



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet  
Institutt for matematiske realfag og teknologi - IMT

Masteroppgave 2014 30stp

# **Frostsprengning i transportsystemer for olje**

Martin Hoffmann

# Frostsprengning i transportsystemer for olje

av Martin Hoffmann



Gradsoppgave

Maskin, prosess og produktutvikling

IMT, NMBU - 2014

## Forord

Da jeg valgte denne oppgaven i januar 2014, var hovedmotivasjonen å kunne jobbe med problemstilling som hadde klare betingelser, og opphav i et virkelig, praktisk problem. Miljøaspektet ved å kunne forhindre utslipp står i god tråd med NMBU's visjoner og overordnede mål [B](#)), og har også vært en motivasjonsfaktor. Å jobbe med analyser, og praktiske forsøk har vært både spennende, og svært utfordrende.

Jeg vil benytte anledningen til å takke Johan Spenningsby, og COWI for oppgaven, og produksjon av prøverør, førsteamanuensis Jan Kåre Bøe for god veiledning til alle døgnets tider, og Tom Ringstad for hjelp med testutstyret. Uten dere hadde ikke denne oppgaven vært mulig.

Jeg håper de som leser dette får nytte av funnene som er gjort i denne oppgaven

---

Martin Hoffmann

Ås, 14. Mai 2014

## Sammendrag

De senere årene har problematikken rundt frostsprengning i rør fått oppmerksomhet etter lekkasjer ved petroleumsanlegg, som følge av oppsamling av kondens med påfølgende utvidelse når denne fryser. Konsulentselskapet COWI har ønsket å utrede effektene, og risikoen for frostsprengning i dreneringsstusser på hovedledninger, da disse anses som utsatt for frostsprengning, og kontaktet NMBU med forslag om en hovedoppgave i 2013.

Denne oppgaven har som mål å utrede, og analysere effektene av frostsprengning på dreneringsstusser gjennom praktiske forsøk, håndberegninger, og FEM-analyse. De praktiske forsøkene er utført på rørdeler av samme materiale og utforming som de aktuelle delene. Ekspansjonen av disse har blitt målt ved hjelp av strekkklapper, og spenninger i stålet har blitt beregnet ut fra disse målingene. Målingene har blitt sammenlignet med håndberegninger, og FEM-analyse av forenklet modell i ANSYS, for å kontrollere resultatene.

Forsøkene viser at spenningene som oppstår i rørene er avhengig av størrelse og utforming på rørene. For rette rør fås det høyere spenninger ved større diameter. I rør med bend oppstår det høye spenninger i forkant av bendet. Dette er også det mest kritiske området, og det eneste området der det er målt spenninger som overskrider den tillatte designspenningen etter NS-EN 13480.

Det foreslås at videre arbeid tar for seg mer omfattende målinger, der det settes opp flere målepunkter, og at det utføres forsøk der det påføres en kjent påkjenning på rørene, for å verifisere målingene.

## Abstract

The problem of frost action in pipes has in recent years gotten increased attention, due to spillage in petrol delivery systems, caused by the accumulation and subsequent freezing of water condense. The consultant agency COWI wants to investigate the effect, and risk of frost action in drainage pipes on the main product pipelines, since these are considered to be exposed to frost, and contacted NMBU with the problem in 2013.

The goal of this paper is to examine, and analyze the effects of frost action in drainage pipes, through practical experiments, hand calculations, and FEM-analysis. The practical experiments are performed on pipes with the same dimensions and material as the actual drainage pipes. The expansions of the pipes are measured by stain gauges, and stresses in the material are calculated from these measurements. The measurements and calculated stress values are compared to hand calculations and FEM-analysis of a simplified model in ANSYS, to evaluate the results.

The experiments show that the resulting stresses are dependent on the pipes size and shape. For the straight pipes, higher values occur with higher diameters. In pipes with bends, high stress concentrations occur in the horizontal pipes leading up to the bend. This appears to be the most critical point, and is the only point where stresses exceed the design stress limit as given in NS-EN 13480.

Further studies are recommended to include more exhaustive measurements, and more measuring points. I also recommend that strain gauge measurements are validated through applying a known stress to the test objects.

## Innholdsfortegnelse

Forord .....	i
Sammendrag .....	ii
Abstract .....	iii
Innholdsfortegnelse .....	iv
1. Innledning.....	8
1.1 Bakgrunn .....	8
1.2 Oppdragsbeskrivelse.....	9
1.3 Problemstilling.....	9
2. Prosjektplanlegging.....	10
2.1 Hovedmål og delmål.....	10
Hovedmål.....	10
Delmål.....	10
2.2 Arbeidsplan.....	10
2.3 Kvalitetssikring.....	11
2.4 Begrensninger .....	11
3. Metodebeskrivelse.....	12
3.1 Verktøy .....	12
3.1.1 Labbforsøk .....	12
3.1.2 Håndberegninger og FEM-analyse .....	13
3.1.3 Databehandling .....	13
4 Terminologi.....	14
4.1 Begreper og forkortelser .....	14
4. 2 Symboler og enheter .....	14
4.3 Formler og definisjoner: .....	16
5. Teoretisk grunnlag.....	17

5.1 Hooks lov.....	17
5.2 Spenninger i rør .....	18
5.2.1 Tynnvegget teori .....	18
5.2.2 Tykkvegget teori .....	18
5.3 Tøyning i rør.....	20
5.3.1 Volumekspansjon av sylinder .....	20
5.3.2 Temperaturpåvirkning på rørene.....	22
5.4 Egenskaper for vann og is .....	23
5.5 Materialdata .....	25
6 Forsøks og måleteknikk .....	28
7. Gjennomføring av forsøk .....	32
7.1 Testobjekter .....	32
7.2 Betragtning av fryseprosess.....	33
7.3 Tidlige beregninger.....	36
7.3.1 Forventet diameterendring fra temperaturendring: .....	36
7.3.2 Forventet målt $U_O$ pr. MPa: .....	37
7.3.3 Forventede verdier ved designspenning: .....	38
7.3.4 Ekspansjon av is.....	41
7.4 Hypotese .....	43
7.4.1 Forventet utvikling av kritiske punkter og valgte målepunkter .....	43
7.4.2 Forventet målingsforløp.....	44
7.4.3 Forventet størrelsesorden og valg av måleutstyr .....	45
7.5 Forsøksoppsett .....	46
7.5.1 Utstyr.....	46
7.5.2 Testoppsett for tidlige forsøk .....	47
7.5.3 Testoppsett for hovedforsøk: .....	48
7.6 Gjennomføring: .....	48

7.6.1 Tidlige forsøk:.....	48
7.6.2 Hovedforsøk.....	48
7.8 Resultater .....	55
7.8.1 Forsøk uten vann.....	55
7.8.2 Beregnede min- og max-verdier .....	56
7.8.3 Aksiell ekspansjon av vannet:.....	57
8. Analyser .....	58
8.1 Sammenligning av forventet og observert fryseforløp.....	58
8.2 Sammenligning av forventet og observert aksiell ekspansjon.....	59
8.3 Sammenligning av forventet og faktisk spenningsutvikling .....	60
8.4 Endringer i diameter .....	61
8.5 Beregnede spenninger.....	62
8.6 Sammenlikning FEM-analyse .....	63
8.7 Godkjenning mot Erokode.....	68
8.8 Usikkerhet og feilkilder .....	68
8.8.1 Feil i antagelser .....	68
8.8.2 Kontroll av testoppsett .....	69
8.8.3 Feil på utstyr .....	69
9. Prosessdiskusjon.....	70
9.1 Forsinkelser i forhold til arbeidsplan.....	70
9.2 Forsøk og resultater .....	71
9.3 Feilkilder og svakheter .....	71
10. Konklusjon og anbefalinger .....	72
10.2 Anbefalinger .....	72
10.3 Videre arbeid .....	72
11. Referanser.....	73
11.1 Litteratur .....	73



11.2 Internett.....	73
12. Vedlegg .....	74
Vedlegg A - Loggført ugangssepning.....	74
Vedlegg B - Beregnede spenninger .....	77
Vedlegg C - teknisk tegning av rørdeler fra COWI.....	80
Vedlegg D - ANSYS APDL script .....	81

## 1. Innledning

COWI er et av Norges største rådgivende konsulentselskaper, og jobber opp mot flere deler av industrien. I 2013 ble det sendt et forslag til en mulig hovedoppgave fra COWI til UMB, der de ønsket en utredning rundt temaet frostsprengning. Denne oppgaven er resultatet.

### 1.1 Bakgrunn

Desember 2012 ble det oppdaget en lekkasje av en tankbilsjåfør, som stanset anlegget, og rapporterte hendelsen. Det viste seg at det var noen eldre ventiler som hadde feilet, i et dødlegg på anlegget (en strekning rør som ikke var i bruk). Etter en granskning kom det frem at det hadde forekommet frostsprengning i disse på grunn av kondensering og oppsamling av vann. [A\)](#)



Bilde 1.1 - Anlegget på Sjurøya [A\)](#)

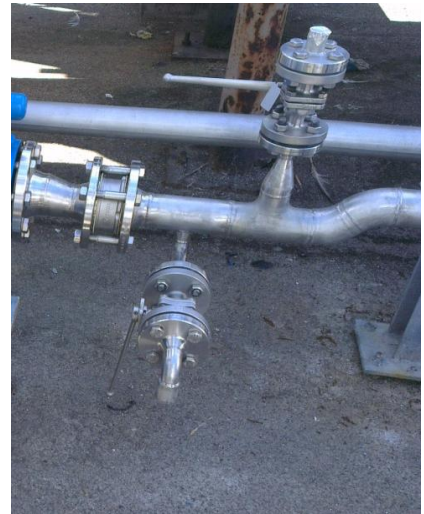
Problematikken rundt frostsprengning i rør har fått oppmerksomhet etter hendelser der frostsprengning i petroleumsanlegg trolig har ført til lekkasjer og utslipp. Spesielt er det utslippet på over  $300m^3$  petroleumsprodukter på anlegget Sjurøya i 2012 som har satt fokus på problemet. Dette er en stasjon der tankbiler henter produkt for å kjøre ut til kunder.

I dette anlegget ligger produktet i sisterner inne i fjellet, i kontakt med sjøvann. Produkt pumpes ut til anlegget, der det går igjennom uisolerte rør. På grunn av temperaturforskjeller oppstår det vannkondens, som samles i lavpunkter i anlegget. Spesielt i strekninger der produktet blir stående stille.

Risikoen for skader fra frostsprengning er størst der det er fare for oppsamling av kondens. Dette forekommer i dødlegg, og vertikale rør. Faren anses som stor også i gamle støpejernsventiler, da disse holder en lavere kvalitet (støpejern er sprøtt).

Som en forhåndsregel har det blitt startet en jobb med å erstatte alle eldre støpejernsventiler med moderne stålventiler. I tillegg skal dødlegg fjernes fra anlegg, eller blindes av.

Derfor anses dreneringsrørene som sitter på lavpunkter på anlegget for å være de mest utsatte delene for skader fra frostsprengning.



Bilde 1.2 Dreneringsrør [1\)](#)

Dette er vertikale rør som skal sitte på alle lavpunkter i anlegget, for å kunne drenere systemet, og fjerne oppsamlet vannkondens. Dreneringsrørene sitter på undersiden av produktledningene, og ender i en kuleventil. Ved drenering åpnes ventilene, og vannkondens fjernes. Ventilen stenges først når det kommer produkt ut, slik at det ikke står vann inne i selve ventilen. Ventilene har også en mye høyere godstykkelse, og regnes som sikre mot frostsprengning.

## 1.2 Oppdragsbeskrivelse

COWI ønsker å utrede risikoen for lekkasjer som følge av frostsprengning i dreneringsrør på lavpunkter i slike anlegg. De ønsker også simuleringer av gjentatte sykler med tining og ny frysning, FEM-analyser, og kodesjekk i henhold til aktuell standard (eurokode EN 13480).

## 1.3 Problemstilling

Problemstillingen for oppgaven er å utrede, beregne, og analysere den mekaniske påkjenningen på dreneringsrør for petroleumsanlegg som følge av oppbygning av vannkondens med påfølgende frostsprengning, og kontrollere om eventuelle spenninger er akseptable i henholdt til gjeldende standard.

## 2. Prosjektplanlegging

Prosjektet skal gjennomføres i henhold til kontrakten for masteroppgaver. I kontrakten er hovedmålene definert slik: "*Å utrede, beregne og analysere effekter av vannkondensering med påfølgende frostsprenning gjennom modellering og FEM-analyse, kombinert med avgrensede laboratoriek eksperimenter*"

### 2.1 Hovedmål og delmål

Målsetningen for oppgaven ut fra problemstilling og oppdragsbeskrivelse, kan deles opp i følgende hovedmål og delmål:

- | <b>Hovedmål</b>   | <b>Delmål</b>  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Utrede, beregne og analysere effekten av frostsprenning i dreneringsrør når vann kondenserer i disse og fryser.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gjennomgang av relevant teori.</li> <li>• Planlegging av forsøk og FEM-simulering</li> <li>• Gjennomføring av forsøk og FEM-analyser</li> <li>• Resultatbehandling, analyser og rapportering</li> </ul> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ta stilling til om spenninger kan godtas etter designstandarden for EN 13480</li> </ul>                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kontrollere resultater mot designspenning for de aktuelle materialene.</li> </ul>   |

### 2.2 Arbeidsplan

Forløpet for arbeidet med oppgaven er fastsatt i masterkontrakten, og er vist i Tabell 2.1.

Tabell 2.1 - arbeidsplan

	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun
Start						
Forberedelser						
Lab. arbeid						
Databearbeiding						
Oppgaveskriving						
Redigering						
Trykking						
Innlevering						
Eksamen						

## 2.3 Kvalitetssikring

Alle beregninger i oppgaven er dobbeltsjekket, og kontrollert opp mot FEM-analyser. Forsøkene som er utført er gjort i flere omganger, og det er undersøkt om resultatene er konsistente.

Resultatene er sammenlignet med forventede maksimal og minimalverdier, for å verifisere om de er fornuftige.

## 2.4 Begrensninger

For denne oppgaven er det satt noen begrensninger for å kunne få rapporten ferdig innenfor den avsatte tiden i arbeidsplanen, begrensninger for testutstyret, og budsjettet for oppgaven.

- På grunn av begrenset tid til forsøk er det kun utført målinger med strekkklapper på rørene av austenittisk stål.
- Antall målepunkter er begrenset til to pr. rør.
- Effektene av frostsprenning i rørbend er ikke tatt høyde for i beregningene, og ekspansjon i bendene er heller ikke målt.
- Aksialspenninger i røret er sett bort i fra, og det er forutsatt at disse er neglisjerbare. Dette er igjen på grunn av begrenset måleteknisk utstyr, og tid.

## 3. Metodebeskrivelse

I denne oppgaven vil det teoretiske grunnlaget utredes, med hensyn på den aktuelle problemstillingen. Dette skal gi en oversikt og de nødvendige verktøyene for å foreta beregninger og utredninger for resten av oppgaven, og å beregne forventede størrelser for forsøkene.

Hoveddelen av oppgaven består i eksperimentelle undersøkelser av de mekaniske påkjenningene når rørdeler utsettes for frostsprengning. De målte verdiene ses i forhold til forventede verdier, og kontrolleres mot håndberegninger og FEM-analyse.

For FEM-analysen skal det utarbeides en FEM-modell for beregninger.

Resultater kontrolleres mot eurokode EN 13480.

Oppgaverapportering, prosessdrøfting, konklusjon og forslag til videre arbeid utføres i henhold til krav og prosedyre for IMT.

### 3.1 Verktøy

#### 3.1.1 Labbforsøk

Labbforsøk gjennomføres i to omganger. I den tidlige fasen utsettes noen av rørstussene for nedkjøling med og uten vann, der diameter på rørene måles på enklest mulig måte med mekanisk måleinstrumenter. Hensikten er å få grov oversikt over prosessen når rørene kjøles ned og utsettes, og avdekke eventuelle problematikk for hovedforsøkene. Herunder om det er noen åpenbare kritiske punkter for ekspansjonen for rørene, og eventuelle forhold som kan skape problemer for målingen under hovedforsøkene.

I andre fase skal det utføres mer omfattende forsøk, der rørstussene utsettes for frostsprengning. Utvidelse skal måles ved hjelp av strekkklapper på utvalgte punkter på rørstussene. Utstyret måler spenningsfall over strekkklappene, som skal regnes om til ekspansjon i målepunktet.

Forsøkene skal gjentas for å se om det er påvirkning ved gjentatte frysesykler.

### 3.1.2 Håndberegninger og FEM-analyse

Håndberegninger utføres for å kartlegge forholdet mellom ekspansjon, diameterendring, og spenninger i rørveggen, og skal brukes for å analysere data fra forsøkene. Det skal utføres håndberegninger for å finne størrelsen på ekspansjonen i rørene som vil føre til flytespenninger i rørstussene.

FEM-analyse utføres via ANSYS APDL. Her skal det lages modeller som skal brukes for å kontrollere håndberegninger. Modellene skal også brukes til sammenlikning og kontroll av resultater fra forsøkene.

### 3.1.3 Databehandling

Data fra forsøkene lagres i en loggfil i tekstformat. Disse forbehandles i programspråket PYTHON for å klargjøres for videre behandling i Microsoft Excel. Excel benyttes for å lage matriser for ekspansjon og spenninger i rørstussene ut fra målt spenningsfall over strekkklappene i forsøkene, og blir representert i grafer.

## 4 Terminologi

Dette kapittelet omhandler terminologi, viktige formler, og symboler med tilhørende enheter som brukes i denne oppgaven, og kan brukes som et oppslagsverk. Omregning til angitt enhet forklares ikke i beregningen, og det henvises derfor til angitte enheter under avsnitt 4.2.

### 4.1 Begreper og forkortelser

Tabell 4.1- begreper og forkortelser

Begrep/forkortelse	Betydning
COWI	Oppdragsgiver, og norsk konsultentselskap
UMB	Universitetet for miljø- og biovitenskap, nå: NMBU
NMBU	Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, tidligere: UMB
IMT	Institutt for matematiske realfag og teknologi
ANSYS	Programvare for FEM-analyse
APDL	Ansys Parametric Design Language, kodespråk for bruk med ANSYS
FEM	Finite Element Method, Elementmetoden

### 4.2 Symboler og enheter

Tabell 4.2 Symboler

Symbol	Betydning	Enhet
$F$	Kraft	$N$
$\sigma$	Spenning	$MPa$
$\sigma_t$	Tangentiellspenning	$MPa$
$\sigma_a$	Aksialspenning	$MPa$
$\sigma_r$	Radiell spenning	$MPa$
$f$	Designspenning	$MPa$
$p$	Trykk	$MPa$
$p_i$	Indre trykk	$MPa$
$E$	E-modulus	$MPa$
$L$	Lengde	$mm$



$L_0$	Opprinnelig lengde	$mm$
$\Delta L$	Endring av lengde	$mm$
$O$	Omkrets	$mm$
$\Delta O$	Endring av mkrets	$mm$
$V$	Volum	$m^3$
$\Delta V$	Endring av volum	$m^3$
$V_0$	Opprinnelig volum	$m^3$
$m$	Masse	$kg$
$\rho$	Tetthet	$kg/m^3$
$T$	Temperatur	$^{\circ}C$
$r$	Radius	$mm$
$r_i$	Indre radius	$mm$
$r_y$	Ytre radius	$mm$
$r_m$	Middelradius	$mm$
$D$	Diameter	$mm$
$\Delta D$	Endring av diameter	$mm$
$D_0$	Opprinnelig diameter	$mm$
$S$	Veggtykkelse	$mm$
$\Delta S$	Endring av veggtykkelse	$mm$
$S_0$	Opprinnelig veggtykkelse	$mm$
$\varepsilon$	Tøyning	$mm/mm$
$\varepsilon_t$	Tøyning i tangentiell retning	$(mm/mm)$
$\varepsilon_s$	Tøyning av veggtykkelse (radiell retning)	$(mm/mm)$
$\varepsilon_a$	Tøyning i aksiell retning	$(mm/mm)$
$\alpha$	Koeffisient for lineærekspanjon	$^{\circ}C^{-1}$
$\beta$	Koeffisient for volum ekspansjon	$^{\circ}C^{-1}$
$\mu$	Poissons tall	0,3
$k$	k-faktor for strekkklapper	
$R$	Elektrisk motstand	$OHM$
$U$	Elektrisk spenning	$V$
$U_O$	Elektrisk utgangsspenning for strekkklappmålinger	$V$
$U_E$	Elektrisk eksiteringsspenning påsatt strekkklappkobling	$V$

### 4.3 Formler og definisjoner:

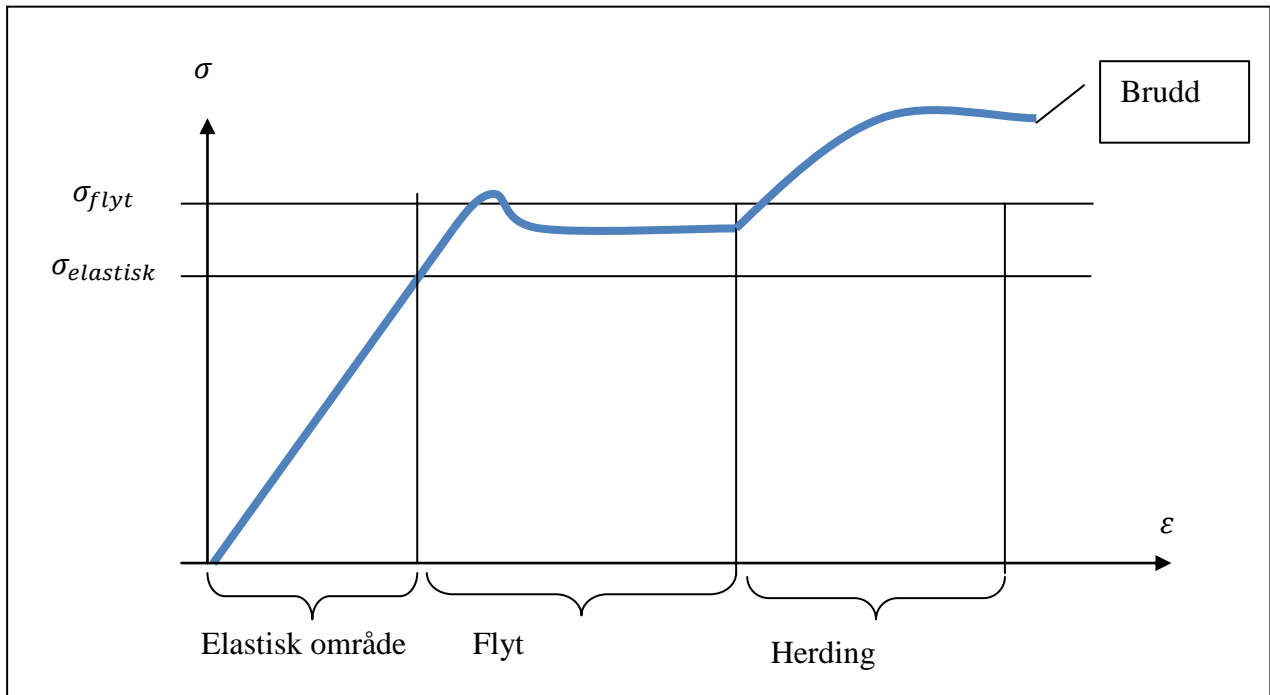
Tabell 4.3 - viktige formler og definisjoner

Størrelse	Forklaring / formel	nummerering
Spenning	Den interne effekten i et materiale, som følge av ytre krefter eller momenter.	
Tøyning	Forholdet mellom endring i forlengelse og den totale lengden $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$	4.1
Hooks lov	$\sigma = E \cdot \varepsilon$	5.1
Tangentialspenning for tynnveggede rør	$\sigma_t = \frac{p_i \cdot r_m}{S_o}$	5.2
Tangentiell spenning for tyggveggede rør	$\sigma_t = \frac{\left[ \left( \frac{r_i}{r_y} \right)^2 + \left( \frac{r_i}{r} \right)^2 \right] \cdot p_i}{1 - \left( \frac{r_i}{r_y} \right)^2}$	5.5
Diameter endring fra temperatur	$D = D_0(1 + \alpha \cdot \Delta T)$	5.32
Volumendring fra tetthet	$V = \frac{V_0 \cdot \rho_0}{\rho}$	5.38
Designspenning	Høyeste tillatte spenning i forhold til standard. $f = \min \left\{ \frac{R_{eHt}}{1,5}, \frac{R_{p0,2t}}{1,5}; \frac{R_m}{2,4} \right\}$	5.39
Koeffisient for volumekspansjon for Austenitt	$\beta = 15,13 + 7,93 \cdot 10^{-3} \cdot T - 3,33 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$	5.40
Koeffisient for volumekspansjon for Karbonstål	$\beta = 15,13 + 7,93 \cdot 10^{-3} \cdot T - 3,33 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$	5.41
Broformelen for strekkklapper	$\frac{U_o}{U_E} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$	6.5
Halvbroformelsen	$\frac{U_o}{U_E} = \frac{k}{4} (1 + \mu) \varepsilon_F$	6.12
Halvbroformelen for spenning	$\frac{U_o \cdot E}{3V \cdot 0,68575} = \sigma$	6.14

## 5. Teoretisk grunnlag

I dette kapittelet gis det en oversikt over teori som danner grunnlaget for beregningene utført i denne oppgaven.

