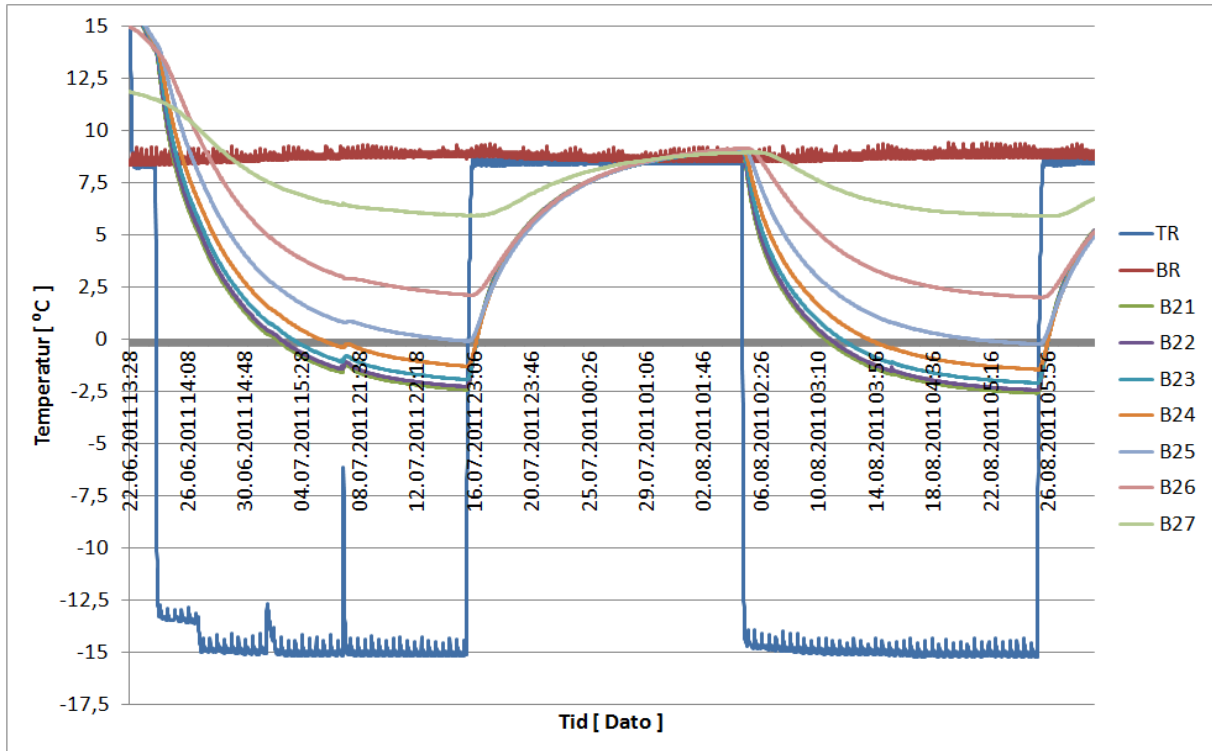
Resultater fra granittblokkene A2, A3, B2 og B3. Resultatene her er også en del av argumentasjonen for å benytte B2 som representativ blokk i granittveggen.