### 5.1 Hooks lov



Figur 5.1 forholdet mellom spenning og forlengelse [2\)](#)

Hooks lov gjelder i det elastiske området. Innen dette området er forholdet mellom spenningen og forlengelsen lineært. Siden materialet forholder seg elastisk, vil legemet alltid gå tilbake til sin opprinnelige form når spenningen avtar. [2\)](#)

Dersom spenningene overstiger den elastiske grensa, vil det bli permanent deformasjon, og materialet vil ikke gå tilbake til den opprinnelige formen når spenningen avtar. Dersom belastes over flytspenningen, vil materialet flyte, og det forlenges uten at spenningen øker. Ved et visst punkt vil materialet begynne å herde, og spenningen stiger igjen i takt med forlengelsen, frem til det endelig blir brudd i materialet. [2\)](#)

I området der Hooks lov gjelder, er spenningen proporsjonal med tøyningen ganger E-modul:

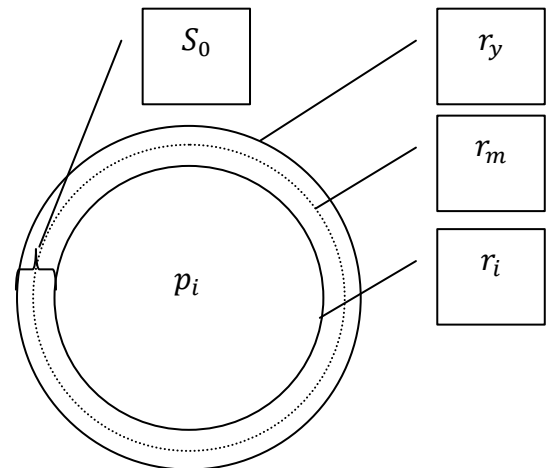
$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

5.1

## 5.2 Spenninger i rør

Teorien for spenninger ( $\sigma$ ) i rørvegger er utledet fra teori om sylindriske legemer utsatt for indre trykk.

Faktorene som inngår er det indre trykket ( $p_i$ ), middelradius ( $r_m$ ), og veggtykkelse ( $S_0$ ), for tynnveggede sylindere. For tykkveggede sylindere benyttes indre radius ( $r_i$ ), og ytre radius ( $r_y$ ).



figur 5.2 radier og veggtykkelser

### 5.2.1 Tynnvegget teori

Tynnvegget teori benyttes der  $\frac{S_0}{r_m} \leq \frac{1}{10}$

Sylinderen ses på som et tynt skall, og det ses bort i fra spenninger i radiell retning ( $\sigma_r = 0$ ).

En økning i sylinderens diameter/omkrets vil komme av spenninger i tangentiell retning:  $\sigma_t$

Gitt av et indre trykk  $p_i$

$$\sigma_t = \frac{p_i \cdot r_m}{S_0} \quad 5.2$$

Dersom det opptrer en strekkraft i aksialretning kan får vi aksialspenninger  $\sigma_a$  gitt ved:

$$\sigma_a = \frac{p_i \cdot r_m}{2 \cdot S_0} \quad 5.3$$

Dette gjelder for en lukket beholder, der det også oppstår en kraft på endelokkene, som vil strekke sylinderen i aksial retning. Legg merke til at den aksielle spenningen vil være halvparten av den tangentielle.

### 5.2.2 Tykkvegget teori

Tykkvegget teori benyttes når  $\frac{S_0}{r_m} \geq \frac{1}{10}$

Spenningene i veggen i radiell, og tangentiell retning, vil være størst innerst, og avta utover i tykkelsen.

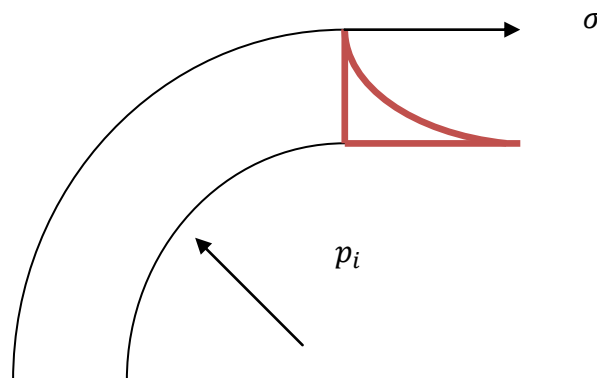
For å finne spenningene i et gitt punkt, settes  $r$  inn i formelene under ( $r_i \leq r \leq r_y$ )

**Spenninger i radiell retning:**

$$\sigma_r = \frac{\left[\left(\frac{r_i}{r_y}\right)^2 - \left(\frac{r_i}{r}\right)^2\right] \cdot p_i}{1 - \left(\frac{r_i}{r_y}\right)^2} \quad 5.4$$

**Spenninger i tangentiell retning:**

$$\sigma_t = \frac{\left[\left(\frac{r_i}{r_y}\right)^2 + \left(\frac{r_i}{r}\right)^2\right] \cdot p_i}{1 - \left(\frac{r_i}{r_y}\right)^2} \quad 5.5$$



Figur 5.3 spenningsfordeling itykkvegget rørvegg 3)

Spenningen i aksial retning i vegg er kun påvirket av kraften i aksial retning, og endrer seg ikke gjennom vegg. 3)

$$\sigma_a = \frac{\left[\left(\frac{r_i}{r_y}\right)^2\right] \cdot p_i}{1 - \left(\frac{r_i}{r_y}\right)^2} \quad 5.6$$

## 5.3 Tøyning i rør

**Tynnvegget teori:**

**Radiell tøyning (endring i vegtykkelse):**

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta S}{S} = \frac{S-S_0}{S} = \frac{-\mu}{E} (\sigma_t + \sigma_a) \quad 5.7$$

**Tangentiell tøyning:**

$$\varepsilon_t = \frac{\text{\textit{Økning i omkrets}}}{\text{\textit{Opprinnelig omkrets}}} = \frac{2\pi(r+\Delta r)-2\pi r}{2\pi r} = \frac{\Delta r}{r} = \frac{1}{E} (\sigma_t - \mu \cdot \sigma_a) \quad 5.8$$

**Endring av diameter:**

$$\Delta D = 2 \cdot r \cdot \varepsilon_t = D_0 \cdot \varepsilon_t \quad \underline{2)} \quad 5.9$$

**Aksial tøyning:**

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} (\sigma_a - \mu \cdot \sigma_t) \quad \underline{3)} \quad 5.10$$

**Volumtøyning:**

$$\frac{\Delta V}{V_0} = 2 \cdot \varepsilon_t + \varepsilon_a \quad \underline{2)} \quad 5.11$$

**Tykkvegget teori:**

Samme fremgangsmåte som for tynnvegget sylinder, men vi må ta med spenninger i radiell retning.

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta S}{S} = \frac{S-S_0}{S} = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_t + \sigma_a)] \quad \underline{3)} \quad 5.12$$

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta r}{r} = \frac{r-r_0}{r} = \frac{1}{E} [\sigma_t - \mu(\sigma_r + \sigma_a)] \quad \underline{3)} \quad 5.13$$

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta l}{l} = \frac{l-l_0}{l} = \frac{1}{E} [\sigma_a - \mu(\sigma_t + \sigma_r)] \quad \underline{3)} \quad 5.14$$

### 5.3.1 Volumekspansjon av sylinder

Vannet i rørene kan ses som en sylinder. Når vannet fryser vil dette utvide seg; volumet endres. En geometrisk betraktning av endringen i høyden på vannsøylen i røret vil derfor si noe om hvor stor den radielle ekspansjonen er.

**Volum sylinder:**

$$\pi \cdot r^2 \cdot l = V \quad \text{4)} \quad 5.15$$

$$\rightarrow V = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L \quad 5.16$$

ekspansjon gitt ved faktor  $e$ , som er en funksjon av trykk og temperatur.

$$V = V_0 \cdot e \quad 5.17$$

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L \quad 5.18$$

**Ytterpunkter:**

For at volumet skal endres, må sylindere ekspandere i radiell og/eller aksiell retning. Det er ikke i hvor stor grad isen vil ekspandere fritt i aksiell retning når den vannet begynner å fryse, før det oppstår noen motstand som kan føre til trykk. En betraktning av hvor stor den aksielle ekspansjonen er, vil kunne si noe om hvor stor den radielle ekspansjonen er, gitt at vi vet den totale volumendringen.

Vi har to ytterpunkter:

Dersom isen får utvide seg fritt i aksiell retning, og ikke endre diameter, vil volumendringen kun føre til en økt lengde av isen, uten at røret påvirkes:

$$V = e \cdot V_0 = \frac{\pi}{4} \cdot D_0^2 \cdot L \quad 5.19$$

Den nye høyden vil da være gitt ved:

$$L = \frac{e \cdot V}{\frac{\pi}{4} \cdot d^2} = e \cdot L_0 \quad 5.20$$

Altså øker lengden ( $L$ ) med den samme faktoren ( $e$ ) som volumet øker med.

Det andre ytterpunktet vil være der det ikke er noen ekspansjon i aksiell retning, volumet kun endres ved at diameteren øker:

$$V = e \cdot V_0 = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L_0 \quad 5.21$$

Diameteren vil da være gitt ved løse 5.21 med hensyn på  $D$ :

$$D = \sqrt{\frac{e \cdot V_0}{\frac{\pi}{4} \cdot L_0}} = \sqrt{e \cdot D_0^2} = \sqrt{e} \cdot D_0 \quad 5.22$$

Altså vil en endring i Volumet med en faktor  $e$ , gi en endring i diameteren på  $\sqrt{e}$

Dersom vi kjenner den aksielle utvidelsen av sylindere, og forutsetter en ekspansjonsfaktor for volumet av sylindere, kan dette benyttes for å estimere den radielle ekspansjonen. Dette kan gjøres ved å sammenligne differansen mellom den forventede volumekspansjonen, og den beregnede ekspansjonen gitt endringen i lengden til sylindere.

### Volum av en torus :

En torus er et smultringformet legeme. dette kan dannes ved å dreie et sirkulært areal med radius  $r$  om et punkt med en avstand  $r_b$  fra arealets senter. Volumet er da gitt ved:

$$V = 4\pi^2 \cdot r \cdot r_b \quad 4) \quad 5.23$$

For et 90° rørbend, kan dette modelleres som en kvart torus:

$$V_{bend} = \pi^2 \cdot r \cdot r_b \quad 5.24$$

Siden det er det indre trykket som vil være drivende for ekspansjonen, kan vi forenklet si at  $r_b$  og vinkelen forblir uendret, og det er endringen i  $r$  som gir endring i volum for bendedet. Derved vil en økning i radien være proporsjonal med økningen i volum:

$$V_{bend} = V_{bend,0} \cdot e = \pi^2 \cdot r_0 \cdot r_b \cdot e \quad 5.25$$

### 5.3.2 Temperaturpåvirkning på rørene

Når temperaturen til et legeme endres, vil det ekspandere. Et legeme vil ved en gitt temperatur  $T_0$ , ha en gitt lengde  $L_0$ . Når temperaturen endres med  $\Delta T$ , vil den relative endringen i lengde  $\frac{\Delta L}{L_0}$  være proporsjonal med  $\Delta T$  5):

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \cdot \Delta T \quad 5) \quad 5.26$$



Der  $\alpha$  er koeffisienten til den lineære ekspansjonen. Den lineære ekspansjonskoeffisienten er definert som en tredjedel av koeffisienten for volumekspansjon,  $\beta$ : [5\)](#)

$$\alpha = \frac{\beta}{3} \quad \text{5)} \quad 5.27$$

Stålrørene i forsøket kan forenklet modelleres som et tynt skall. Siden et tynt skall ikke har noen tykkelse, kan omkretsen gjøres om til en linje. Derved kan vi finne den nye lengden etter ekspansjonen ved: [5\)](#)

$$L = L_0 + \Delta L \quad \text{5)} \quad 5.28$$

Setter vi inn for  $\Delta L$  får vi:

$$L = L_0 + \alpha \cdot \Delta T \cdot L_0 \quad 5.29$$

$$\rightarrow L = L_0(1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad 5.30$$

Siden omkretsen av en sirkel er gitt ved  $O = D \cdot \pi$ , kan vi på samme måte beregne diameteren for rørene etter en temperaturendring:

$$D = \frac{L}{\pi} = \frac{L_0(1 + \alpha \cdot \Delta T)}{\pi} \quad 5.31$$

$$\rightarrow D = D_0(1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad 5.32$$

$$\rightarrow \frac{\Delta D}{D_0} = \alpha \cdot \Delta T \quad 5.33$$

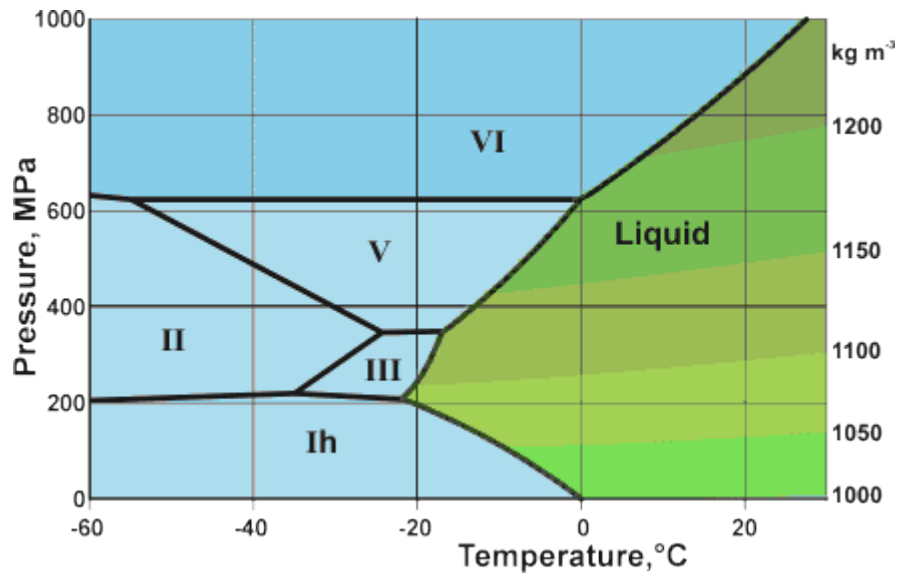
## 5.4 Egenskaper for vann og is

I forsøkene er det ekspansjonen av vann ved overgang fra veske til fast form (is), som fører til påkjenning på rørene. Som veske har vann høyest tetthet ved 4°C, for så å synke igjen ved 0°C.

Tabell 5.1 tetthet for vann

Temp. °C	25	22	20	10	4	0
Tetthet $\frac{kg}{m^3}$	997.0479	997.7735	998.2071	999.7026	999.9720	999.8395

6)



Figur 5.4 Fasediagram

Is kan opptre i forskjellige faser, avhengig av trykk og temperatur. Den vanligste formen for is er I<sub>h</sub>, eller is-en-h. Dette er den formen all naturlig is har på jorden, og er stabil mellom 0°C og -200°C, og opp til 200MPa.

Is I<sub>h</sub> har en tetthet på  $917 kg/m^3$  ved 0°C, og endrer med temperatur:

$$\rho_{Ih} = 917 - 0,13 * \Delta T \quad 5.34$$

Ved -18°C blir altså tettheten:

$$\rho_{Ih_{-18}} = 917 - 0,13 * (-18) = 919,34 kg/m^3 \quad 5.35$$

Forholdet mellom volum, masse og tetthet er konstant, og gitt ved:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad 5.36$$

Ved en gitt temperatur, vil massen være gitt av volumet  $V_0$ , og tilsvarende tetthet  $\rho_0$ :

$$m = V_0 * \rho_0 \quad 5.37$$

Når temperaturen endres, vil tettheten og volumet også endres, mens massen forblir konstant. Det nye volumet kan regnes ut i fra det opprinnelige volumet:

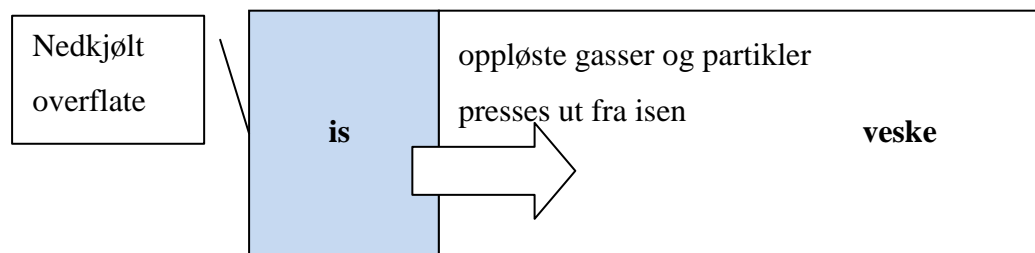
$$V = \frac{V_0 \cdot \rho_0}{\rho} \quad 5.38$$

### Fryseprosessen.

Når vannet når 0°C vil det starte å fryse. Dette vil skje fra den overflaten som er kaldest, og det vil dannes en front der isen vokser fra. Faseovergangen fra veske til fast stoff krever energi.

Temperaturen til den omliggende vesken vil derfor tendere til å holde temperaturen rundt frysepunktet. □

Gasser og urenheter er ikke lett løsbare i isstrukturen. Når vannet starter å fryse, vil derfor oppløste gasser og andre partikler i vannet skyves ut fra isfronten der krystallstrukturen ikke er ferdig, og helt ut i vesken. □



Figur 5.5 ekspansjon av is

I de fleste tilfeller vil legemet med vann være nedkjølt fra flere sider, og det vil dannes is fra ytterkantene og innover. Dette fører til at urenheterne blir fanget inne i isen. Et eksempel er isbiter i fryseren. Disse fryser fra ytterkantene og innover, og vil derfor være klare i ytterkant, mens kjernen er hvit på grunn av luftbobler som fanges.

Til sammenligning vil istapper være helt klare, da disse vokser utover, og den oppløste gassen slippes fritt ut i omgivelsene. □.5)

## 5.5 Materialdata

Ifølge standarden NS-EN13480-3:2012, skal det for stål brukt ved lave temperaturer (i.e. mindre enn -10°C), benyttes designspenninger for romtemperatur.

$$f = \min \left\{ \frac{R_{eH} t}{1,5}, \frac{R_{p0,2} t}{1,5}; \frac{R_m}{2,4} \right\} \quad \text{D} \quad 5.39$$

Her er  $R_{eH}$  Den minste spesifiserte flytegrensen for materialet.  $R_{p0,2}$  er den minste 0,2% styrken til materialet, og  $R_m$  er bruddspenningen. [D](#)

Standarden sier at for temperaturer mellom 0°C og 20°C, kan E-modul for 20°C benyttes. Det oppgis i derimot ingen verdier for temperaturer under 0°C. I denne oppgaven benyttes derfor verdier for E-modul ved 20°C, da dette står i tråd med reglene for designspenning. [D](#)

Aktuelle materialer:

**Austenittisk stål 1.4307:** [D](#)

Klasse: 8.1, Austenittisk stål med Cr mindre eller lik 19%  
 E: 201 660 MPa  
 $R_{p0,2}$  : 180 MPa  
 $R_m$  : 460 MPa side 19, Table 6

Designspenning finner vi etter ligning 5.39:

$$f_{1.4307} = \min \left\{ \frac{180}{1,5}; \frac{460}{2,4} \right\} = \frac{180}{1,5} = 120 \text{ MPa}$$

Koeffisienten for volumekspansjon er definert ved: [D](#)

$$\beta = 15,13 + 7,93 \cdot 10^{-3} \cdot T - 3,33 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad 5.40$$

**Karbonstål P235GH:** [D, D\)](#)

Klasse 1.1 , Stål med flytgrense under 275 MPa  
 E: 213 160 MPa  
 $R_{eH}$  : 235MPa  
 $R_m$  : 360MPa

Designspenning (ligning 5.39):

$$f_{P235GH} = \min\left\{\frac{235}{1,5}; \frac{360}{2,4}\right\} = \frac{360}{2,4} = 150MPa$$

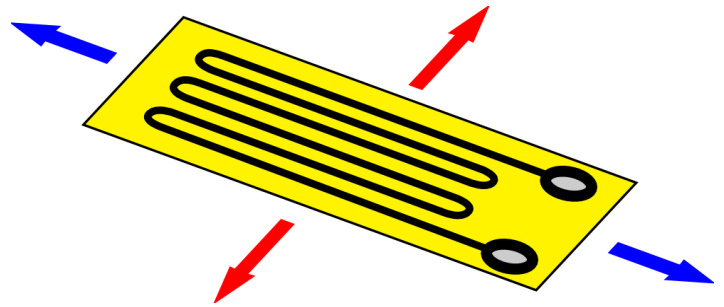
Koeffisienten for volumekspansjon er definert ved:  $\beta$

$$\beta = 11,14 + 8,03 \cdot 10^{-3} \cdot T - 4,29 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad 5.41$$

## 6 Forsøks og måleteknikk

Strekkklapper benyttes for å måle ekspansjonen i et gitt punkt. Disse består av en lapp med en tynn leder som limes fast til testobjektet. Underlaget som limes til overflaten er bestått av et fleksibelt, isolerende materiale, som holder lederen fast til, og elektrisk isolert fra testobjektet. Lederen er viklet slik at den har flere parallelle strekk i måleretningen. <sup>2)</sup>

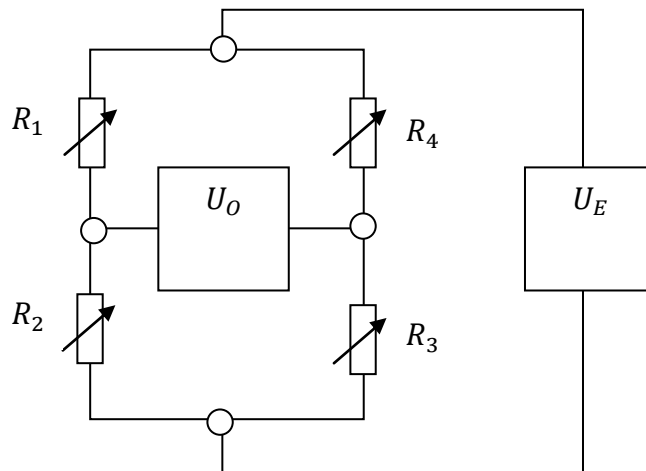
Når testobjektet deformeres, deformeres også strekkklappen. Dette fører igjen til at den elektriske motstanden til lederen endres. Når lappen presses sammen, øker arealet til lederen, og den elektriske motstanden reduseres. Når lappen strekkes, reduseres lederens areal, og den elektriske motstanden øker. Den relative motstandsendringen er proporsjonal med tøyningen:



Figur 6.1 tegning av strekkklapp.  
Blå piler i måleretning

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad \supset \quad 6.1$$

Der  $k$  er  $k$ -faktoren som beskriver følsomheten for strekkklappen. Når lappen strekkes i måleretningen (blå piler på figur 6.1), vil den få en tverrkontraksjon (rød retning på figur 6.1). Dette er tatt høyde for i  $k$ -faktoren. <sup>2)</sup>



Figur 6.2 Wheatstones-bro. <sup>2)</sup>

Spenningsfallet over lappen som følge av motstandsendringen er svært liten. For å måle denne kobles derfor strekkappen(e) opp i en Wheatstones-bro. Denne består av fire motstander,  $R_1 - R_4$ , som vist på 6.2. 2)

En spenning  $U_E$  påsettes, og utgangsspenningen  $U_O$  måles. Når alle motstandene er like, vil utgangsspenningen være 0V, og broa er i balanse. Forholdet mellom utgangsspenningen og eksiteringsspenningen er gitt ved: 2)

$$\frac{U_O}{U_E} = \frac{R_1}{R_1+R_2} - \frac{R_4}{R_3+R_4} \quad \text{2)} \quad 6.2$$

Når motstandene endres får vi:

$$\frac{U_O}{U_E} = \frac{R_1+\Delta R_1}{R_1+\Delta R_1+R_2+\Delta R_2} - \frac{R_4+\Delta R_4}{R_3+\Delta R_3+R_4+\Delta R_4} \quad \text{2)} \quad 6.3$$

Strekkapper kobles parvis, slik at  $R_1 = R_2$  og  $R_3 = R_4$ . I tillegg er motstandsendringene  $\Delta R$  mye mindre enn selve motstandene  $R$ . Dette gjør at vi kan forenkle på følgende måte:

$$\frac{U_O}{U_E} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad \text{2)} \quad 6.4$$

Innsatt formelen for den relative motstandsendringen, får vi broformelen, som er grunnlaget strekkappberegninger:

$$\frac{U_O}{U_E} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad \text{2)} \quad 6.5$$

Hver tøyning består av to ledd. Tøyning fra en kraft  $F$ , og tilsynelatende tøyning på grunn av en temperaturendring  $T$ .

$$\varepsilon = \varepsilon_F + \varepsilon_T \quad \text{2)} \quad 6.6$$

NB!  $\varepsilon_T$  representerer ikke en reel tøyning, men en endring i ledeevnen til strekkappen.