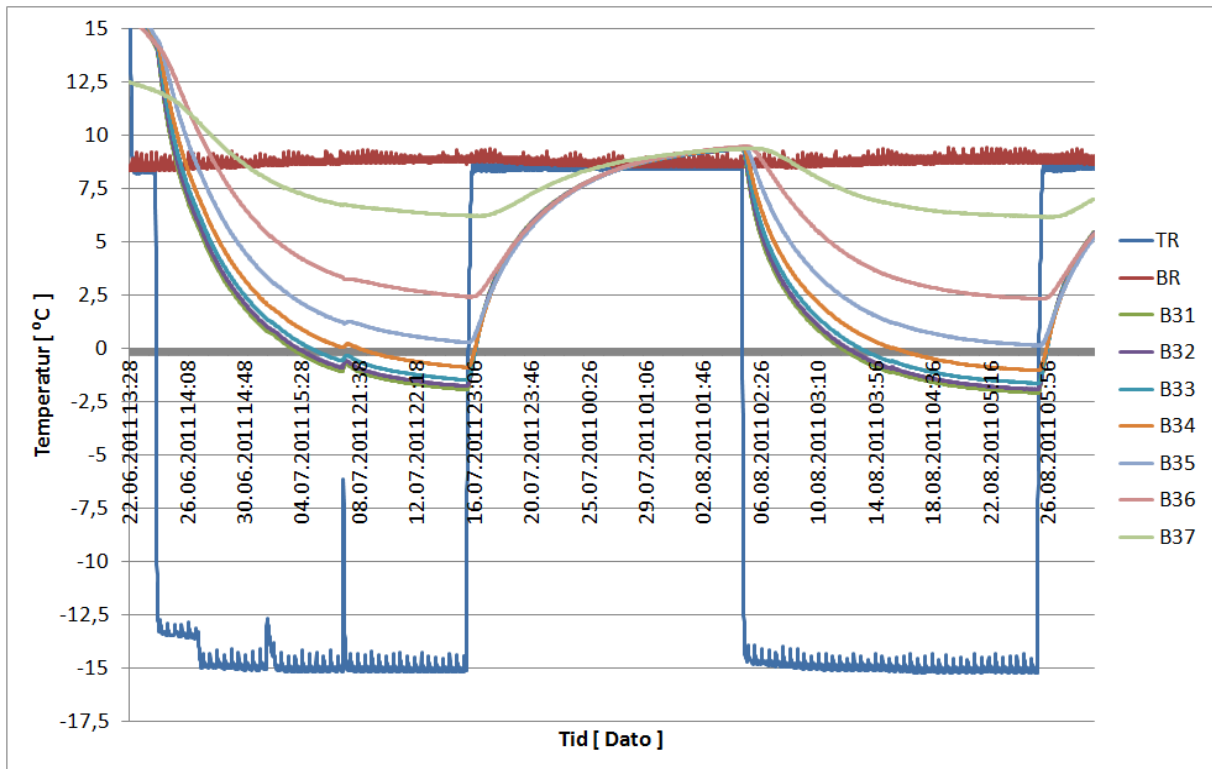
Figur 0-5 Forsøk F-1. Resultater fra granittblokka A2



Figur 0-6 Forsøk F-1. Resultater fra granittblokka A3.