Dersom strekkappen er påsatt  $90^\circ$  på kraftretningen, påvirkes den i stede av tverrkontraksjonen med faktoren Poissons tall  $\mu$ :

$$\varepsilon_{90^\circ} = -\mu \cdot \varepsilon_F + \varepsilon_T \quad \text{2)} \quad 6.7$$

Siden man vanligvis er interessert i å finne tøyningen gitt av strekpåkjenningen, og ikke temperaturen, er det vanelig å utnytte fortegnene i broformelen slik at denne elimineres. Dette kan gjøres ved å koble streklappene parvis i brokoblingen. Dette gjør at temperaturleddet elimineres:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = (\varepsilon_F + \varepsilon_T) - (\varepsilon_F + \varepsilon_T) \quad \underline{2)} \quad 6.8$$

For å unngå at også  $\varepsilon_F$ -leddet elimineres, kan den andre streklappen monteres løst, slik at den ikke påvirkes av kraften  $F$ :

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = (\varepsilon_F + \varepsilon_T) - (0 + \varepsilon_T) \quad 6.9$$

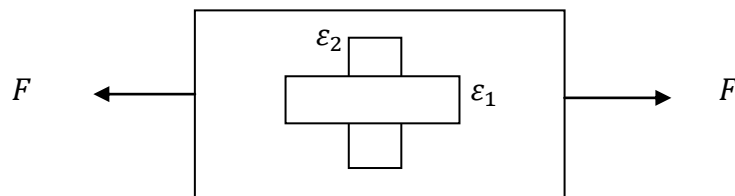
Eller den andre streklappen i paret kan monteres normalt på kraftretningen (figur 6.3), slik at den i stede blir påvirket av tverrkontraksjonen:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = (\varepsilon_F + \varepsilon_T) - (-\mu \cdot \varepsilon_F + \varepsilon_T) \quad 6.10$$

$$\rightarrow \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = (1 + \mu)\varepsilon_F \quad 6.11$$

Dette er gunstig, da vi vil få en større forsterkning på målingene. Det samme prinsippet gjelder for det andre paret i broen,  $\varepsilon_2$  og  $\varepsilon_4$ .

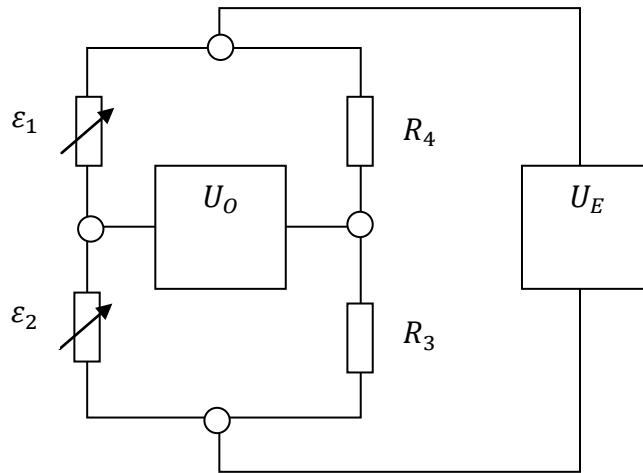
I forsøkene som er utført i denne rapporten, er streklappene koblet i en halvbro. Der  $\varepsilon_1$  er montert i kraftretningen, og  $\varepsilon_2$  er montert normalt på kraftretningen som vist på figuren under:



Figur 6.3 streklapper i og normalt på kraftretningen

Videre er måleforsterkeren satt opp som en halvbro. Det gjør at den benytter to faste motstander i det andre paret. Måleforsterkeren kalibreres slik at utgangspenningen viser 0V når testobjektet ikke er påkjent. Oppkoblingen er vist i figuren 6.4 under:





Figur 6.4 halvbrokobling

Internt er nå de to faste motstandene  $R_3$  og  $R_4$  like store. De to aktive strekkklappene  $\varepsilon_1$  og  $\varepsilon_2$  er koblet  $90^\circ$  på hverandre. Når vi setter inn for dette i broformelen, får vi en formel for den aktuelle oppkoblingen:

$$\frac{U_O}{U_E} = \frac{k}{4} (1 + \mu) \varepsilon_F \quad \text{2)} \quad 6.12$$

I forsøkene er det benyttet strekkklapper av modell 1-LY43-6/120 fra HBM. Disse har følgende data:

Motstand:  $120\text{OHM} \pm 0,3\%$

k-faktor:  $2,11 \pm 1,0\%$

Målebroen påsetter en eksiteringsspenning på 3V. Setter vi inn Hooks lov, og verdiene for k-faktoren, eksiteringsspenningen og Poissons tall i halvbroformelen, får vi:

$$\begin{aligned} \sigma &= \varepsilon \cdot E \\ \rightarrow \varepsilon &= \frac{\sigma}{E} \end{aligned}$$

$$\frac{U_O}{3V} = \frac{2,11}{4} (1 + 0,3) \frac{\sigma}{E} \quad \text{2)} \quad 6.13$$

Løser vi for strekkspenningen får vi en formel for halvbrokoblingen:

$$\frac{U_O \cdot E}{3V \cdot 0,68575} = \sigma \quad \text{2)} \quad 6.14$$

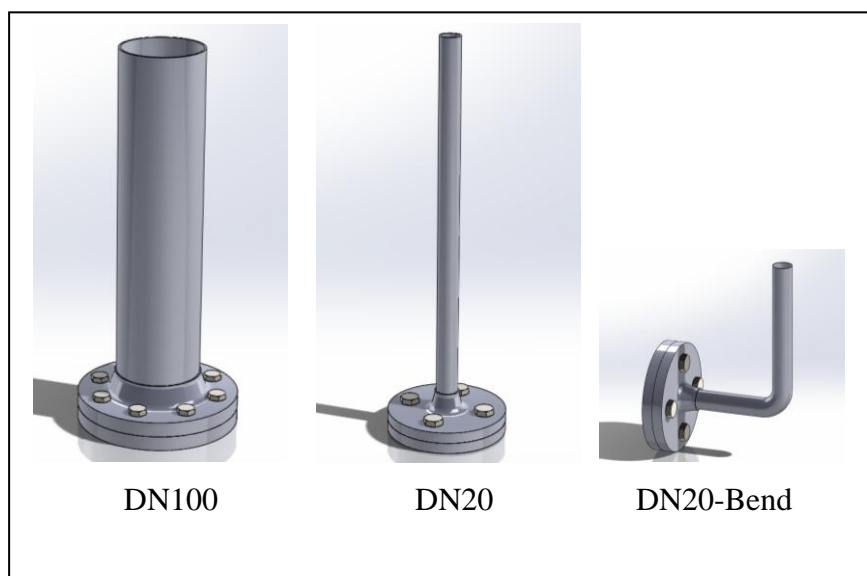
## 7. Gjennomføring av forsøk

### 7.1 Testobjekter

Under forsøkene skal ekspansjonen måles for et utvalg rørdeler. Rørene kommer i to diametre: DN20 (26,9mm), og DN100 (114,3mm). De aktuelle rørene består av rette rør med DN100 og DN20, og rør med 90° bend ca. midt på rørets lengde. Radius for senter av bendene er  $r_b = 29,0\text{mm}$ . Alle rørene har en sveiseflens i enden. Det er skrudd fast en blindflens på flensen, slik at røret er lukket og tett i bunnen. Øvre del av rørene er åpne. Del 1 og 2, har lengdene 150mm fra bunnen av flensen og frem til midten av bendet, og 200mm fra midten av bendet og opp til toppen. Del 3 og 4 ble levert i to lengder: 150mm og 500mm. Del 5 og 6 i 200mm og 500mm. Se vedlegg C for teknisk tegning fra COWI. På grunn av tidsbegrensninger ble de kortere rørene ikke tatt med i forsøkene, da risikoen for frostsprenning i disse ble ansett som lavere enn for de lengre rørene.

Tabell 7.1 deler produsert for testing:

Del	Betegnelse	$D_o$	$S_o$	$r_m$	Materiale	$r_i$	$r_y$
1	DN20 – Bend	26,9	2,3	12,3	P235GH	11,15	13,45
2	DN20 – Bend	26,9	2,0	12,45	1.4307	11,45	13,45
3	DN20 – Rett	26,9	2,3	12,3	P235GH	11,15	13,45
4	DN20 – Rett	26,9	2,0	12,45	1.4307	11,45	13,45
5	DN100 – Rett	114,3	3,6	55,35	P235GH	53,55	57,15
6	DN100 – Rett	114,3	2,6	55,85	1.4307	54,55	57,15



Figur 7.1 3D modell av rørene

## 7.2 Betraktning av fryseprosess

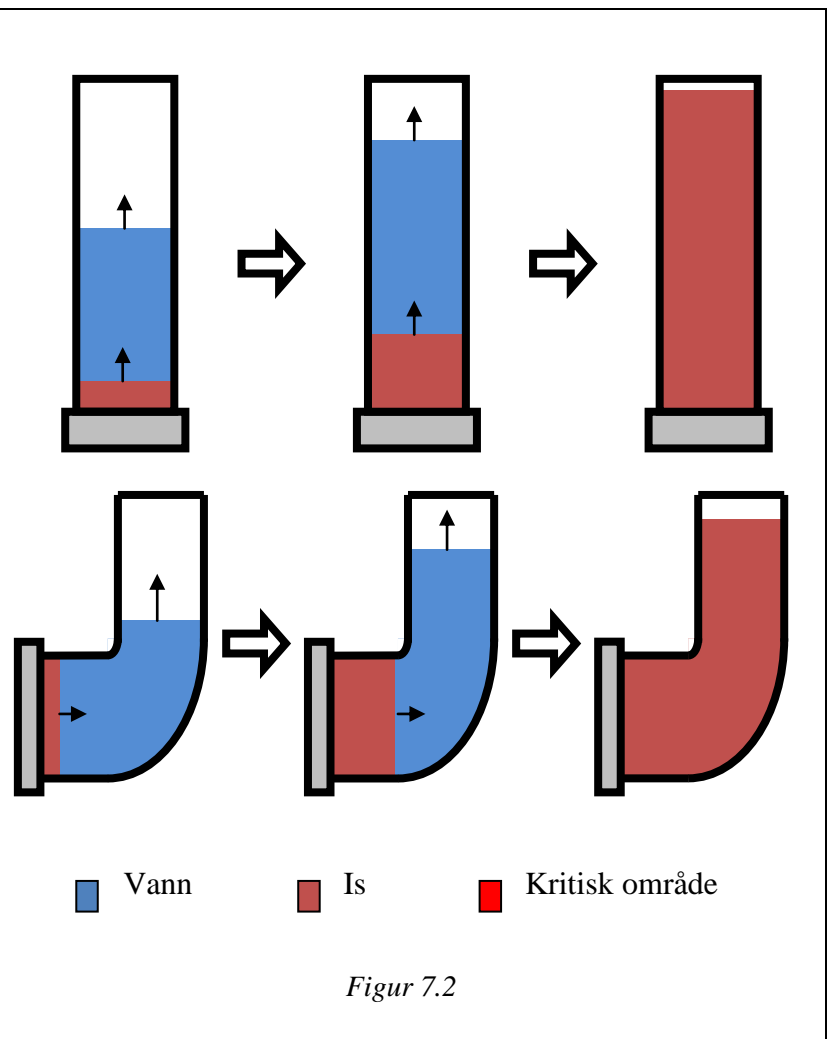
De eventuelle påkjenningene på rørene vil komme når vannet fryser og ekspanderer. Hvordan isen utvikler seg vil være avgjørende for hvor påkjenningene oppstår. Siden røret er åpent i toppen, vil isen presse vannet bort, og ekspansjonen av isen føre til at vannstanden i rørene stiger. For at trykket i røret skal øke, må det oppstå en isplugg, slik at vannet ikke lenger kan ekspandere fritt oppover. Dette skjer når alt vannet i et tverrsnitt langs røret er helt frosset. Dersom vi forutsetter at denne ispluggen blir holdt på plass av friksjon, vil det da kunne oppstå et kritisk område, der trykket øker når det resterende vannet fryser. Da isen vil kunne glippe oppover dersom trykket i aksial retning blir stor, antas det i denne oppgaven at spenningen i aksial retning er neglisjerbar.

Hvor vannet fryser først, og hvordan isen utvikler seg frem til alt vannet har gått over til is er derfor avgjørende for hvor trykket oppstår, og hvor stort det blir. Det finnes en rekke muligheter:

### I: Vannet fryser ved flensen, og isen vokser oppover:

I en tenkt situasjon der isen oppstår nærmest flensen, og vokser der i fra langs røret. Når isen ekspanderer presses vannet oppover, og vannstanden stiger. Se figur 7.2.

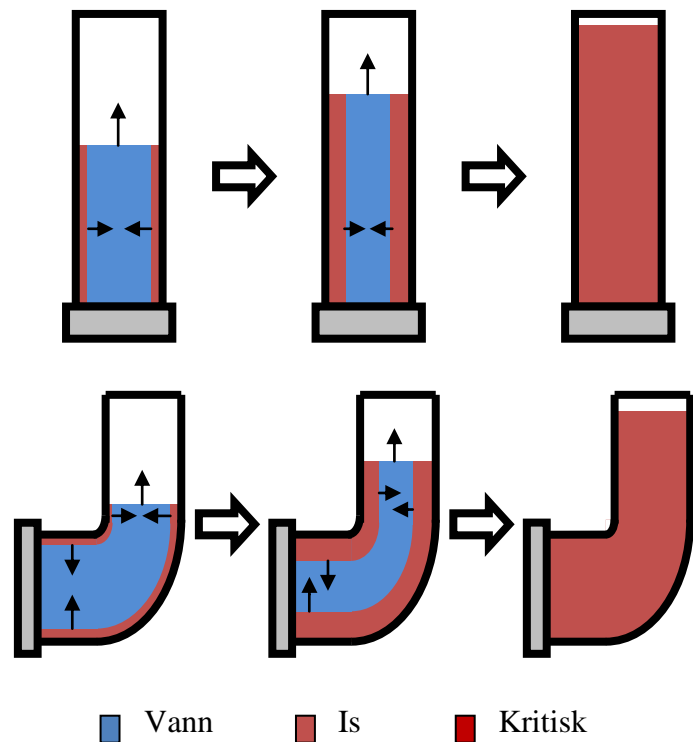
For at denne situasjonen skal oppstå, må rørveggene, og toppen av røret være isolert mot omgivelsene, mens flensen står fritt. Den nedkjølte flaten ved flensen vil da kunne få vannet til å fryse der først, og isen vil vokse fra dette punktet. Ekspansjonen fører til at vannet presses oppover i røret, og vannstanden øker frem til hele røret er fylt av is. Siden ekspansjonen kun foregår i rørets aksiale retning, er det ingen motstand, og det oppstår ikke noe kritisk punkt.



**II: Vannet ved rørveggen fryser, og isen vokser innover:**

En annen tenkt situasjon der det ikke oppstår noe kritisk område, vil være der isen oppstår ved rørveggen, og vokser innover mot midten. Dersom isen vokser like fort innover langs hele røre vil det alltid være en åpning i midten, der vannet kan ekspandere fritt oppover.

Denne situasjonen krever at selve røret kjøles ned, mens flensen, og overkanten av røret holdes isolert. I tillegg må isen ikke ekspandere raskere i overkant av røret slik at det oppstår en isplugg.

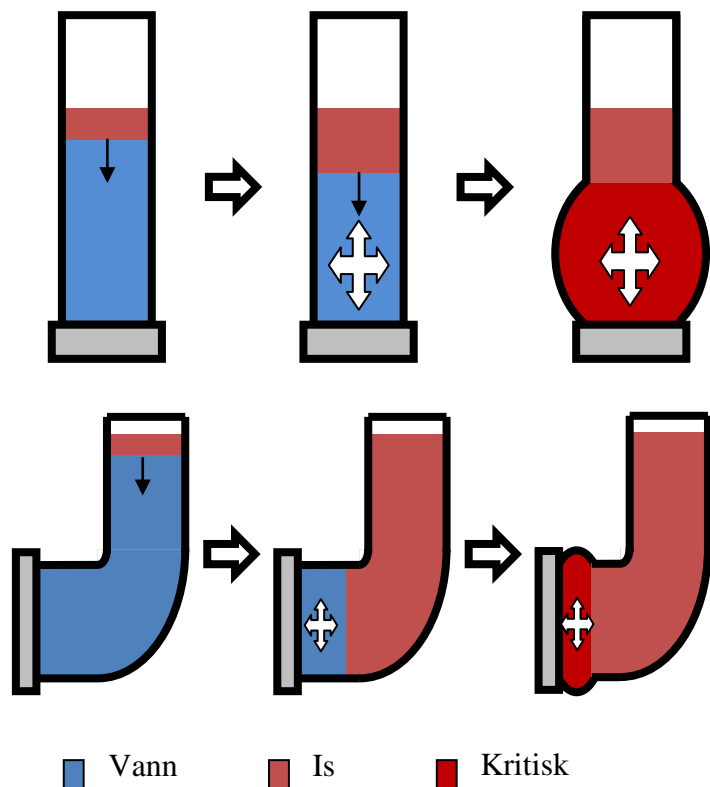


Figur 7.3

**III: Vannet fryser fra toppen, og det oppstår en isplugg:**

Den lettest tenkelige måten det kan oppstå en isplugg på, er der vannet fryser fra toppen. Når vannet fryser øverst vil ikke lenger vannet kunne ekspandere fritt oppover, og trykket vil øke etter som isen ekspanderer nedover. Når den resterende vesken fryser, oppstår det et kritisk punkt nederst i røret, der ekspansjonen som følge av overgangen fra vann til is fører til stort trykk på røret.

Denne situasjonen krever av røret og flensen er isolert mot omgivelsene, og at nedkjølingen kommer fra toppen av røret, ved hovedledningen.

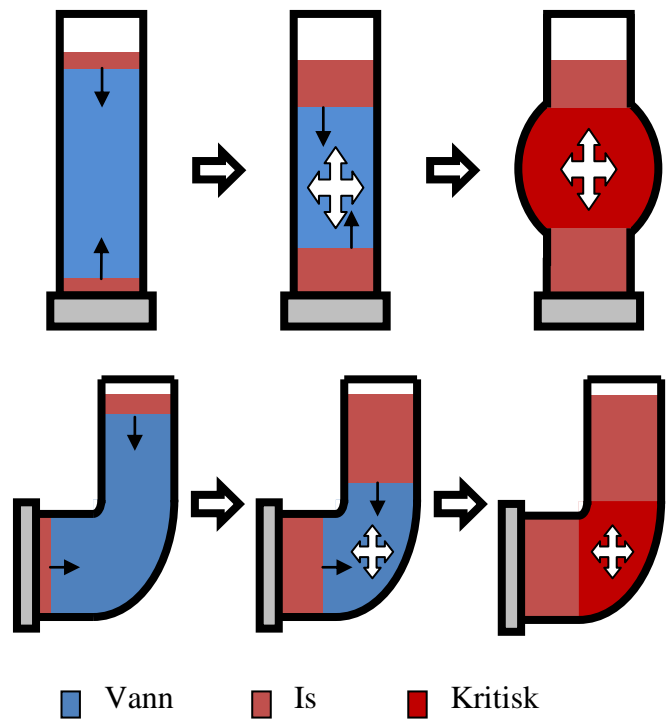


Figur 7.4

**IV: Vannet fryser fra topp og bunn samtidig, kombinasjon av I og III:**

I denne situasjonen dannes det en isplugg i toppen av røret, slik som i situasjon III. Samtidig fryser også vannet fra bunnen slik som i situasjon I. Isen ekspanderer nedover fra toppen, og oppover fra bunnen, og trykket i vesken øker. Når det resterende vannet fryser, oppstår det et kritisk punkt midt på røret.

For at denne situasjonen skal oppstå, må de kaldeste områdene være ved endene til røret; mot flensen, og ved åpningen til røret. Veggene i røret må være isolert mot omgivelsene, slik at det ikke fryser fra kantene.

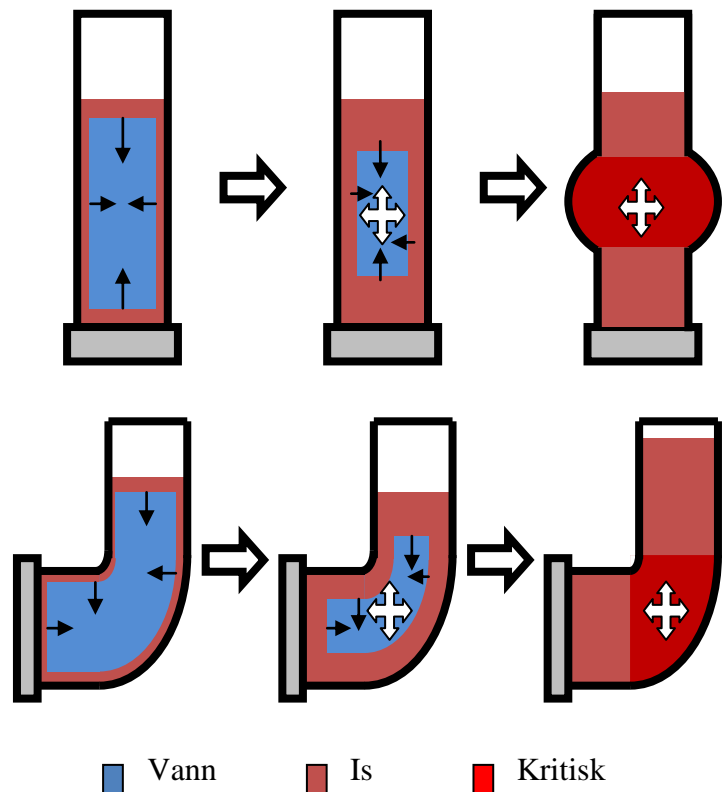


Figur 7.5

**V: Vannet fryser fra alle kanter, kombinasjon av I, II og III:**

Dersom vi kombinerer situasjon I, II og III, har vi en situasjon der isen utvikles fra ytterkantene, og vokser innover. I likhet med situasjon IV oppstår vil trykket i den resterende vesken øke, og vi får et kritisk punkt midt på røret. Forskjellen er at i denne situasjonen vil isen i hver ende av røret vil være forbundet av islaget som oppstår langs rørveggen. Dette gjør at vi får en helt innesluttet vannlomme i det kritiske punktet.

For at denne situasjonen skal oppstå, må røret stå uisolert, slik at vannet kjøles ned fra alle kanter samtidig.

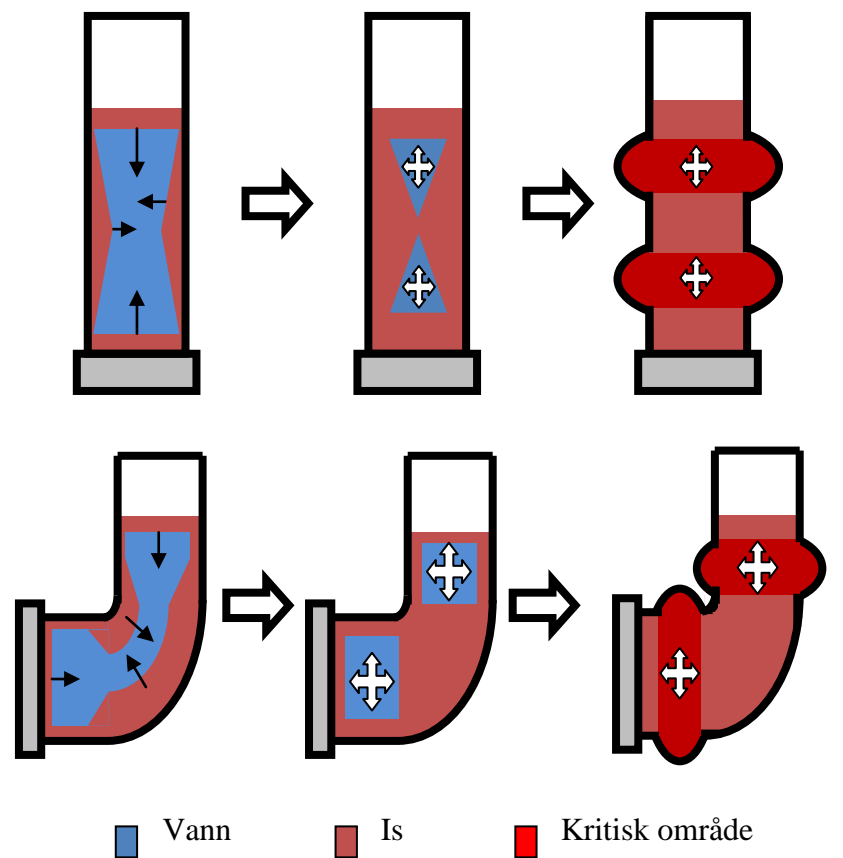


Figur 7.6

**VI: Vannet fryser raskest midt på røret:**

Der rørene skal brukes i den virkelige verden, er de sveiset til en hovedledning i overkant, og det sitter en kuleventil koblet til flensen. Det betyr at det er større masse som skal nedkjøles i endene, før vannet nedkjøles. Dette kan få særlig betydning for de tynne rørene, der forholdet mellom diameteren og lengden er stor. Det kan derfor tenkes at rørveggen lengst i fra endene (i.e. midt på røret) kjøles ned først, og at isen vil vokse raskere fra kantene, enn fra toppen.

Det kan derfor tenkes en situasjon der det oppstår en isplugg også på midten av røret. Dette kan resultere i enten et kritisk punkt, slik som i situasjon V, eller to kritiske punkter som vist i figur 7.7



Figur 7.7

## 7.3 Tidlige beregninger

I dette avsnittet benyttes den grunnleggende teorien for å finne å beregne forventede verdier.

### 7.3.1 Forventet diameterendring fra temperaturendring:

Under forsøkene skal rørene utsettes for en temperatur på  $-18^{\circ}\text{C}$ . Dersom vi forutsetter at den opprinnelige diameteren gjelder ved en romtemperatur på  $20^{\circ}\text{C}$ , kan vi beregne den nye diameteren ut i fra ligning 5.32 for austenittisk stål:

$$D = D_o(1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

$$\Delta T = (-18) - 20 = -38^{\circ}\text{C}$$

Beregner  $\alpha$  for  $-18^{\circ}\text{C}$  for austenittisk stål:

$$\beta = 15,13 + 7,93 \cdot 10^{-3} \cdot -18 - 3,33 \cdot 10^{-6} \cdot -18^2 = 14,9867 \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha = \frac{\beta}{3} = 4,99554 \cdot 10^{-6}$$

Del 2 og 4 har diameter 26,9mm:

$$D_2 = D_4 = 26,9(1 + 4,99554 \cdot 10^{-6} \cdot -38) = 26,8949mm$$

Formelen for relativ tøyning, gjelder også for diameteren

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \leftrightarrow \frac{\Delta D}{D_0} = \varepsilon$$

$$\Delta D = 26,9 - 26,8949 = -0,00511mm$$

Så den relative tøyningen blir:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_4 = \frac{-0,00511}{26,9} = -1,89832 \cdot 10^{-4}$$

Del 6 har diameter 114,3mm:

$$D_6 = 114,3(1 + 4,99557 \cdot 10^{-6} \cdot -38) = 114,2781mm$$

$$\Delta D = 114,3 - 114,2781 = -0,02169mm$$

Den relative tøyningen blir:

$$\varepsilon_6 = \frac{-0,02169}{114,3} = -1,89832 \cdot 10^{-4}$$

### 7.3.2 Forventet målt $U_0$ pr. MPa:

Ved hjelp av likningen for halbrokobling (6.14), kan vi beregne hvor stor  $U_0$  vi kan forvente å måle for en spenningsendring på 1MPa, ved å sette inn  $\sigma = 1$ , og verdien for E-modul:

$$\frac{U_o \cdot E}{3V \cdot 0,68575} = \sigma$$

$$\rightarrow U_o = \frac{1 \cdot 3V \cdot 0,68575}{201660} = 10,2016 \cdot 10^{-6}V = 10,2016\mu V$$

Oppløsningen er da på 10,2016  $\mu V$  pr. MPa.

Diameterendringen pr. MPa er gitt ved:

$$\Delta D = \varepsilon \cdot D_o = \frac{1}{E} \cdot D_o$$

$$\Delta D_{DN20} = \frac{26,9}{201660} = 0,0001334mm \quad \text{og} \quad \Delta D_{DN100} = \frac{114,3}{201660} = 0,0005668mm$$

### 7.3.3 Forventede verdier ved designspenning:

For austenittisk stål er designspenningen beregnet til 120MPa. Ut i fra Hooks lov kan vi derved beregne den tilsvarende relative tøyningen:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

$$\rightarrow \Delta \varepsilon_{max} = \frac{f_{1.4307}}{E_{1.4307}} = \frac{120}{201660} = 5,9506 \cdot 10^{-4}$$

Det betyr at  $U_{O,max}$  blir:

$$\Delta U_{O,max} = \Delta \varepsilon_{max} \cdot 3V \cdot 0,68575 = 5,9506 \cdot 10^{-4} \cdot 3V \cdot 0,68575$$

$$\Delta U_{O,max} = 1224,10 \cdot 10^{-6}V$$

Det betyr at ved en økning i  $U_o$  på 1224,1 $\mu V$ , vil stålet ha nådd designspenningen, dersom vi regner fra original diameter ved romtemperatur. For DN100-rørene, tilsvarer dette en diameterendring på:



$$\Delta D = \varepsilon \cdot D_O = \frac{1224,10 \cdot 10^{-6} V}{3V \cdot 0,68575} \cdot 114,3 = 0,0680 mm$$

$$\rightarrow D_{DN100,max} = 114,3680 mm$$

Siden rørene vil trekke seg sammen når temperaturen senkes, må  $\Delta U_{O,max}$  beregnes fra den laveste, til den høyeste målte verdien. Den høyeste  $U_O$  vi bør måle, vil derfor være:

$$U_{O,max} = \Delta U_{O,max} - |U_{O,min}|$$

Vi kan beregne  $U_{O,min}$  ut ifra den relative tøyningen når rørene trekker seg sammen:

$$U_{O,min} = \varepsilon_{min} \cdot 3V \cdot 0,68575 = -1,91647 \cdot 10^{-4} \cdot 3 \cdot 0,68575 = -394,2658 \cdot 10^{-6} V$$

$$\rightarrow U_{O,max} = 1224,10 \cdot 10^{-6} - 394,2658 \cdot 10^{-6} = 829,8342 \cdot 10^{-6} V$$

Den målte utgangsspenningen bør derfor ikke overskride  $829,8342 \mu V$ .

Dette forutsetter at spenningen gjennom rørveggen er uniform. Det stemmer dersom vi gjør forenklingen ved å se røret som et tynt skall, slik vi gjør i tynnvegget teori.

For DN20-rørene er forholdet mellom diameter og veggtykkelse for stort til at tynnvegget teori kan benyttes:

$$\frac{S_O}{r_m} = \frac{2,0}{12,45} = 0,161 > \frac{1}{10}$$

For tykkvegget teori, er spenningen størst på innsiden av rørveggen, altså når  $r = r_i$ :

$$\sigma_t = \frac{\left[ \left( \frac{r_i}{r_y} \right)^2 + \left( \frac{r_i}{r} \right)^2 \right] \cdot p_i}{1 - \left( \frac{r_i}{r_y} \right)^2}$$

For å finne spenningen ved innsiden av rørveggen, kan vi først estimere trykket  $p_i$  som tilsvarer en spenning på utsiden av rørveggen lik 120MPa. Vi forenkler, og ser bort i fra utvidelse av røret. Ved å sette inn  $r = r_y$ , og  $\sigma_t = 120$ , og løse for  $p_i$  får vi:

$$p_i = \frac{\sigma_{t,ytre} \cdot \left(1 - \left(\frac{r_i}{r_y}\right)^2\right)}{\left[\left(\frac{r_i}{r_y}\right)^2 + \left(\frac{r_i}{r}\right)^2\right]} = p_i = \frac{120 \cdot \left(1 - \left(\frac{11,45}{13,45}\right)^2\right)}{\left[\left(\frac{11,45}{13,45}\right)^2 + \left(\frac{11,45}{13,45}\right)^2\right]} = 22,829MPa$$

Setter vi så inn 22,829MPa for  $p_i$ , og  $r = r_i$ , finner vi spenningen på innsiden av røret:

$$\sigma_{t,indre} = \frac{\left[\left(\frac{11,45}{13,45}\right)^2 + \left(\frac{11,45}{11,45}\right)^2\right] \cdot 22,829}{1 - \left(\frac{11,45}{13,45}\right)^2} = 142,79MPa$$

Spenningen på innsiden av røret blir altså 142,79MPa høyere enn på utsiden. Nummerisk kan vi enkelt finne trykket som vil gi en indre spenning på under 120MPa:

$$p_i = 19,1838 \rightarrow \sigma_{t,indre} = 119,99MPa, \quad \sigma_{t,ytre} = 100,84MPa$$

Den største relative ekspansjonen som måles i ytterkant, er da gitt ved:

$$\Delta\varepsilon_{max} = \frac{100,84}{201660} = 5,00050 \cdot 10^{-4}$$

Og den største målte endringen i utgangsspenning blir:

$$\Delta U_{O,max} = \Delta\varepsilon_{max} \cdot 3V \cdot 0,68575 = 5,00050 \cdot 10^{-4} \cdot 3V \cdot 0,68575 = 1028,73 \cdot 10^{-6}V$$

For DN20-rørene, tilsvarer dette en diameterendring på:

$$\Delta D = \varepsilon \cdot D_o = \frac{1028,73 \cdot 10^{-6}V}{3V \cdot 0,68575} \cdot 26,9 = 0,0135mm$$

$$\rightarrow D_{DN20,max} = 26,9135mm$$

Den største utgangsspenningen, gitt  $U_{O,min} = -394,2658 \cdot 10^{-6}V$  blir:

$$U_{O,max} = \Delta U_{O,max} - |U_{O,min}|$$

$$\rightarrow U_{O,max} = 1028,73 \cdot 10^{-6} - 394,2658 \cdot 10^{-6} = 634,464 \cdot 10^{-6}V$$

Den målte utgangsspenningen for DN20-rørene bør derfor ikke overskride  $634,464\mu V$ .

### 7.3.4 Ekspansjon av is

Det forventes at vannet ekspanderer som følge av endringen i tetthet slik som i formel 5.38. Dersom vi antar en temperaturendring fra  $20^{\circ}C$  til  $-18^{\circ}C$  vil volumet være gitt ved:

$$V = \frac{V_o \cdot \rho_o}{\rho} = V_o \frac{998,2071}{919,34} = V_o \cdot 1,085786651$$

Som tilsvarer en volumutvidelse på ca. 8,579% fra originalvolumet. Dersom vi antar de rette rørene fylles med vann opp med en vannsøyle  $L$ , og vi videre antar at all ekspansjon skjer i aksiell retning (i.e. uten at diameteren endrer seg) vil volumet når vannet fryser være gitt ved:

$$V = \pi \cdot r_i^2 \cdot L \cdot 1,085786651$$

Dersom de rette rørene fylles opp til 50mm fra toppen, og vi antar at diameteren ikke endres, får vi for DN20-rørene:

$$V = \pi \cdot 11,45^2 \cdot 450 \cdot 1,085786651 = 0,00020124m^3$$

Og for DN100-rørene:

$$V = \pi \cdot 54,55^2 \cdot 450 \cdot 1,085786651 = 0,00456769m^3$$

Og den nye høyden på isen vil være:

$$L_{DN20} = L_{DN100} = 450 \cdot 1,085786651 = 488,604mm$$

For DN20-røret med bend regnes volumet lettest ved å dele det i tre deler: fra flensen frem til bendet  $V_h$ , selve bendet  $V_b$ , og fra bendet og vertikalt oppover  $V_v$ . Dersom vi fyller opp røret til 50mm fra toppen, får vi volumet ved:

$$\begin{aligned} V_O &= V_h + V_b + V_v, \\ V_h &= \pi \cdot r_i^2 \cdot L_h = \pi \cdot 11,45^2 \cdot (150 - 29) \\ V_b &= \pi^2 \cdot r_i \cdot r_b = \pi^2 \cdot 11,45 \cdot 29 \\ V_v &= \pi \cdot r_i^2 \cdot L_v = \pi \cdot 11,45^2 \cdot (200 - 29 - 50) \end{aligned}$$

Der  $L_v$  er avstanden fra bendet og opp til vannflaten.

$$V = \pi \cdot 11,45^2 \cdot 121 + \pi^2 \cdot 29 \cdot 11,45 + \pi \cdot 11,45^2 \cdot 121 = 0,00010295m^3$$

Etter volumekspansjonen får vil volumet endres til:

$$V = 0,00011178 * 1,085786651 = 0,00011178$$

Vi finner den nye høyden  $L_v$  blir:

$$L_v = \frac{0,00011178 - \pi \cdot 11,45^2 \cdot 121 - \pi^2 \cdot 11,45 \cdot 29}{\pi \cdot 11,45^2} = 142,443$$

Dersom vi på samme måte forutsetter at all ekspansjon skjer i aksial retning, og samtidig antar at de indre radiene reduseres på grunn av nedkjøling, til verdiene i avsnitt 7.3.1, får vi følgende høyder for vannsøylene ved å erstatte  $r_i$ :

$$\begin{aligned} L_v &= 142,562 \\ L_{DN20} &= 488,823 \\ L_{DN100} &= 488,800 \end{aligned}$$

Dersom vi antar at rørene ekspanderer opp til flytegrensen slik som i avsnitt 7.3.3, får vi  $r_{i,DN20} = \frac{26,9135}{2} - 2 = 11,45675\text{mm}$ , og  $r_{i,DN100} = \frac{114,3680}{2} - 2,6 = 54,584\text{mm}$ . (Ser bort i fra endring av veggtykkelse). På samme måte kan vi så finne de tilhørende høydene for vannsøylen etter frost:

$$L_v = 142,128$$

$$L_{DN20} = 488,028$$

$$L_{DN100} = 487,995$$

Dersom all ekspansjonen foregår i radiell retning, vil høyden på vannsøylen forbli den samme. Vi kan finne den indre radien, etter 5.22, innsatt  $e = 1,085786651$ :

$$D = \sqrt{\frac{e \cdot V_0}{\frac{\pi}{4} \cdot L_0}} = \sqrt{e \cdot D_0^2} = \sqrt{e} \cdot D_0,$$

$$\frac{D}{D_0} = \frac{r}{r_0}$$

$$\rightarrow r = r_0 \cdot \sqrt{1,085786651}$$

$$r_{i,DN20} = 11,45 \cdot \sqrt{1,085786651} = 11,93102445\text{mm}$$

$$r_{i,DN100} = 54,55 \cdot \sqrt{1,085786651} = 56,8416929\text{mm}$$

## 7.4 Hypotese

### 7.4.1 Forventet utvikling av kritiske punkter og valgte målepunkter

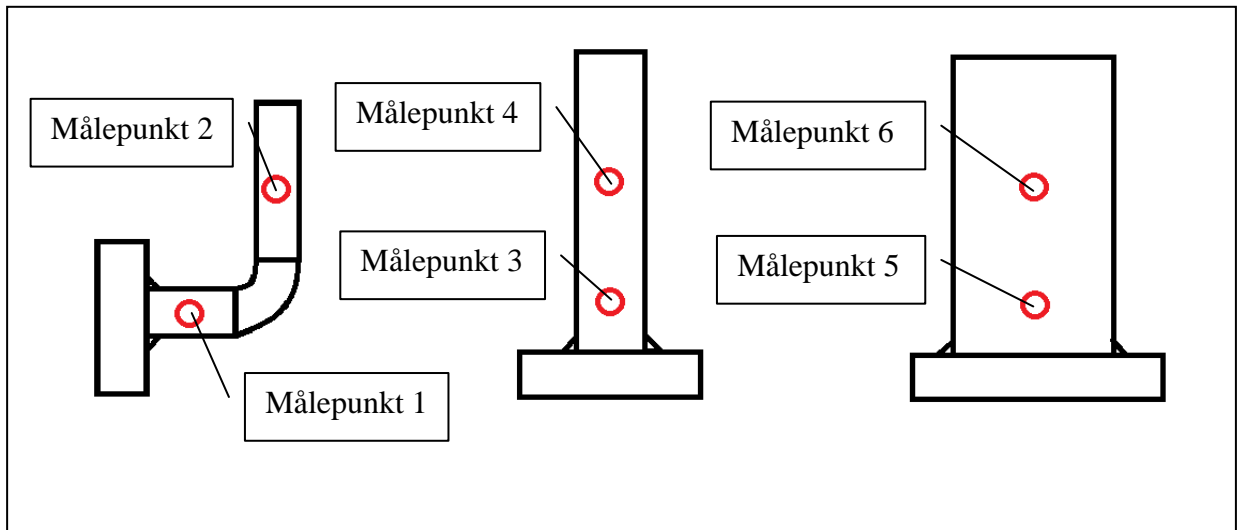
I forsøkene som skal utføres, står rørene uisolert, og åpne mot omgivelsene. Siden veggene i røret og flensen ikke er isolert, og det ikke er noen isolasjon mot vannet i åpningen av røret, er situasjon 1 og 2 svært usannsynelige. Siden vann er tyngst ved  $4^\circ\text{C}$ , vil vannet først kjøles ned til dette punktet. Deretter stiger tettheten til vannet, og vannet under  $4^\circ\text{C}$  vil stige opp. I tillegg er det ingen isolasjon mellom vannoverflaten, og omgivelsene. Det vil derfor være stor sannsynlighet for at vannet starter å fryse først i overkant.

Når vannet så starter å fryse, vil den resterende vesken ha en temperatur liggende på, eller nær frysepunktet. Det er derfor sannsynlig at det også vil dannes is i kantene mot flensen, og mot rørveggene, slik som i situasjon 5.

Det forventes også at isen vil kunne glippe, og presses noe oppover i røret, etter hvert som trykket øker. Dette kan skje særlig i starten, før isen er fullt krystallisert, og før isen blir tykk. I rørene med

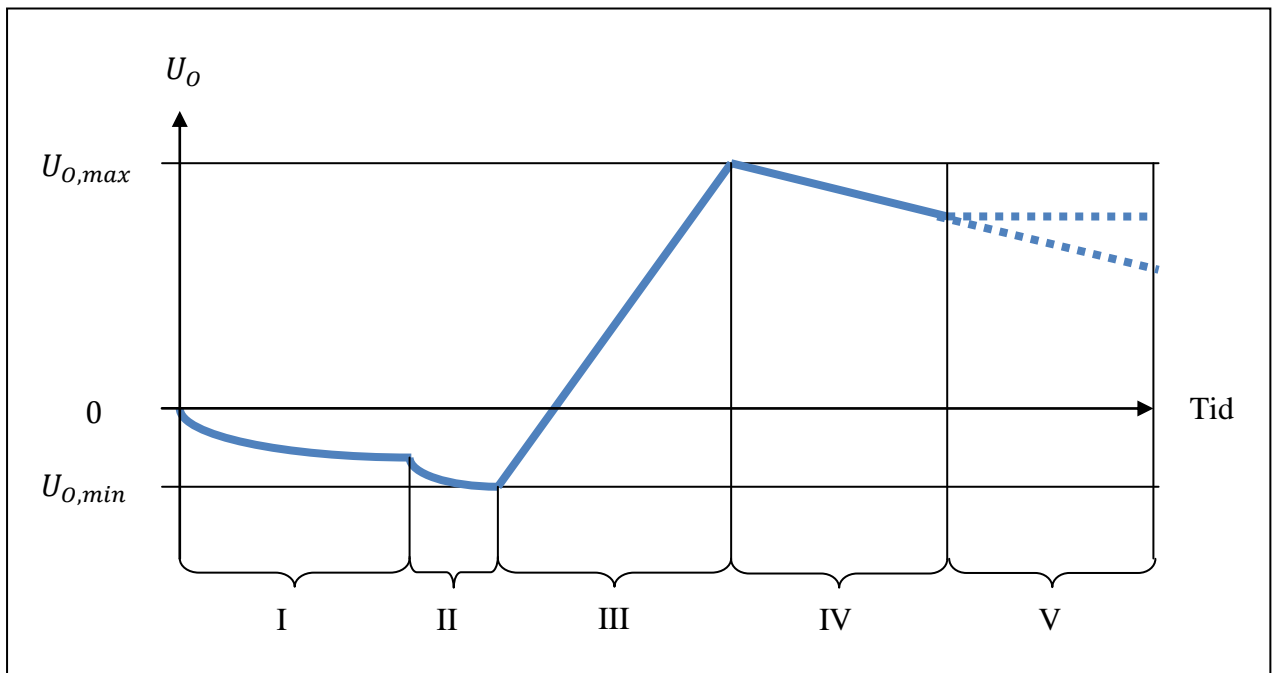
bend må is som dannes i, og før bendet presses forbi dette. Det forventes at dette vil gi økt motstand, og at det derfor er større risiko for et kritisk område i rørdelen før bendet.

Da det er begrenset med tid, og antall punkter som kan måles med testutstyret, har det blitt bestemt to målepunkter for hver rørdel. De rette rørene har et målepunkt midt på røret, og et 100mm fra bunnen av flensen. Rørene med bend har et målepunkt halvveis mellom flensen og bendet, og halvveis mellom bendet og åpen ende. Dette vil dekke alle de tenkte kritiske punktene, med unntak av bendet. Målepunktene for hver av de tre delene ses under, i figur 7.8.



Figur 7.8 Målepunkter

#### 7.4.2 Forventet målingsforløp



Figur 7.9 forventet målingsforløp

I den første delen (I) vil nedkjøling føre til sammentrekning av røret, og en reduksjon i  $U_o$ . Det er temperaturforskjellen mellom røret og omgivelsene som driver nedkjølingen, og reduksjonen vil derfor følge en avtagende kurve, da temperaturforskjellen avtar etter som røret nedkjøles. På grunn av energien som kreves for faseovergangen når vannet fryser, vil temperaturen inne i røret ligge på  $0^\circ\text{C}$  mens det fryser.

I neste del (II) vil store deler av vesken ha fryst til is, og målingene vil igjen synke i takt med temperaturen. Når temperaturen i røret når det laveste punktet, vil sammentrekningen være størst (gitt at det ikke har oppstått indre trykk ennå), og målingene vil nå  $U_{o,min}$ .

I del (III) starter trykket å øke som følge av ekspansjonen av is, og  $U_o$  øker. Når alt vannet har gått over til is, vil ekspansjonen nå det høyeste punktet, og vi vil måle  $U_{o,max}$ .

I del (IV) vil isen kjøles ytterligere ned, og redusere noe i volum. Dette vil igjen føre til at røret trekker seg sammen, og  $U_o$  vil kunne synke noe.

I siste del (V) er det to mulige utfall. Isen kan forbli fastlåst, og trykket på røret holdes permanent. I så fall vil  $U_o$  forbli uendret. Den andre muligheten er at isen sakte presses oppover i røret, eller deformeres slik at trykket på rørveggen synker. Dette vil i såfall føre til at  $U_o$  synker.