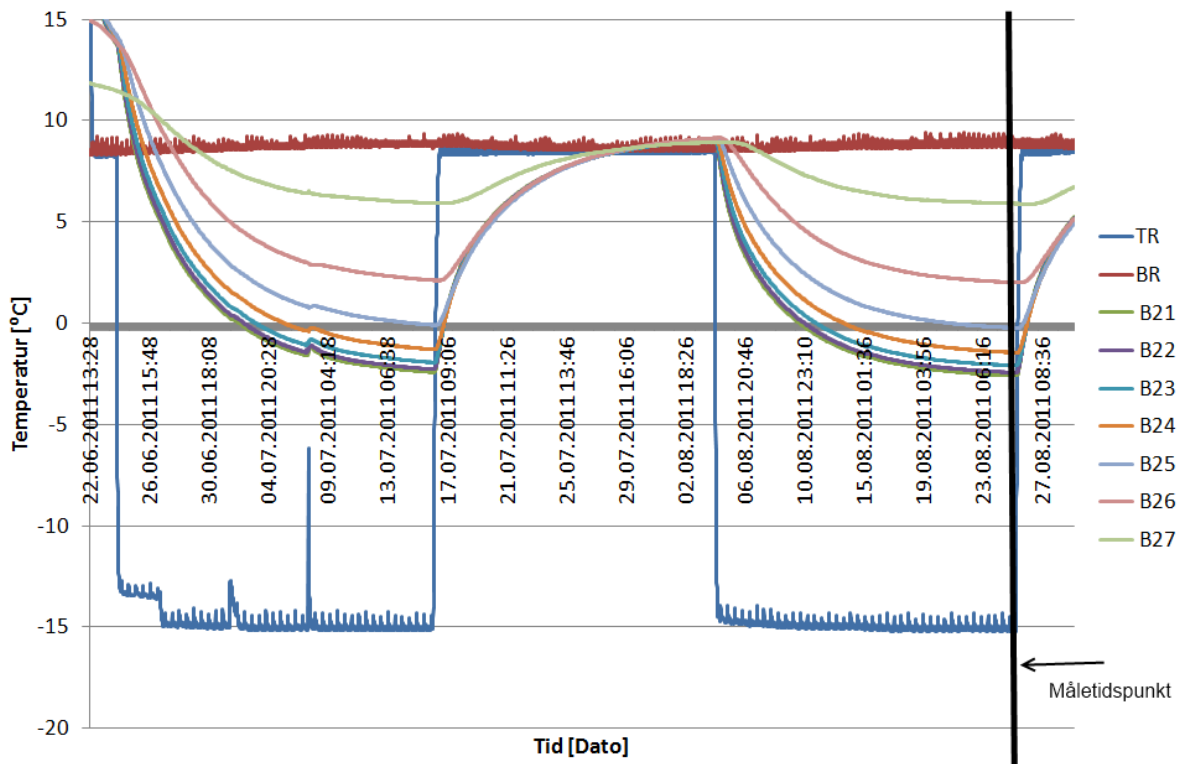


Figur 0-7 Forsøk F-1. Resultater fra granittblokka B2.

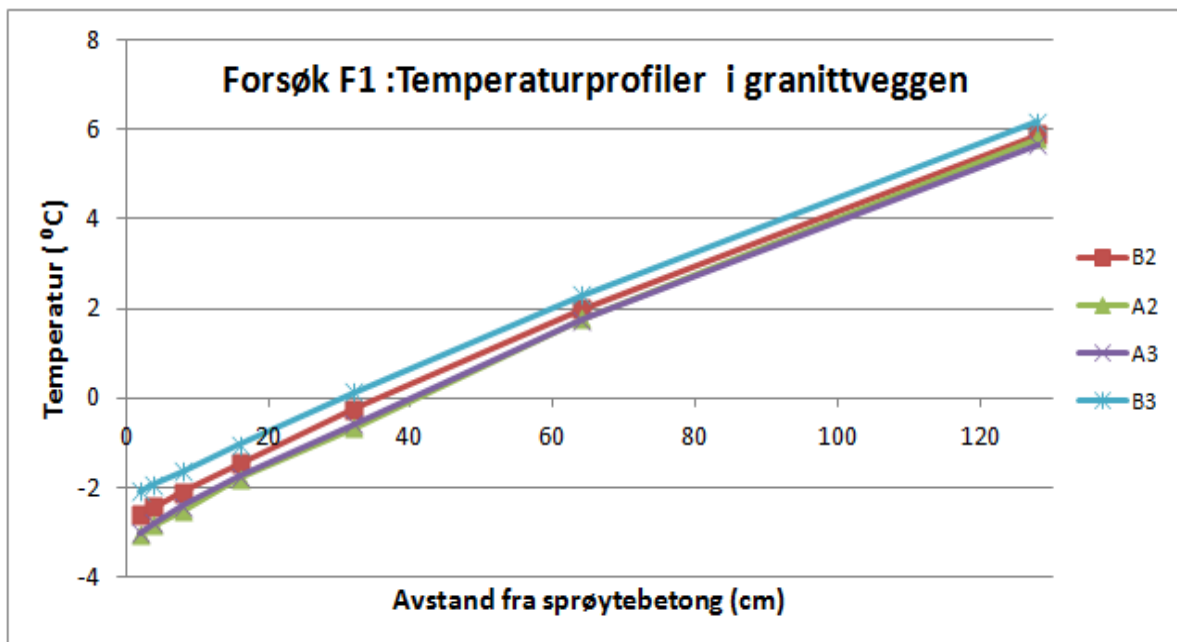


Figur 0-8 Forsøk F-1. Resultater fra granittblokka B3.

Måletidspunkt for temperaturprofilene vist i resultater fra Blokk B2:



Figur 0-9 Forsøk F1: Svart linje markerer måletidspunkt (25.8.2011 kl 12:46) for temperaturprofiler i granittveggen.



Figur 0-10 Forsøk F1: Temperaturprofiler i granittveggen etter 21 dager med -15 °C, siste del av siste stegløst. Måletidspunkt 25.8.2011 kl 12:46.