### 7.4.3 Forventet størrelsesorden og valg av måleutstyr

Frostsprenging i rør er et kjent fenomen som ofte kan føre til at rørene sprekker. Dette skjer i situasjoner der lenger rørsystemer fryser (e.g. vannrør på hytta på vinteren). I disse tilfellene er det snakk om lukkede systemer, der vann/is ikke kan ekspandere fritt, og all ekspansjonen tas opp i rørene.

Rørene i denne oppgaven er rørene relativt korte, og står åpne i den ene enden. Det er ukjent i hvor stor andel av ekspansjonen som vil skje mot den åpne enden, uten at det oppstår trykk, og hvor stor andelen av ekspansjonen som skjer i radiell retning som må tas opp av rørene.

Derfor utføres det tidlige forsøk, der målsetningen er å avdekke om det er synlige, opplagte ekspansjoner, der røret får tydelige bulker, eller sprekker. I disse forsøkene skal det også avdekke

eventuelle problemer før hovedforsøkene. For disse forsøkene blir målingene utført for hånd ved hjelp av skyvelære. Dette har en nøyaktighet på 0,01mm.

Dersom det ikke er store synlige deformasjoner, kan det antas at spenningene som oppstår vil være av samme størrelsesorden som flytegrensen for stålet, eller mindre. I de tidlige beregningene er det regnet ut at nedkjølingen vil kunne føre til at diameteren reduseres med ca. 0,005mm for DN20-rørene, og 0,022mm for DN100-rørene. Når stålet når flytegrensen, tilsvarer dette en økning i diameter på ca. 0,068mm for DN100-rørene, og 0,0135mm for DN20-rørene.

Endringene i diameter er relativt små. Selv ved flytegrensen vil endringene i diameter ligge i størrelsesorden for de minste målbare verdiene ved bruk av et skyvelære. Det kan også benyttes et såkalt mikrometer. Disse fungerer på omtrent samme måte som skyvelære, men har som navnet tilsier en nøyaktighet på 0,001mm. Siden diameterendringen pr. MPa vil ligge i størrelsesorden  $10^{-2}$  mindre enn flytegrensen, vil det bare kunne måles spenninger i størrelsesorden 10MPa.

I tillegg vil slike målinger ha en rekke feilkilder: enten utføres målingene inne i det nedkjølte området, som vil føre til at skyvelæren krymper på grunn av temperaturendringen, ellers må rørene tas ut, i romtemperatur, som vil føre til at disse igjen ekspanderer mens målingen utføres. Siden rørene ikke er perfekt sirkulære, vil målingene også avvike dersom det ikke måles i nøyaktig samme punkt hver gang.

For hovedforsøkene blir derfor målinger utført med strekkklapper. Disse skal kunne måle tøyninger på  $1 \cdot 10^{-6}$ mm/mm [2\)](#). Siden strekkklappene festes på røret, og måleutstyret kan plasseres utenfor fryseren, elimineres problemene ved målinger utført for hånd. Samtidig forenkles datainnsamlingen da målingene loggføres elektronisk.

## 7.5 Forsøksoppsett

### 7.5.1 Utstyr

#### **Strekkklapper:**

I forsøkene er det benyttet strekkklapper av modell 1-LY43-6/120 fra HBM. Disse har følgende data:

Motstand: 120OHM  $\pm 0,3\%$

k-faktor:  $2,11 \pm 1,0\%$

Hurtigtørkende lim av type: Z70, medfølgende utstyr for fordeling av lim.



Isolerende masse, AK22, for beskyttelse av strekkapper.

### Utstyr for pussing og rengjøring av prøvedeler:

Pussepapir P220, Teknisk sprit, Aceton

### Feste strekkapper:

Hurtigtørkende lim av type: Z70, medfølgende utstyr for fordeling av lim.

### Måleforsterker:

Målebroen som ble benyttet var en M1000-serie fra Micro Movements Ltd. Denne har seks kanaler, der det kan settes en gitt spenning til hvert målepunkt, og spenningsfallet over den aktive lappen måles for hver kanal. Den målte spenningen for hver kanal forsterkes, og sendes videre som et signal fra 0V til 2V.

### Logger (TYPE)

Loggeren som blir benyttet er en HIOKI 8430-20 Memory HiLOGGER. Denne kan loggføre inngangsspenningen på 10 kanaler.

### Fryser

Standard termostatstyrt fryser, stilt til  $-18^{\circ}\text{C}$ .

### Termometer

standard glasstermometer,  $-30^{\circ}\text{C}$  til  $120^{\circ}\text{C}$ .

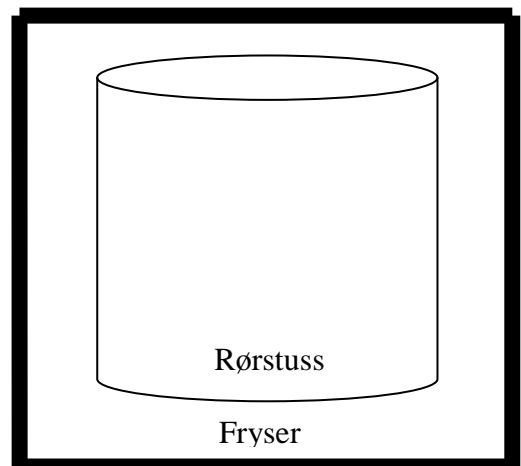
### Skyvelære

Nøyaktighet på 0,01mm. Brukt i de tidlige forsøkene.

### Voltmeter

## 7.5.2 Testoppsett for tidlige forsøk

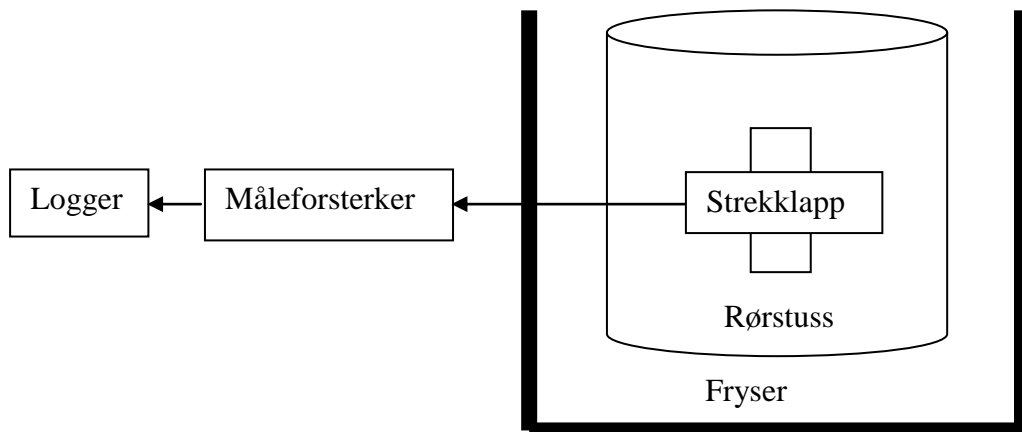
1. Målinger utføres med skyvelæren. Diameteren for rørdelene måles på et utvalg punkter langs røret i romtemperatur. Temperatur og diameter loggføres.
2. Rørdelen plasseres i fryseren over natta for å sikre at den er helt nedkjølt. Diameter og temperatur måles og loggføres.
3. Rørdelene fylles med vann. Høyde på vannsøylen før nedfrysning måles og loggføres. Rørdelen plasseres i fryseren til vannet er gjennomfrosset. Nye diameter, høyde på isen inne i røret, og temperatur måles og loggføres.



Figur 7.10 oppsett for forsøk

### 7.5.3 Testoppsett for hovedforsøk:

Oppsettet for forsøket er vist i figur 7.11, under. Rørdelene med strekkklapper er plassert i fryseren under forsøket. Måleutstyret er plassert utenfor fryseren. Måleforsterkeren er tilkoblet strekkklappene gjennom ledere som er loddet på strekkklappene.



Figur 7.11 oppsett hovedforsøk

1. Rørdelene fylles med vann. Vannstand og temperatur måles og loggføres.
2. Rørdelene plasseres i fryseren.
3. Måleforsterkeren kalibreres slik at utgangsspenningen viser 0.
4. Ekspansjonen loggføres etter som vannet fryser.
5. Høyde på isen måles etter at alt vannet har fryst.

## 7.6 Gjennomføring:

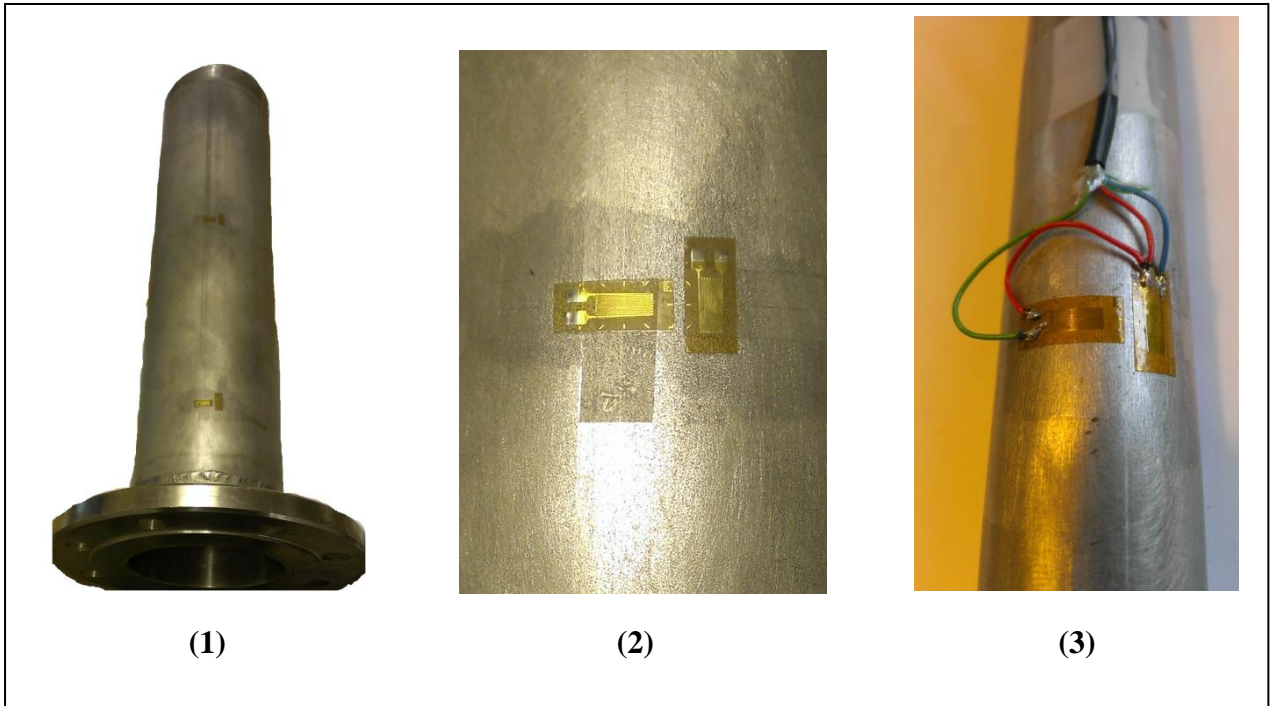
### 7.6.1 Tidlige forsøk:

Det var på dette tidspunktet kun produsert DN20 rør i P235GH. Diameter ble målt ved 20°C, ved -25°C, og etter frost ved -25°C, i ni punkter med 50mm mellomrom. Første punkt 50mm fra bunnen. Målingene ble foretatt inne i fryseren.

### 7.6.2 Hovedforsøk

#### Klargjøring av utstyr

Rørene ble pusset og rengjort etter instruksjon fra HBM. For å sikre nøyaktige målinger må overflaten ha riktig ruhet og være fri for urenheter. Streklappene ble limt fast i de valgte målepunktene, med Z70 hurtigtørkende lim (Bilde 7.1 (1) og (2)).

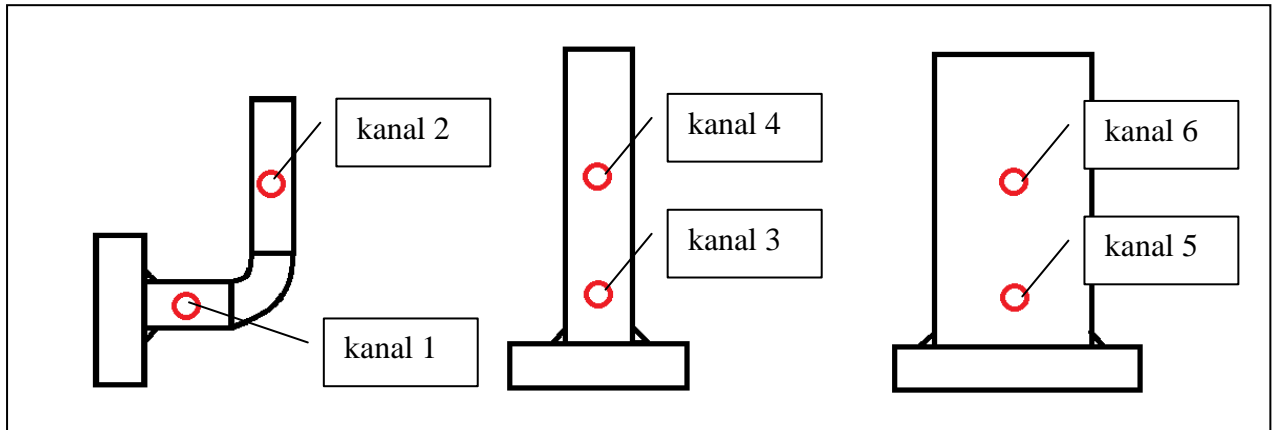


*Bilde 7.1 Feste av streklapper*



*Bilde 7.2 Kalibrering av utstyr*

Målepunktene ble satt 100mm fra bunnen, og 300mm fra bunnen. På røret med bend ble det satt midt på de rette rørdelene før og etter bendet. I hvert punkt sitter det to strekkklapper koblet i halvbro for temperaturkompensering. De ble nummerert fra 1 til 6. Der 1 er nederst på røret med bend, og 2 punktet over, og tilsvarende for de andre rørene (se figur 7.12).



Figur 7.12 kanalbetegnelser

Ledere ble loddet fast til strekkklappene. For å få en halvbrokobling, skal de to strekkklappene kobles i serie. Utgangsspenningen i halvbroen måles ved punktet mellom strekkklappene (rød leder på bilde 7.1 (3)).

I starten var det problemer med støy på utgangssignalet. Etter å ha undersøkt håndboken kom det frem at det manglet en kobling til jord på denne. Dette ble utbedret på labben, og støyen på signalet forsvant. Strekkklappene som ble brukt tåler opptil 9V, men målebroen kunne ikke levere mer enn 3V for dette oppsettet, uten å gå over spesifikasjonene for hvor stor strøm som kan leveres.

Måleforsterkeren ble så koblet opp mot strekkklappene for å kalibrere denne mot et nullpunkt for strekkklappene ved romtemperatur, uten påkjenning. Dette ble gjort for alle 6 kanaler. Etter kort tid begynte verdiene å endre seg, til tross for at det ikke var noen påkjenning på rørene.

Nullpunktet ble kalibrert igjen, og broen ble koblet til loggeren som registrerte verdiene over natta for å se om de holdt seg stabile.

Neste dag viste det seg at noen av kanalene holdt seg stabile gjennom natta, mens noen hadde endret seg jevnt. Det var også utslag rundt klokken 08:00, da det kom folk inn på laboratoriet. Etter litt feilsøking viste problemet seg å være dårlige kontakter for kortene i målebroen. Disse er ikke gullbelagt, og har korrodert. Ved å rengjøre, og koble utstyret til og fra flere ganger ble det mindre

problemer, og verdiene holdt seg stabile selv om utstyret ble flyttet på. Fortsatt var det ikke helt stabilt, og potentiometrene som brukes for å justere nullpunktet har noe dødgang, som gjør det vanskelig å stille apparatet nøyaktig. Siste test med logging viste ikke mer enn 10  $\mu\text{V}$  avvik fra nullpunktet, når utstyret ble stående uten påkjenning.

For å simulere endret motstand i strekklappene ble en ekstern spenningsforsyning koblet opp over den aktive strekklappen. Ved hjelp av denne ble spenningen endret med 4000 $\mu\text{V}$ , og forsterkningen på målebroen ble satt slik at denne viste dette som 2,000V, da dette var den høyeste verdien som kunne leses på målebroens display. Altså med en forsterkningen på  $0,5 \cdot 10^3$ . Virkelig utgangsspenning i Volt blir derfor:

$$U_o = \frac{U_{o,m\ddot{a}lt}}{0,5 \cdot 10^3}$$

### Målinger

Rørene ble så fylt med vann opp til 50mm fra toppen, og plassert i fryseren. Måleforsterkeren ble kalibrert, og alle målinger loggføres for hvert 10. sekund. Når vannet hadde fryst, ble rørdelene tatt ut av fryseren, og høyden på isen ble målt.

Etter første forsøk ble rørene varmet opp nok til at isen løsnet fra rørene og kunne tas ut. Det hadde nå gått 26 timer, og det ble antatt at alt vannet nå skulle være gjennomfrosset. Det viste seg at isen i DN100-røret ikke var fullt gjennomfrossen, men hadde en lomme med vann i midten av røret, i samme område som kanal 6 (bilde 7.6). Det betyr at den maksimale spenningen for DN100-røret ennå ikke var nådd, da all alt vannet ikke hadde fryst i dette området.

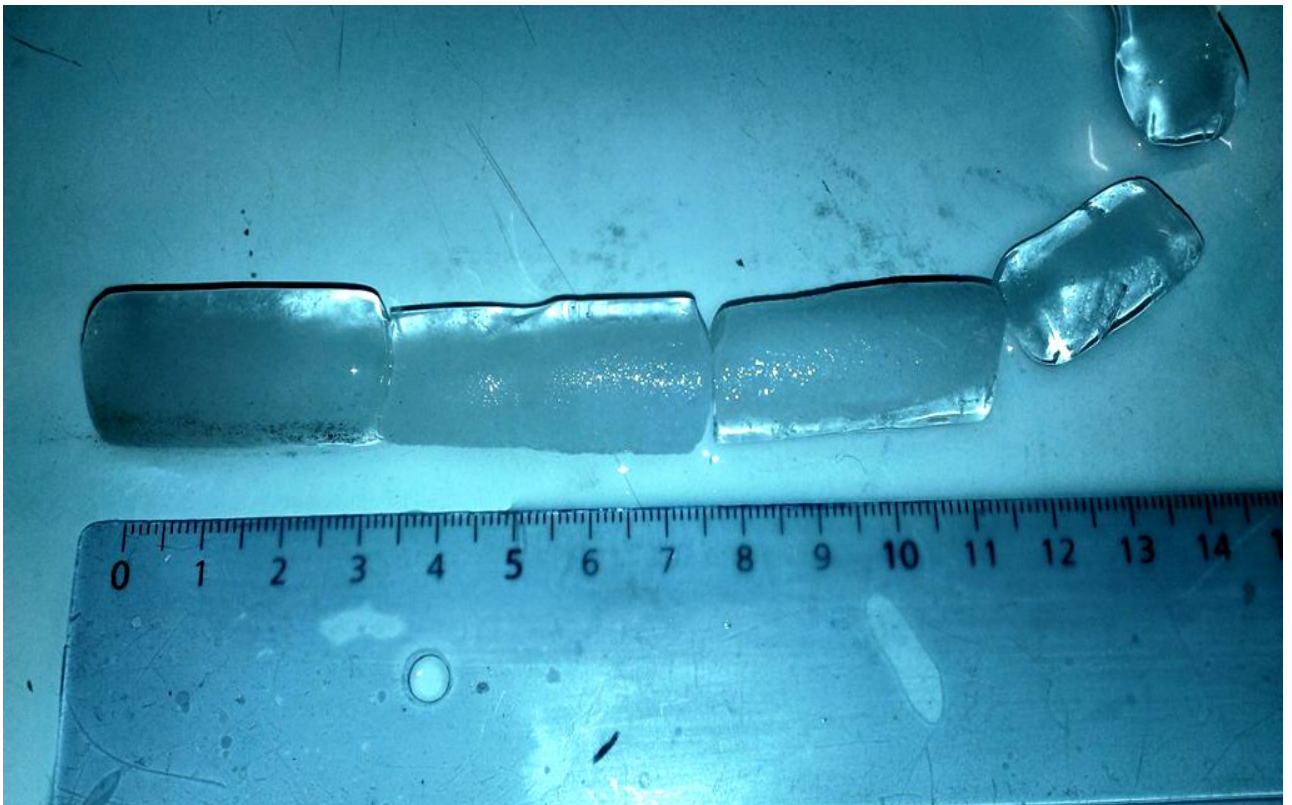
For neste forsøk ble derfor DN20-rørene tømt helt, og fylt med vann på nytt, mens isen fra DN100-røret ble satt tilbake i røret. Det ble fylt opp med vann til isen var dekt, og isen ble holdt nede med en vekt slik at isen ikke fløt opp. Denne gangen ble utslaget for målingene ved DN100-røret betydelig høyere, og alt vannet var gjennomfryst etter 12 timer.

Tredje forsøk ble gjennomført på samme måte. Denne gangen ble målingene utført over to døgn for å sikre at alt vannet i DN100-røret skulle fryse.

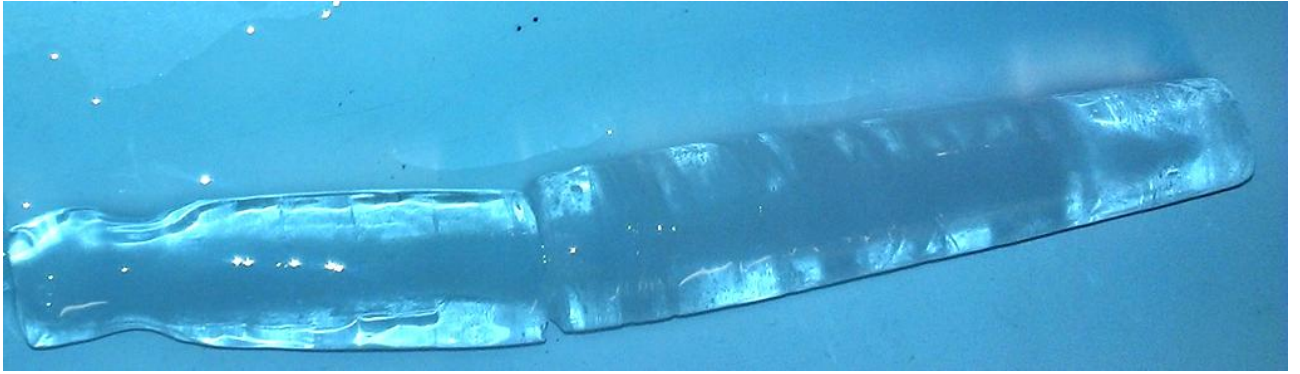
DN20 rett



*Bilde 7.3 isen fra de rette DN20-rørene*



*Bilde 7.4 isen fra horisontal del ved flensen, DN20 med bend*



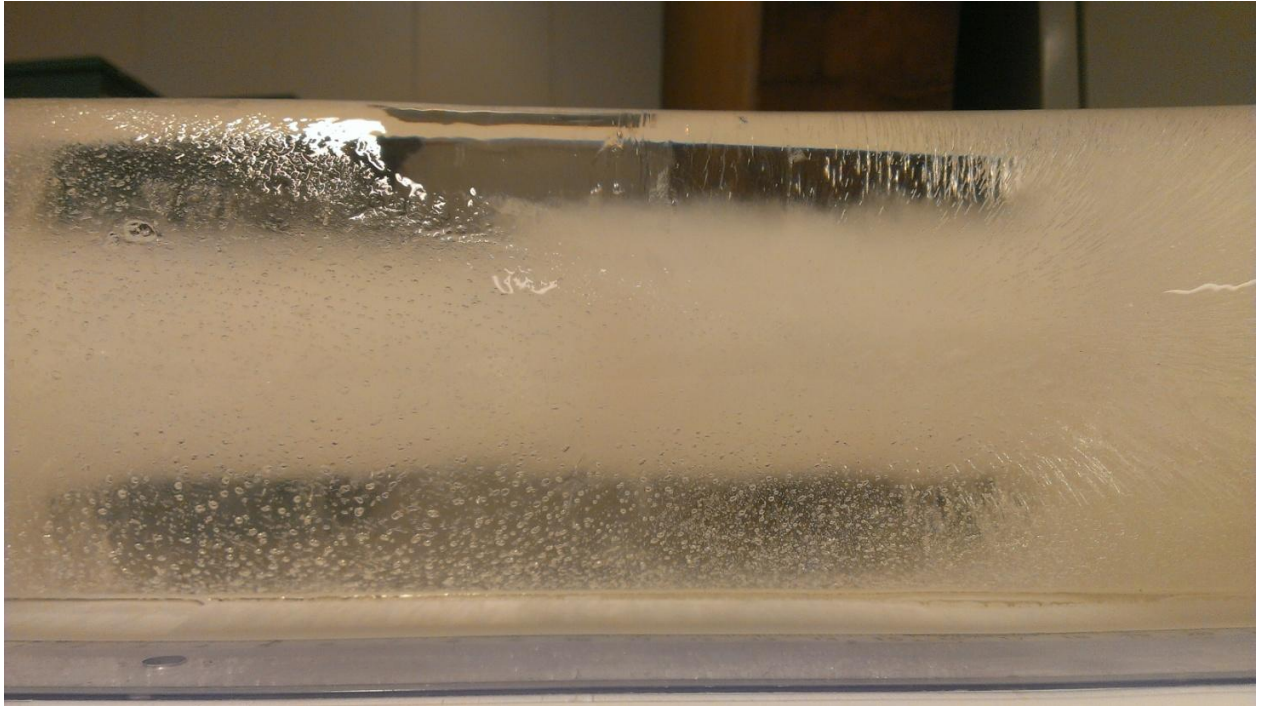
*Bilde 7.5 isen fra vertikal del mot åpningen DN20 med bend*



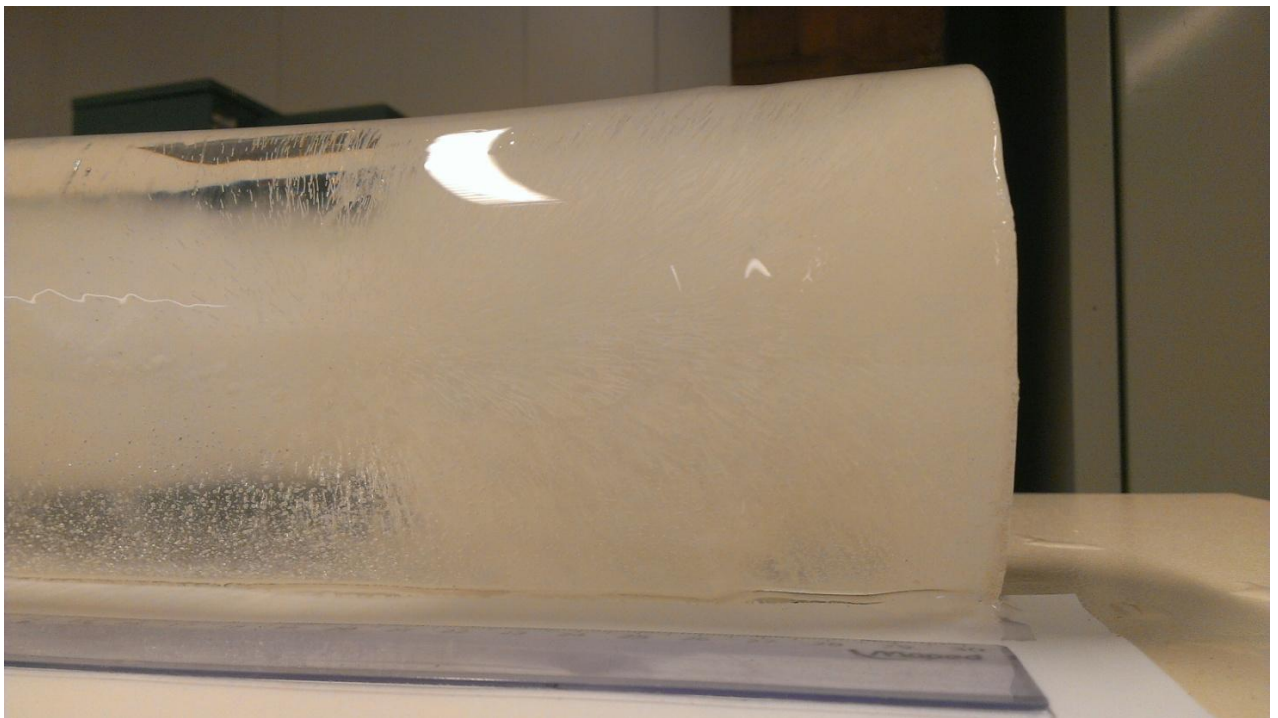
*Bilde 7.6 innelukket vannlomme i DN100-røret*



*Bilde 7.8 Øvre del av isen fra DN100-røret, gjennomfrosset.*



*Bilde 7.9 Midtre del av isen fra DN100-røret, gjennomfrosset*



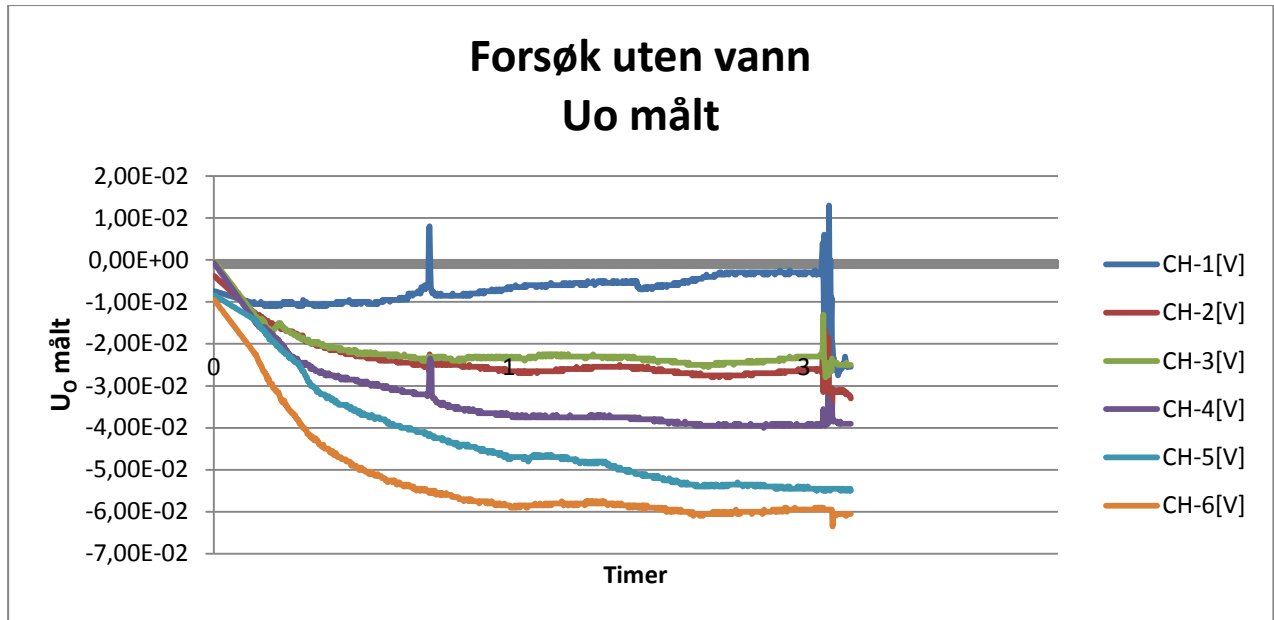
*Bilde 7.10 Nedre del av isen fra DN100-røret, gjennomfrosset*



## 7.8 Resultater

Målingene for utgangsspenningen ble lagret i logger, og lagt inn i regneark. Verdiene er for målt utgangsspenning og beregnet spenning i rørene er grafisk fremstilt i vedlegg A og vedlegg B.

### 7.8.1 Forsøk uten vann



Figur 7.13 graf for målinger gjort uten vann

Kanal 1 oppfører seg ikke som forventet. Ved undersøkelse viste det seg at en strekklapp i koblingen ved kanal 1 hadde løsnet. Denne ble derfor skiftet før forsøkene fortsatte.

Da kanal 2 - 4 går på samme type rør, ble det bestemt at det var tilstrekkelig med data for DN20 rørene ved ren temperaturpåkjenning.

Tabell 7.2 Forsøk uten vann

Kanal	1	2	3	4	5	6
$U_{O,min}$ [V]	-7,100E-05	-7,500E-05	-5,600E-05	-8,000E-05	-1,100E-04	-1,270E-04
$U_{O,max}$ [V]	2,600E-05	-9,943E-06	-4,029E-06	-5,133E-06	-1,830E-05	-2,236E-05
$\Delta U_{O,max}$ [V]	9,700E-05	6,506E-05	5,197E-05	7,487E-05	9,170E-05	1,046E-04
$D_O$ [mm]	26,9	26,9	26,9	26,9	114,3	114,3
$D_{min}$ [mm]	26,899072	26,899019	26,899268	26,898954	114,293888	114,292944
$D_{max}$ [mm]	26,900340	26,899870	26,899947	26,899933	114,298984	114,298758

$\Delta D_{max}$ [mm]	-0,001268	-0,000851	-0,000680	-0,000979	-0,005095	-0,005814
-----------------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

### 7.8.2 Beregnede min- og max-verdier

$U_{O,min}$  og  $U_{O,max}$  er beregnet ut i fra  $U_{O,m\ddot{a}lt}$  etter ligning 6.14. Dette er henholdsvis den laveste, og høyeste målte utgangsspenningen i halvbroppkoblingen for strekklappene.  $\Delta U_{O,max}$  er absoluttverdien til differansen mellom  $U_{O,min}$  og  $U_{O,max}$ .  $\sigma_{max}$  er spenningen beregnet ut fra  $\Delta U_{O,max}$ .  $D_{min}$  og  $D_{max}$  er beregnet etter ligning 5.9 og er henholdsvis den minste og høyeste beregnede diameteren.

Tabell 7.3 første forsøk

Kanal	1	2	3	4	5	6
$U_{O,min}$ [V]	-4,800E-05	-5,400E-05	-5,900E-05	-6,700E-05	-2,370E-04	-1,420E-04
$U_{O,max}$ [V]	1,173E-03	2,400E-04	3,300E-05	3,500E-05	-2,500E-05	2,200E-05
$\Delta U_{O,max}$ [V]	1,221E-03	2,940E-04	9,200E-05	1,020E-04	2,120E-04	1,640E-04
$D_O$ [mm]	26,9	26,9	26,9	26,9	114,3	114,3
$D_{min}$ [mm]	26,899372	26,899294	26,899229	26,899124	114,286832	114,292111
$D_{max}$ [mm]	26,915338	26,903138	26,900431	26,900458	114,298611	114,301222
$\Delta D_{max}$ [mm]	0,015965	0,003844	0,001203	0,001334	0,011779	0,009112
$\sigma_{max}$ [MPa]	119,687	28,819	9,018	9,998	20,781	16,076

Tabell 7.4 andre forsøk

Kanal	1	2	3	4	5	6
$U_{O,min}$ [V]	-1,400E-05	-3,100E-05	-9,200E-05	-6,400E-05	-4,000E-05	-1,400E-05
$U_{O,max}$ [V]	1,800E-03	3,450E-04	2,000E-06	3,000E-06	1,000E-06	1,800E-03
$\Delta U_{O,max}$ [V]	1,814E-03	3,760E-04	9,400E-05	6,700E-05	4,100E-05	1,814E-03
$D_O$ [mm]	26,9	26,9	26,9	26,9	114,3	114,3
$D_{min}$ [mm]	26,899817	26,899595	26,898797	26,899163	114,297778	114,300056
$D_{max}$ [mm]	26,923536	26,904511	26,900026	26,900039	114,300056	114,338169

$\Delta D_{max}[mm]$	0,023719	0,004916	0,001229	0,000876	0,002278	0,038114
$\sigma_{max} [MPa]$	177,816	36,857	9,214	6,568	4,019	70,246

Tabell 7.5 tredje forsøk

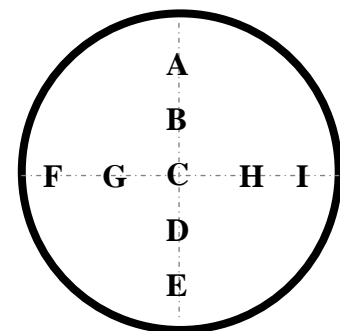
Kanal	1	2	3	4	5	6
$U_{O,min} [V]$	-6,000E-06	-2,000E-06	-9,600E-05	-7,200E-05	-1,340E-04	-7,100E-05
$U_{O,max} [V]$	2,045E-03	4,140E-04	-2,200E-05	-9,000E-06	1,100E-05	2,680E-04
$\Delta U_{O,max} [V]$	2,051E-03	4,160E-04	7,400E-05	6,300E-05	1,450E-04	3,390E-04
$D_O [mm]$	26,9	26,9	26,9	26,9	114,3	114,3
$D_{min} [mm]$	26,899922	26,899974	26,898745	26,899059	114,292555	114,296055
$D_{max} [mm]$	26,926740	26,905413	26,899712	26,899882	114,300611	114,314890
$\Delta D_{max}[mm]$	0,026818	0,005439	0,000968	0,000824	0,008056	0,018835
$\sigma_{max} [MPa]$	201,047	40,778	7,254	6,176	14,213	33,230

### 7.8.3 Aksiell ekspansjon av vannet:

Det viste seg vanskelig å måle nøyaktig høyde på isen, da denne var veldig ujevn, og kunne variere i høyde opp mot 10mm. Avstanden fra toppen av røret og ned til isen ble derfor målt på 5 punkter for DN20-rørene (A, C, E, F, I figur 7.13), og 9 punkter på DN100-røret (A-I figur 7.13), og det ble beregnet en gjennomsnittlig verdi.

Tabell 7.6 målinger av ishøyde

forsøk	DN20 bend	DN20 rett	DN100 rett
1	30,32	9,72	13,20
2	27,98	9,20	13,32
3	28,70	9,42	12,16
Snitt forsøk:	29,00	9,45	12,91



Figur 7.13 målepunkter for ishøyder

## 8. Analyser

### 8.1 Sammenligning av forventet og observert fryseforløp

Fryseforløpet kan sees lettest for DN100-røret, som har en større diameter, noe som gjør at fryseforløpet foregår over et større volum, og lengre tid. Som vist i bilde 7.6, blir det her en innesluttet vannlomme midt på røret. Isen ved rørveggen, rundt midten av rørets lengde er klar. Dette betyr at de oppløste gassene har blitt presset fritt ut av isen, og inn i veske, som tyder på at isen har vokst fra rørveggen og innover.

I bilde 7.10, kan det sees at det er fanget luftbobler inne i isen nærmest flensen. Disse luftboblene er avlange, og går innover i røret. De bøyer også av oppover langs rørets retning. Dette tyder på at isen har vokst fra rørveggen og innover, samtidig som den har vokst fra flensen og oppover. Isen i toppen av røret sees i bilde 7.8 Her er isen uklar på grunn av luftbobler som er fanget i isen. Dersom isen hadde utviklet seg fritt fra toppen og nedover, skulle denne vært klar. Dette kan tyde på at isen i toppen stadig blir brutt opp etter som det interne trykket øker. Is og vann som da presses opp, vil være fylt av gass.

Etter at isen er fullt gjennomfrost, oppstår det som forventet et område med uklar is der den innesluttete vannlommen var. Dette er fordi den innesluttete vannmengden vil være rik på gass, som har blitt presset ut fra den klare isen. Dette passer godt med forventet fryseforløp V og figur 7.6, som angir et kritisk område rundt midten av røret. De målte ekspansjonene passer også overens med dette. Det antas derfor at områder med høyt trykk kan sees ved å se etter uklar is også i de andre rørene.

Isen fra det rette DN20-røret er mer uniform, bilde 7.3. Her er det ingen områder der det kan ses en tydelig ansamling av uklar is langs røret. Isen er klar helt i ytterkant, og uklar i senter. Ekspansjonene som er målt for røret er også beskjedne. Dette kan tyde på et fryseforløp som i situasjon II, der isen vokser mye raskere radielt (fra rørveggen og innover), enn aksielt fra flensen og oppover eller fra toppen og nedover.

Dette vil da kunne føre til at det resterende vannet stadig presses oppover i røret, og at eventuell is i toppen ikke klarer å holde denne igjen. Målingene for ekspansjonen i målepunkt 2, som er den rette delen av DN20-røret, er høyere enn de målte ekspansjonene for det rette DN20-røret. Dette tyder på

at det kan ha oppstått kritiske punkter et stykke unna målepunktene, slik at disse registrerer lavere verdier enn det som er faktisk.

I DN20-røret med bend har isen fått to områder der det er ansamling av uklar is. På bilde 7.4 ser vi at dette er i området rett før bendet i den horisontale delen av røret som går fra flensen, og omtrent midt på det vertikale røret fra bendet til åpningen (bilde 7.5). Isen i bendet og et stykke opp er i stor grad klar. Dette tyder på et fryseforløp der isen har oppstått tidlig i bendet, og vokst radielt innover, og kritiske punkter har oppstått i de rette rørdelene før og etter bendet.

## 8.2 Sammenligning av forventet og observert aksial ekspansjon

Beregning av de opprinnelige høydene for vannsøylen er gjort i avsnitt 7.3.4. Når rørene fylles opp til 50mm fra toppen får vi:

$$L_{DN20} = L_{DN100} = 500 - 50 = 450mm$$

$$L_V = 200 - 29 - 50 = 121mm$$

Videre er forventet høyde på isen dersom den indre radien ble redusert til 11,44745mm for DN20-rørene, og 54,53905mm for DN100 røret beregnet. Dette svarer til at røret trekkes sammen langs hele lengden, altså ingen ekspansjon:

$$L_{DN20,min} = 488,823$$

$$L_{DN100,min} = 488,800$$

$$L_{V,min} = 142,562$$

Det er også beregnet høyder dersom de indre radiene øker tilsvarende flyspenning langs hele røret:

$$L_{DN20,max} = 488,028$$

$$L_{DN100,max} = 487,995$$

$$L_{V,max} = 142,128$$

De observerte høydene tilsvarer:

$$L_{DN20,m\grave{a}lt} = 490,553$$

$$L_{DN100,m\grave{a}lt} = 487,089$$

$$L_{V,m\grave{a}lt} = 142,0$$

Ved å løse for radiene finner vi at:

$$r_{i, DN20} = 11,427$$

$$r_{i, DN100} = 54,635$$

$$r_{i, DN20, bend} = 11,459$$

Dette er altså mindre radier enn det minste som er beregnet, og stemmer ikke overens med at det er ekspansjon i røret. det tyder tvert i mot på at røret skal trekke seg sammen mer enn det som er beregnet. Dersom vi ser på differansen mellom de beregnede høydene for den minste radien, og for den høyest beregnede radien ved flytegrensen se vi at disse er av størrelsesorden  $1 \cdot 10^{-1}$ :

$$\Delta L_{DN20} = 488,823 - 488,028 = 0,795$$

$$\Delta L_{DN100} = 488,800 - 487,995 = 0,805$$

$$\Delta L_v = 142,562 - 142,128 = 0,434$$

Målingene for høyden til isen er utført for hånd, og målinger på forskjellige punkter på isen i samme rør avviker med så mye som 10mm. Dette er altså i størrelsesorden  $1 \cdot 10^2$  større enn størrelsesordenen for det forventede verdiområdet. På grunnlag av dette velger jeg å se bort i fra disse observasjonene videre i beregningene.

### 8.3 Sammenligning av forventet og faktisk spenningsutvikling

I figur 7.9 beskrives det forventede forløpet for målingene over tid. Denne ble delt i fem deler, der målingene:

- I. synker avtagende når røret kjøles ned til  $0^\circ\text{C}$
- II. synker avtagende når temperaturen går under  $0^\circ\text{C}$  når vannet begynner å fryse
- III. stiger på grunn av ekspansjon av røret
- IV. avtar når isen kjøles ned og trekker seg sammen
- V. flater ut eller avtar som følge av at isen presses opp

Alt dette ser ut til å stemme i stor grad for alle forsøkene. Del I og II sees best for kanal 3 og 4 der dette utgjør en stor andel av den totale spenningsendringen. Etter at det lavest punktet nås for alle målingene, begynner den målte spenningen å stige. Dette er igjen i tråd med III. Når trykket stiger i

del III, skjer dette i små rykk der spenningen øker, for så å falle et stykke igjen. Dette er spesielt tydelig for kanal 6. Dette kommer trolig av at isen glipper litt etter hvert som trykket stig, eller at ispluggen i toppen ikke er tett, og at vann presses ut ved et vist trykk.

Sammentrekning som følge av at isen kjøles ned (IV) er mest synelig for kanal 6. Her ser vi et område etter den høyeste målingen der verdiene avtar noe. På grunn av de store forskjellen i diameter, vil massen til isen være svært forskjellig. Isen i DN20-rørene vil derfor fort bli nedkjølt, og effekten blir ikke like tydelig som for DN100-røret, der isen vil bruke lenger tid på å kjøles ned.

I del V forventes det at spenningen flater ut, eller avtar på grunn av at isen deformeres og presses ut. Det ser ut til at spenningen i de fleste kanalene stabiliserer seg; etter den høyeste målingen, og etter del IV for kanal 6, faller målingene brått ned i nærheten av det laveste målte punktet. Dette tyder på at isen etter hvert "glipper", eller deformeres slik at den presses opp i røret, og spenningen faller. Dette skjer i midlertid ikke i kanal 1. Dette kan komme av at isen må presses rundt bendedet, og at dette gir for stor motstand til at isen her presses ut. Det kan også komme av at spenningene kommer over flytegrensen, og det har oppstått permanent deformasjon.

## 8.4 Endringer i diameter

Endring i diameter er beregnet for rørene når disse trekkes sammen på grunn av nedkjøling, og når spenningen når designspenningen  $f$ . Den minste observerte diameteren under forsøkene, er for DN20-rørene = 26,898745mm, og for DN100-røret = 114,286832mm. Dette er i begge tilfeller noe større enn den beregnede minste diameteren.

De minste diameterne som beregnes ut i fra målingene gjort uten noe vann er 26,898954mm for DN20-rørene, og 114,292944mm for DN100-røret. Dette er høyere enn det som er målt under forsøkene med vann.

Grunnen til dette kan være at måleutstyret ikke er kalibrert slik at nullpunktet er satt lavere enn det som svarer til romtemperatur ved 20°C. Dette er sannsynlig da utstyret blir kalibrert etter at rørene settes inn i fryseren, og rørene vil derfor kjøles noe ned. En annen mulighet er at rørene ikke når den laveste temperaturen og sammentrekningen, før trykket i rørene øker.

Tabell 8.1 diametre.

Kanal	1	2	3	4	5	6
$D_{min,beregnet}$	26,8949	26,8949	26,8949	26,8949	114,2781	114,2781
$D_{max,beregnet}$	26,9135	26,9135	26,9135	26,9135	114,3680	114,3680
Forsøk u. vann $D_{min}$	26,899072	26,899019	26,899268	26,898954	114,293888	114,292944
Forsøk 1 $D_{min}$	26,899372	26,899294	26,899229	26,899124	114,286832	114,292111
Forsøk 2 $D_{min}$	26,899817	26,899595	26,898797	26,899163	114,297778	114,300056
Forsøk 2 $D_{min}$	26,899922	26,899974	26,898745	26,899059	114,292555	114,296055
Forsøk 1 $D_{max}$	26,915338	26,903138	26,900431	26,900458	114,298611	114,301222
Forsøk 2 $D_{max}$	26,923536	26,904511	26,900026	26,900039	114,300056	114,338169
Forsøk 3 $D_{max}$	26,926740	26,905413	26,899712	26,899882	114,300611	114,314890

## 8.5 Beregnede spenninger

Siden den beregnede endringen i diameter er regnet ut i fra diameteren ved romtemperatur, og ikke tar høyde for faktisk diameter der måleutstyret er kalibrert, er ikke diameterendringen et godt grunnlag for beregning av spenningene. Derfor beregnes spenningen ut i fra  $\Delta U_{O,max}$ , som for et hvert punkt er gitt ved absoluttverdien for  $U_O$  i punktet, minus absoluttverdien for den laveste målte  $U_O$  i alle punktene frem til det aktuelle punktet.. Derved vil spenningen alltid leses som positiv.

$$\sigma = \frac{\Delta U_{O,max} \cdot E}{3V \cdot 0,68575} = \frac{|U_O - U_{O,min}| \cdot E}{3V \cdot 0,68575}$$

Tabell 8.2 høyeste målte spenninger

forsøk	kanal					
	1	2	3	4	5	6
1: $\sigma_{t,ytre} =$	119,687	28,819	9,018	9,998	20,781	16,076
2: $\sigma_{t,ytre} =$	177,816	36,857	9,214	6,568	4,019	70,246
3: $\sigma_{t,ytre} =$	201,047	40,778	7,254	6,176	14,213	33,23

For kanal 1 ser vi at spenningen kommer opp i flytegrensen. Dette betyr at det oppstår varig deformasjon. Røret vil altså få en utbøyning her, som gjør at det er mer vann som fryser i punktet ved neste forsøk, og ekspansjonen vil bli stadig høyere. De andre rørene kommer ikke opp flytespenning, og ved gjentatte frysesykler, er det ikke store endringer i de beregnede spenningene. Grafisk fremstilling av de beregnede spenningene er i vedlegg B



## 8.6 Sammenlikning FEM-analyse

Håndberegningene skal kontrolleres mot FEM-beregninger. Hensikten er å kontrollere om verdiene for spenninger, og endring i diameter stemmer. FEM-beregningene utføres i ANSYS APDL. For disse beregningene har det blitt brukt en forenklet modell for rette rørstrekninger. Den stive innfestningen ved flensen modelleres ved at arealet i den ene enden av røret låses mot forskyvninger i alle retninger. ANSYS APDL-script kan sees i vedlegg D.

Ekspansjon av røret og spenninger i rørveggen oppnås så ved å påsette et indre trykk. Ut fra håndberegningene våre kan vi finne det indre trykket som skal gi de observerte verdiene for ekspansjonen i rørene. Dette kan gjøres via teori for tynnvegget rør, eller tykkvegget.

Dersom vi legger inn de beregnede spenningene i målepunktene (8.2) finner vi tilsvarende indre trykk etter formelen 5.2:

$$\sigma_t = \frac{p_i \cdot r_m}{S_0}$$

$$\rightarrow p_i = \frac{\sigma_t \cdot S_0}{r_m}, \text{ der } \sigma_t = \sigma_{max}$$

Tabell 8.3 beregnet indre trykk, tynnvegget teori

forsøk	kanal					
	1	2	3	4	5	6
1: $p_i =$	19,227	4,630	1,449	1,606	0,967	0,748
2: $p_i =$	28,565	5,921	1,480	1,055	0,187	3,270
3: $p_i =$	32,297	6,551	1,165	0,992	0,662	1,547

Dersom vi benytter oss av tykkvegget teori, finnes det indre trykket etter formelen under, ved å igjen sette inn verdiene fra (8.2):

$$p_i = \frac{\sigma_{t,ytre} \cdot \left(1 - \left(\frac{r_i}{r_y}\right)^2\right)}{\left[\left(\frac{r_i}{r_y}\right)^2 + \left(\frac{r_i}{r}\right)^2\right]}, \text{ der } \sigma_{t,ytre} = \sigma_{max} \text{ og } r = r_y$$

Tabell 8.4 beregnet indre trykk etter tykkvegget teori

forsøk	kanal					
	1	2	3	4	5	6
1: $p_i =$	22,732	5,474	1,713	1,899	1,014	0,784
2: $p_i =$	33,772	7,000	1,750	1,247	0,187	3,270
3: $p_i =$	38,184	7,745	1,378	1,173	0,662	1,547

Ved hjelp av likning 5.5, innsatt  $r = r_i$ , og  $p_i$  for hvert tilfelle, beregnes spenningen ved rørets innside,  $\sigma_{t,indre}$ :

Tabell 8.5 beregnet spenning på innsiden av rørene, tykkvegget teori

forsøk	kanal					
	1	2	3	4	5	6
1: $\sigma_{t,indre} =$	142,419	34,293	10,731	11,897	21,795	16,860
2: $\sigma_{t,indre} =$	211,588	43,857	10,964	7,815	4,021	70,284
3: $\sigma_{t,indre} =$	239,231	48,523	8,632	7,349	14,221	33,248

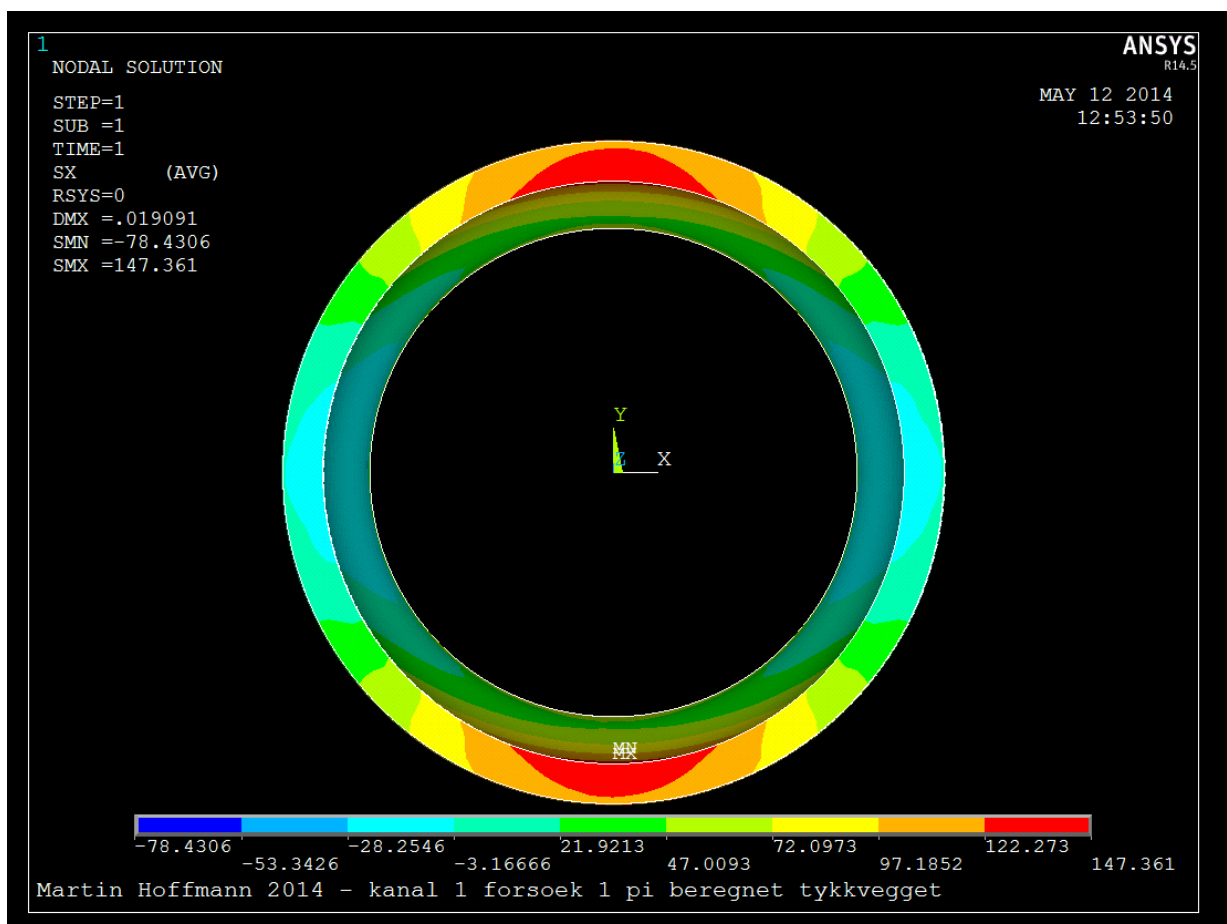
I FEM-modellen settes de beregnede indre trykkene for hver kanal, for tykkvegget og tynnvegget inn. I figur 7.14 er en presentasjon av spenningsfordelingen i rørveggen. For DN20-rørene er den indre spenningen  $\sigma_{t,indre}$  den høyeste spenningen i det røde området. Den ytre spenningen  $\sigma_{t,indre}$  er den høyeste verdien i det oransje feltet. FEM-kontrollen er utført mot kanal 1 for DN-20rørene, da det er her det høyeste trykket oppstår.

Tabell 8.6 ANSYS beregnede spenninger i DN20-rør ved kanal 1

Forsøk		$p_i$ beregnet	$\sigma$	$p_i$ beregnet	$\sigma$
		tykkvegget	ANSYS	tynnvegget	ANSYS
1	Indre	22,732	147,361	19,227	124,64
	Ytre		122,273		103,42
2	Indre	33,772	218,928	28,565	185,174
	Ytre		181,656		153,648
3	Indre	38,184	247,529	32,297	209,367
	Ytre		205,388		173,722

Sammenlignet med de håndberegnete verdiene for spenningene i tabell 8.2, og 8.5 stemmer spenningene fra FEM-modellen godt når det påsettes et indre trykk beregnet etter tykkvegget metode, men er noe høyere enn de håndberegnete spenningene.

Verdiene for spenning ved et påsatt indre trykk beregnet ut i fra tynnvegget teori er tatt med til sammenligning. Disse varierer i stor grad fra trykket beregnet med tykkvegget teori, og gir en for lav spenning. For DN20-rørene er forholdet mellom veggtykkelse og diameter så stort at tykkvegget teori skal benyttes.



Figur 7.14 Grafisk plott DN20 tykkvegget ANSYS

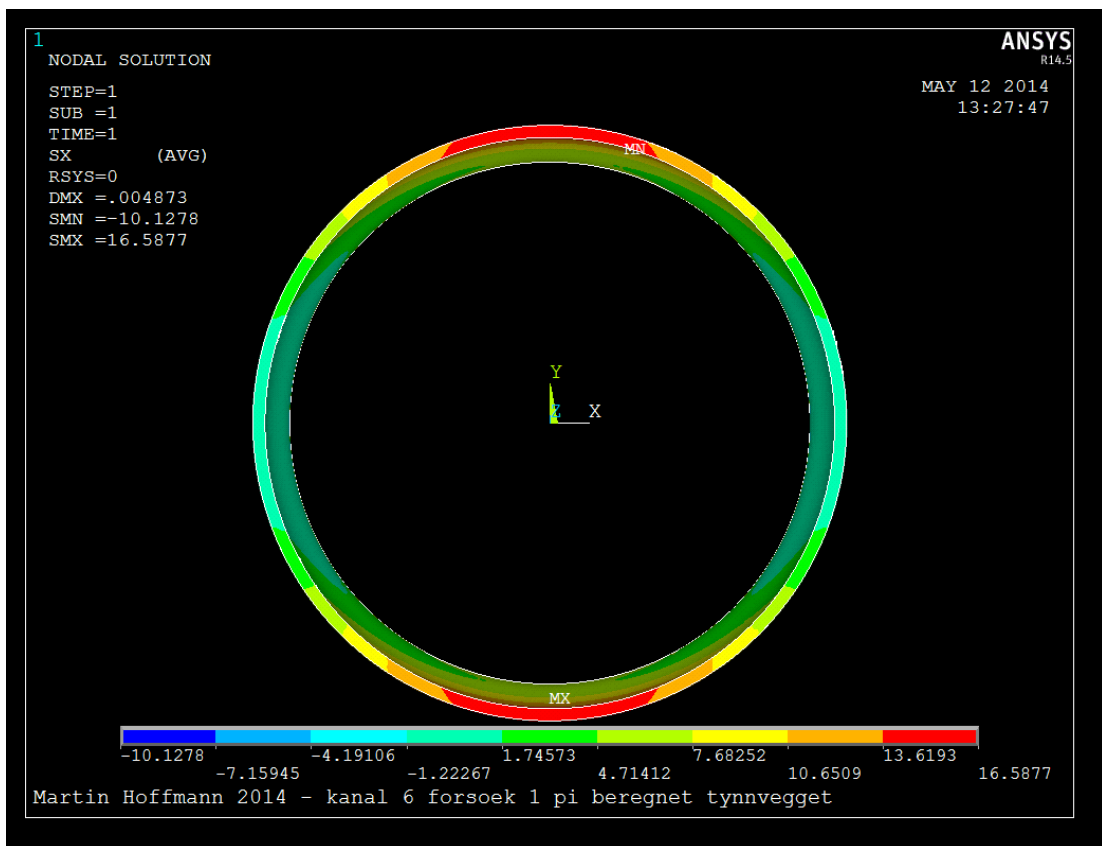
For DN100-rørene er forholdet mellom veggtykkelse og diameter så lav at tynnvegget teori kan benyttes. Til sammenligning kan vi se at verdiene for  $p_i$  beregnet etter tynn- og tykkvegget teori ikke avviker i like stor grad som for DN20-rørene.

Siden tynnvegget teori benyttes, har det kun blitt oppgitt den høyeste verdien for spenningen i rørveggen til DN100-rørene. Beregningene er gjort for kanal 6, der de største verdiene er målt.

Tabell 8.7 ANSYS beregnede spenninger ved kanal 6 DN100 rør

	$p_i$ beregnet tykkvegget	$\sigma$ ANSYS	$p_i$ beregnet tynnvegget	$\sigma$ ANSYS
Forsøk 1	0,784	17,386	0,748	16,5877
Forsøk 2	3,428	76,032	3,270	72,5157
Forsøk 3	1,622	35,9696	1,547	34,3064

Spenningene beregnet med FEM-modellen avviker svært lite fra håndberegningene. Avvikene kan skyldes små feil i elementoppdelingen i ANSYS. Dette kan forbedres ved å gjøre oppløsningen på elementene enda finere, men dette vil skape flere noder enn det som praktisk kan håndteres på datamaskinen som er brukt for beregningene.



Figur 7.15 Grafisk plott DN100 tynnvegget ANSYS

Siden det ikke er utført forsøk for rørdelene av karbonstål, må tilsvarende spenning i det kritiske punktet på DN20-røret med bend beregnes. Dersom vi antar et tilsvarende rør av materiale P235GH ved frostsprenning utsettes for det samme indre trykket som ved det kriteske punktet for det austenittiske røret DN20-røret med bend, vil spenningene i rørveggen være gitt ved ligning 5.5:

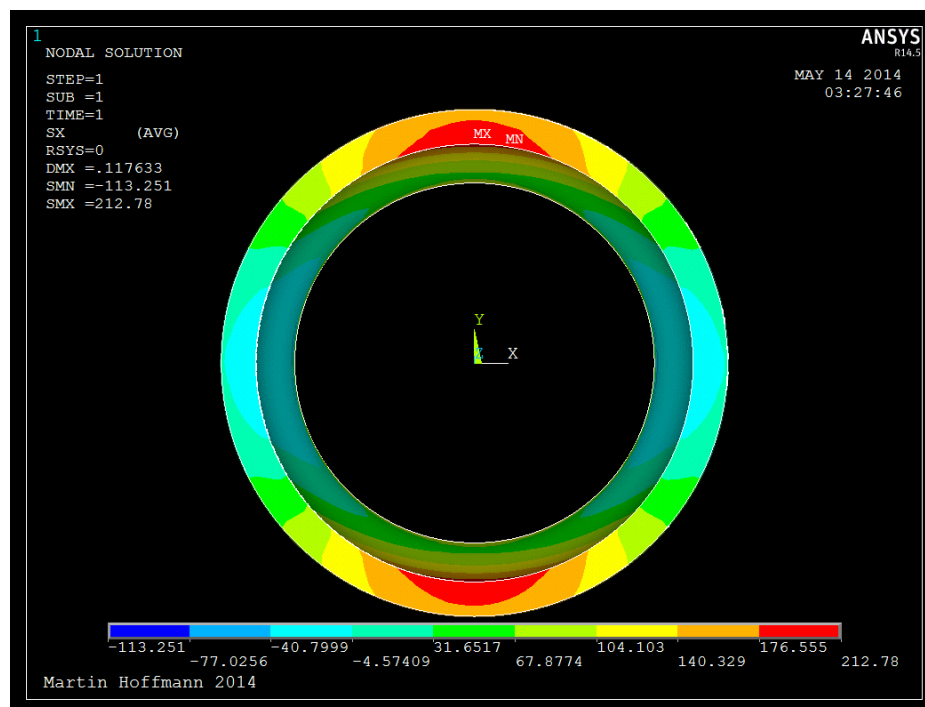
$$\sigma_t = \frac{\left[ \left( \frac{r_i}{r_y} \right)^2 + \left( \frac{r_i}{r} \right)^2 \right] \cdot p_i}{1 - \left( \frac{r_i}{r_y} \right)^2}$$

Der  $p_i = 38,184 \text{MPa}$  ,  $r_i = 11,15$ , og  $r_y = 13,45$

$$\sigma_{t,indre} = \frac{\left[ \left( \frac{11,15}{13,45} \right)^2 + 1 \right] \cdot 38,184}{1 - \left( \frac{11,15}{13,45} \right)^2} = 205,99 \text{MPa}$$

$$\sigma_{t,ytre} = \frac{\left[ \left( \frac{11,15}{13,45} \right)^2 \cdot 2 \right] \cdot 38,184}{1 - \left( \frac{11,15}{13,45} \right)^2} = 167,80 \text{MPa}$$

Dersom vi kontrollerer med FEM-modellen, ved å sette inn materialdata og dimensjoner for DN20-røret med P235GH finner får vi  $\sigma_{t,ytre} = 176,555$ , som er den høyeste verdien i det oransje området, og  $\sigma_{t,indre} = 212,78$  som er den høyeste verdien ved det røde området vist i figur 7.16



Figur 7.16 Grafisk plott DN20 P235GH tykkvegget ANSYS

## 8.7 Godkjenning mot Erokode

Designspenningen for materialene er 120MPa for det austenittiske stålet, og 150MPa for karbonstålet. I forsøkene er det benyttet rør av austenittisk stål. Spenningen ved den horisontale delen av DN-20røret med bend er funnet til å overskride dette. Forholdet mellom den designspenningen og høyeste målte spenningen er:

$$\frac{f_{1.4307}}{\sigma_{DN20,bend,max}} = \frac{120}{239,231} = 0,502$$

Dette er mindre enn 1, og kan altså ikke godkjennes. Det vil ved så høye spenninger forekomme flyt i stålet i dette punktet. Målingene i de andre punktene ligger langt under 120MPa og vil ikke være kritiske i forhold til designspenningen. Tilsvarende har vi for den beregnede største spenningen ved samme punkt i et DN20-rør med bend av materiale P235GH:

$$\frac{f_{P235GH}}{\sigma_{DN20,bend,max}} = \frac{150}{205,99} = 0,728$$

Det kan derfor antas at for samme rørdel i karbonstål, vil spenningen i den horisontale delen av røret før bendet på DN20-rørene overskride designspenningen.

## 8.8 Usikkerhet og feilkilder

Forsøkene er utført i flere omganger, og de beregnede resultatene er kontrollert gjennom både håndberegninger og FEM-analyse. Likevel vil det alltid være mulighet for menneskelige feil ved avlesninger av målinger.

### 8.8.1 Feil i antagelser

En av hovedantagelsene er at spenningene i aksiell retning er neglisjerbare. Dersom det er betydelige spenninger her, vil dette ha innvirkning på den beregnede tangentialspenningen. Siden strekkklappene er koblet i en halvbro, vil spenning i aksiell retning strekke den vertikale lappen, og tverrkontraksjonen vil trykke den horisontale lappen sammen. På grunn av likningen for strekkklapper, ser vi at forholdet mellom den målte utgangsspenningen og den påsatte spenningen vil synke, og vi vil anta lavere spenning enn det som faktisk er tilfelle.

### **8.8.2 Kontroll av testoppsett**

Måleutstyret er kalibrert ved å påsette en spenning fra en ekstern kilde for å endre spenningen i halvbroen. Det er ikke utført tester der rørdelene ble utsatt for en kjent last (e.g. ved å sveise igjen rørene og utsette de for et kjent trykk) slik at målingene kunne verifiseres mot et kjent indre trykk.

### **8.8.3 Feil på utstyr**

Måleforsterkeren som ble benyttet var gammel, og hadde dårlig kontakt på innkoblingene for hver kanal. Dette ga mye problemer i oppsettingen av utstyret, og ble i stor grad eliminert. Det kan likevel tenkes at dette, eller andre uoppdagede feil på utstyret kan ha gitt feilaktige utslag.

## 9. Prosesdiskusjon

Hovedmålet for oppgaven har vært å utrede og analysere effekten av frostsprengning i dreneringsrørene, og kontrollere resultatene mot den aktuelle standarden som er gjeldende der de faktiske rørene er i bruk. Da det ikke er noen lett tilgjengelig modell for hvordan isen oppfører seg når den ekspanderer i rørsystemer som er lukket i den ene enden, men åpen i den andre, er oppgaven i all hovedsak basert på de praktiske forsøkene, og mye av rapporten som skal produseres er avhengig av resultatene fra disse forsøkene.

### 9.1 Forsinkelser i forhold til arbeidsplan

Prosjektet kom i gang i midten av januar, etter møte hos COWI den 15. januar. Litteraturstudiet og gjennomgang av grunnleggende teori ble ferdig relativt fort, da mye av teorien var gjennomgått i det foregående semesteret. Rørdelene for de tidlige forsøkene ankom i begynnelsen av februar, og de tidlige forsøkene der ekspansjon ble forsøkt målt med skyvelære ble utført den 20. februar. Som forventet kunne det ikke trekkes noen slutninger for resultatene fra dette forsøket, da oppløsningen for målingene var alt for grove.

Resterende rørdeler for hovedforsøkene ankom Oslo rundt samme tid som de tidlige forsøkene ble hentet, og ble hentet slutten av februar. Her skulle jobben med å klargjøre disse for forsøkene starte, slik at forsøkene var ferdig utført i løpet av mars. På forhånd hadde jeg forhørt meg om det fantes måleutstyr og streklapper tilgjengelig på huset, noe det gjorde. Da måleforsterkeren som skulle brukes ble tatt frem, viste det seg i midlertid at det var noe feil med denne, og det var umulig å stille den mot et nullpunkt. Det ble etter konsultasjon med manualen for måleforsterkeren, oppdaget at det var en produksjonsfeil på kortet, der det manglet en kobling mot jord. Dette ble utbedret, men det tok totalt en uke. Da streklappene skulle kobles opp for testing, viste det seg at databladene for disse var borte, og det var ikke noe beskrivende modellnavn på selve streklappene som kunne identifisere de. HBM ble derfor kontaktet for å bestille nye streklapper. De forsikret at det tok noen få dager å få disse tilsendt, og det ble derfor besluttet å bestille nye streklapper for å sikre gode resultater. Det viste seg derimot å ta over to uker før bestillingen var ankommet. Deretter tok det en uke å sette opp streklapper på de austenittiske rørene, kalibrere og sette seg inn i testutstyret. Derfor kom ikke hovedforsøkene i gang før i April.

Som følge av dette ble det satt ytterligere begrensninger på rekkevidden av forsøkene, utover det som var planlagt, og det ble derfor ikke utført forsøk på P235GH-rørene.



## 9.2 Forsøk og resultater

Resultatene som kommer ut av forsøkene virker fornuftige, og stemmer godt overens med det forventede forløpet. Områdene der det oppstår høyest spenninger havner som forventet i midten av de rette rørene, og før bendet. Det antas i oppgaven at dette skyldes utviklingsforløpet til isen, og det settes opp en hypotese som stemmer overens med resultatene. Sammenligningen mellom de målte verdiene, det beregnede, forventede størrelsesforholdet for spenningene, og FEM-analysen tyder ikke på at det er gjort store beregningsfeil. De fleste resultatene ligger godt under designspenningen, og ved gjentatte forsøk endres ikke resultatene i stor grad. Unntaket er området før bendet for DN20-røret, der spenningen kommer over flytegrensen, og den beregnede spenningen øker for hver gjennomføring. Også dette stemmer overens med teorien, og tyder på at målingene er riktige.

## 9.3 Feilkilder og svakheter

Det er gjort antagelser og begrensninger som gir økt usikkerhet for resultatene. Det antas at aksialspenningen i røret er neglisjerbar siden røret er åpent i den ene enden, og at isen derfor ikke vil føre til store aksielle spenninger i røret. Det er ikke utført noen målinger for å bekrefte at dette er tilfellet. Aksiell spenning i røret vil på grunn av oppkoblingen i halvbroen, føre til at den målte spenningen i røret reduseres.

Måleutstyret er kalibrert, og testet ved å simulere en elektrisk spenningsendring ved hjelp av en ekstern spenningskilde. Det er ikke utført noen fysiske forsøk der testutstyret utsettes for en påkjenning som er kjent, slik at målingene kan verifiseres mot dette. I tillegg har det vært problemer med utstyret, og det har ikke vært anledning eller tid til å prøve med måleutstyr fra en annen leverandør.

Selv om målepunktene er satt på de områdene med forventet høyest spenning, og observasjonene i isen stemmer med dette, kan det være at de målte spenningene ikke er de høyeste som opptrer i røret.

## 10. Konklusjon og anbefalinger

Ut i fra målingene som er gjort i denne oppgaven, kan det konkluderes at frostsprengning i dreneringsrør er noe som må tas høyde for, og at fenomenet bør utredes videre. Resultatene fra forsøkene viser at risikoen for høye spenninger er størst i rørene med bend. Her kommer de målte spenningene over 200MPa, som er høyt over de 120MPa som er tillatt etter eurokoden 13480. Ved gjentatte forsøk, øker den målte ekspansjonen i dette punktet. Ved måling over lang tid forblir også den målte ekspansjonen høy i dette punktet, mens det i de andre målepunktene avtar ned mot opprinnelig verdi. Dette tyder på at det oppstår varig deformasjon i punktet, noe som fører til større ekspansjoner ved neste fryse syklus.

De resterende målepunktene ligger langt under den tillatte designspenningen, der det nest høyeste er midt på DN100-røret, som blir utsatt for i underkant av 70MPa. Når det måles over synker spenningene for alle kanalene (med unntak av kanal 1 som viser spenningen før bendet i DN20-røret med bend).

Det kan derfor med relativ sikkerhet konkluderes at de rette rørene kan godkjennes i forhold til NS-EN 13480, mens DN20-røret med bend får for høye spenninger.

### 10.2 Anbefalinger

Jeg vil anbefale at det utredes hvor fort vannkondens akkumuleres i dreneringsrørene, for å kartlegge hvor stor risikoen er for at dreneringsrørene fylles med vann når anlegget er i drift. Dersom dette skjer over lang tid, kan et enkelt tiltak være å periodisk tappe ut det kondenserte vannet fra dreneringsrørene. Videre vil jeg anbefale at det i benyttes rette dreneringsrør, uten bend, så langt det er mulig.

### 10.3 Videre arbeid

Det anbefales at temaet utforskes videre. Ved nye forsøk bør det benyttes en målebro av nyere, og bedre kvalitet enn den som ble benyttet i disse forsøkene. For å sikre at den høyeste spenningen i rørene er funnet, bør det utføres flere målinger langs røret for å kartlegge de kritiske punktene mer nøyaktig eksperimentelt. I tillegg bør det utføres målinger for å avgjøre om det er store spenninger i aksiell retning for rørene. For å verifisere måleresultatene, bør det utføres forsøk der rørene tettes i begge ender, og utsettes for et indre trykk ved at det pumpes veske eller gass inn. Derved kan målingene verifiseres mot teori for trykkanker.

## 11. Referanser

Hver kilde som er brukt i oppgaven har et eget nummer for litterære kilder , eller bokstav for kilder hentet fra nettet. Disse er henvist i teksten ved bruk av tilhørende nr. slik: o) eller tilhørende bokstav, slik: A)

### 11.1 Litteratur

- 1) Spenningsby, J 2014, *e-post og bilder*, COWI, Oslo.
- 2) Terjesen, G 2013, *TMP301 kompendium*, tilgjengelig fra NMBU, 2014
- 3) Annaratone, D 2010, *Pressure Vessel Design*, Springer-Verlag, Heidelberg
- 4) Rottmann, K 2006, *Matematisk formelsamling*, Spektrum forlag, Oslo.
- 5) Tipler, PA & Mosca, G 2008, *Physics*, W.H. Freeman and Company, New York
- 6) Line, DR 1990, *Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, Florida
- 7) NS-EN 13480-3:2012

### 11.2 Internett

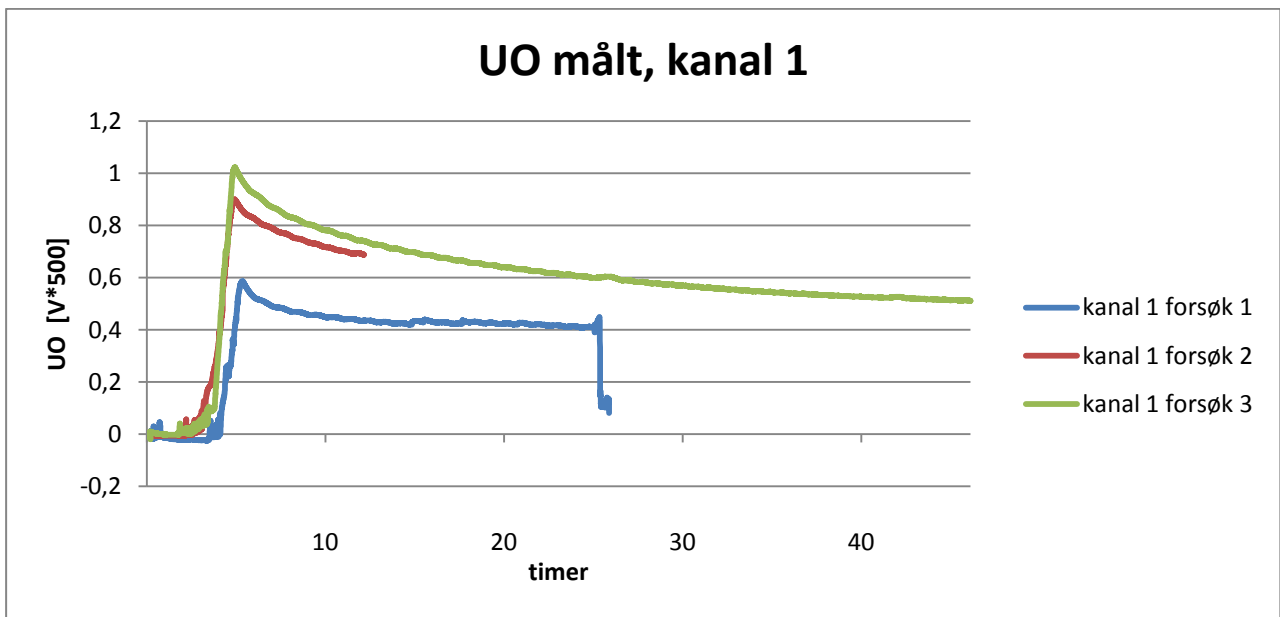
- A. Artikkel om lekkasje ved sjursøya, [www.dittoslo.no](http://www.dittoslo.no), 2014
- B. NMBU, visjoner og mål, [www.NMBU.no](http://www.NMBU.no)
- C. Chaplin, M, *water structure and science*, <http://www1.lsbu.ac.uk/water>, 2014
- D. European steel and alloy grades, [www.Steelnumber.com](http://www.Steelnumber.com), 2014

## 12. Vedlegg

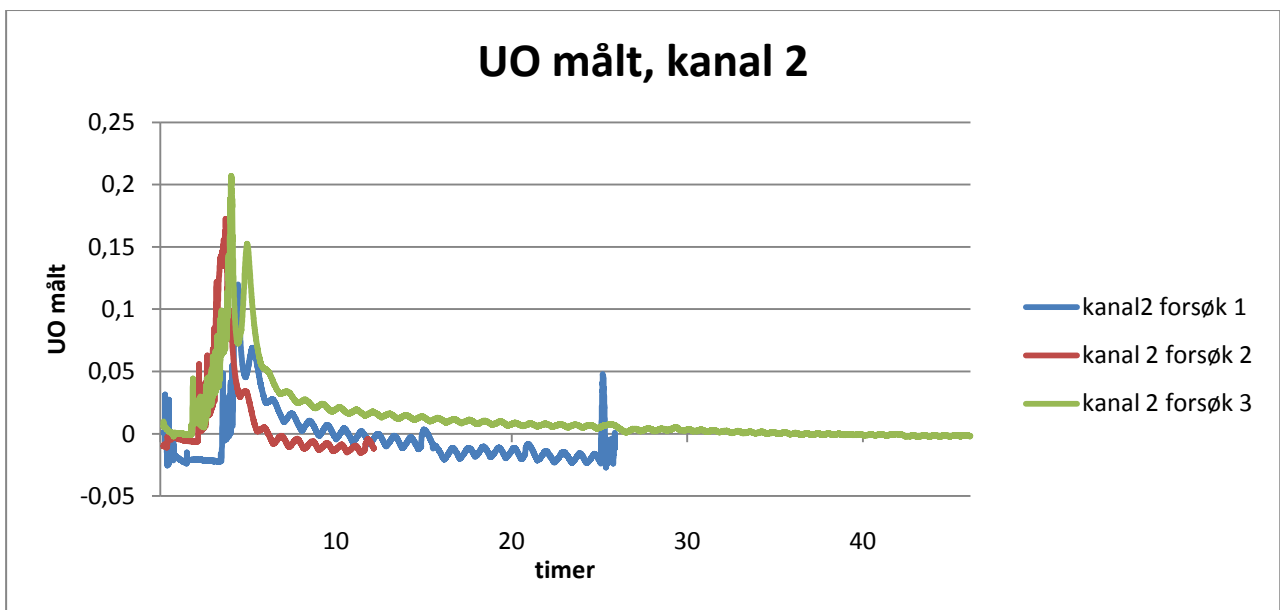
### Vedlegg A - Loggført ugangssepning

NB! Disse viser loggførte verdier. Faktiske verdier for UO i V fås ved å dividere med 500. Dette er på grunn av forsterkningen satt i måleforsterkeren.

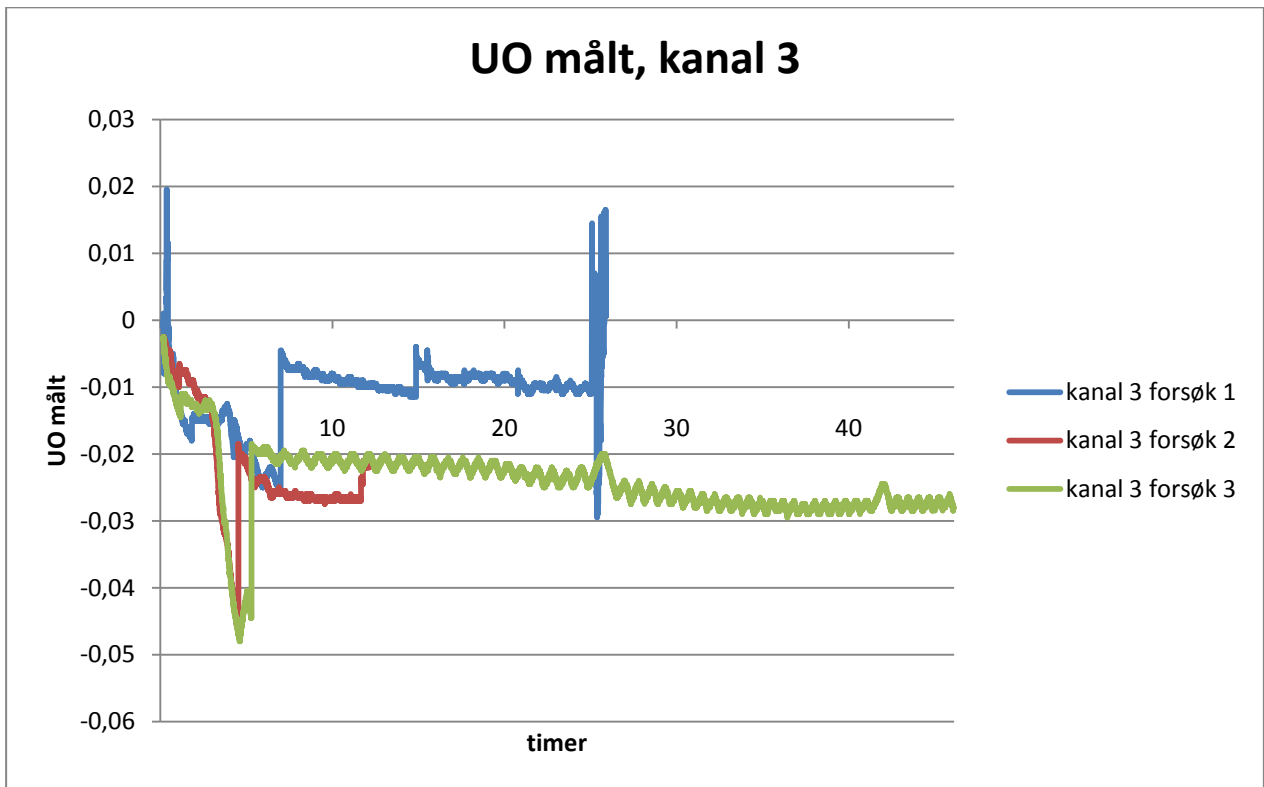
kanal 1



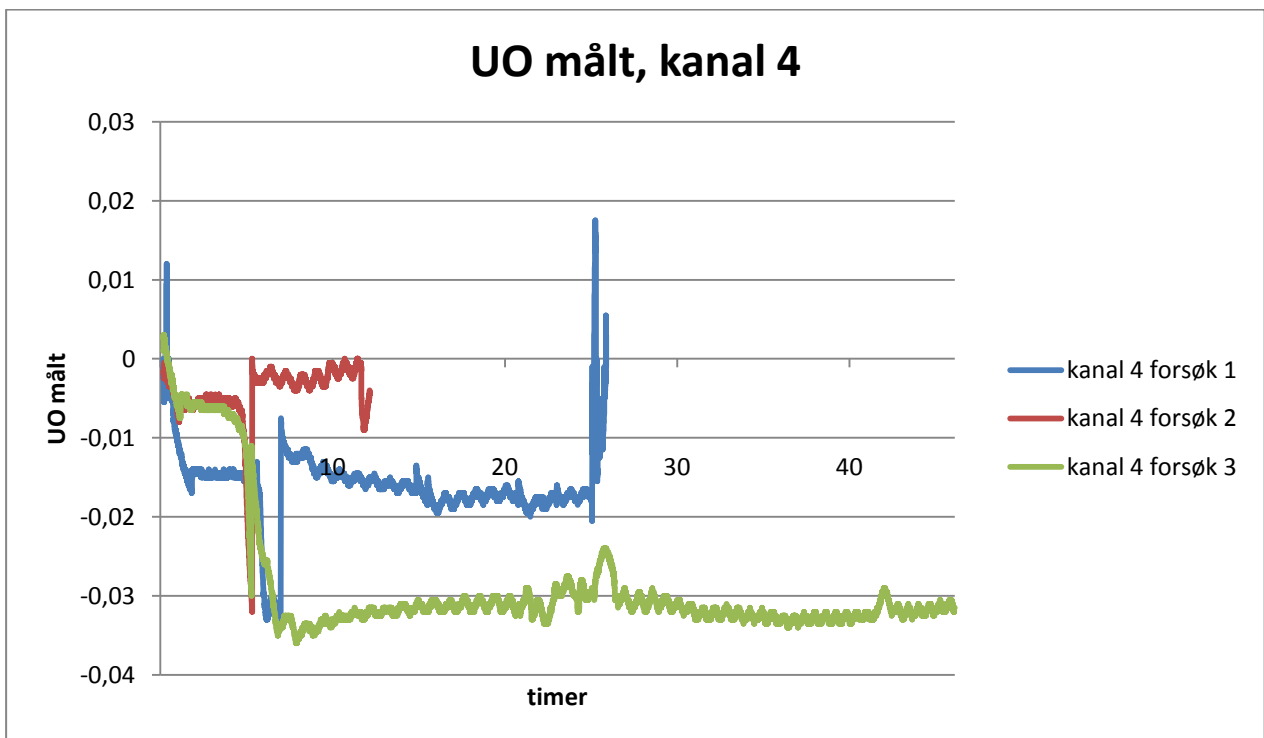
kanal 2



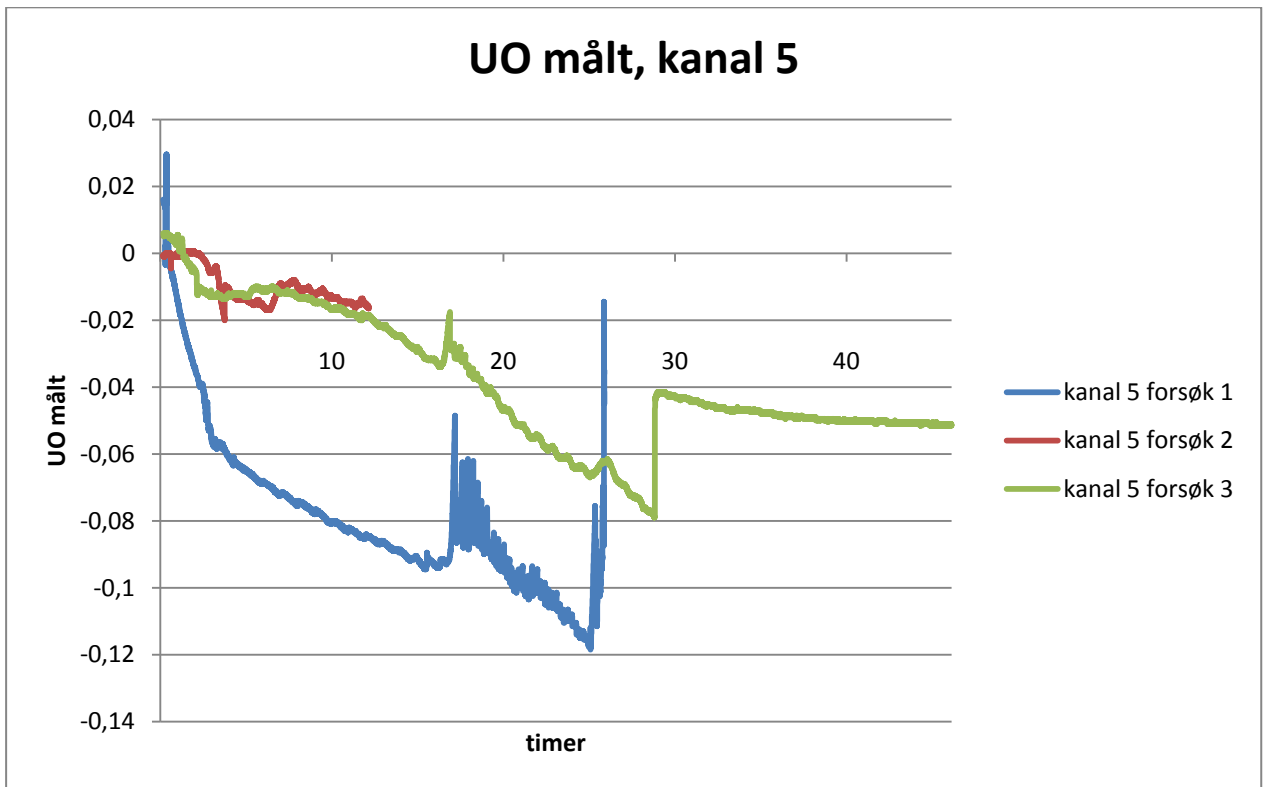
kanal 3



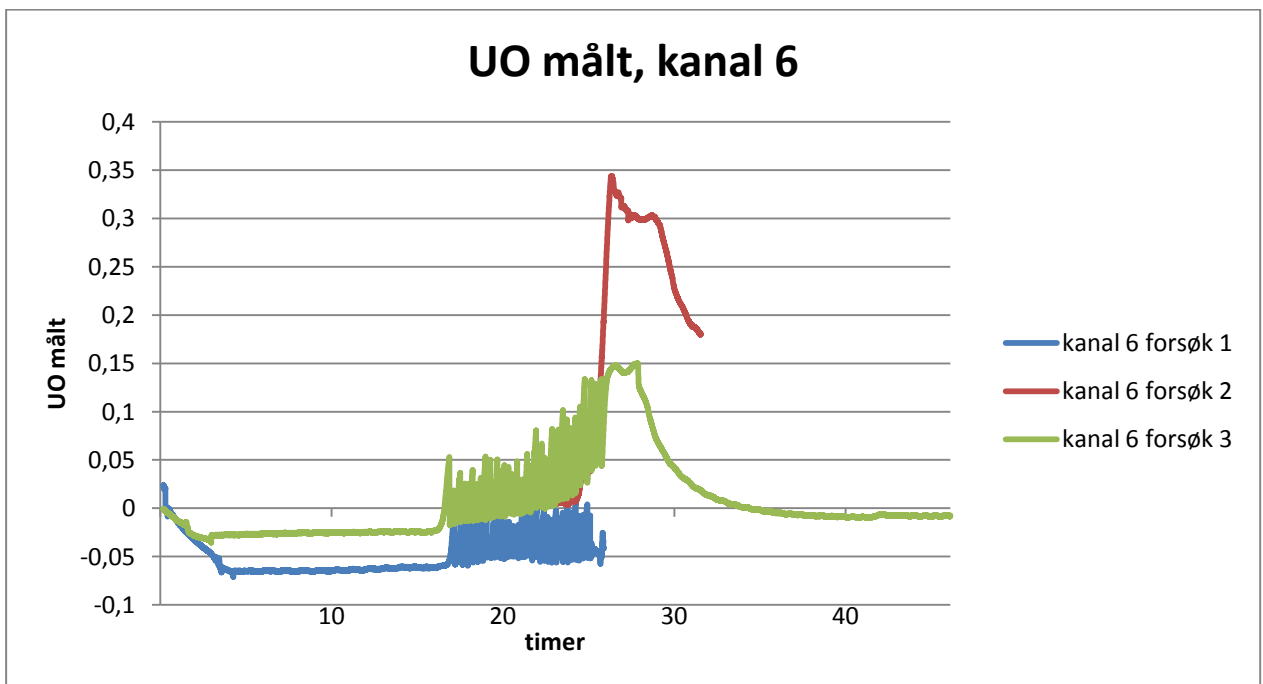
kanal 4



kanal 5

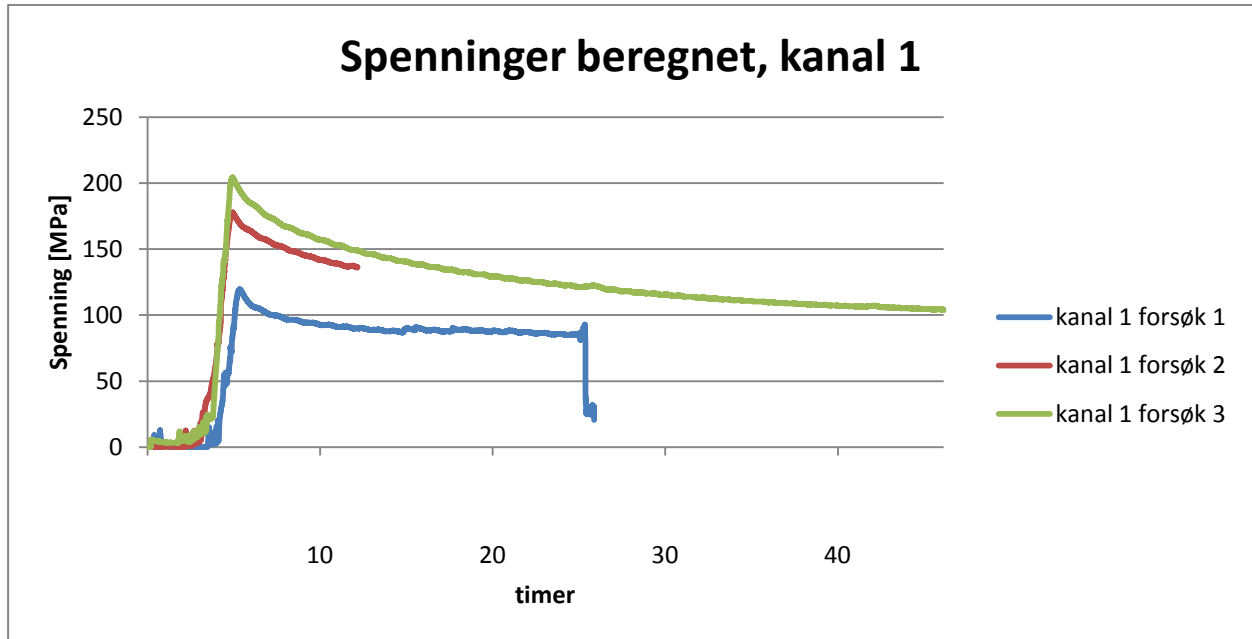


kanal 6

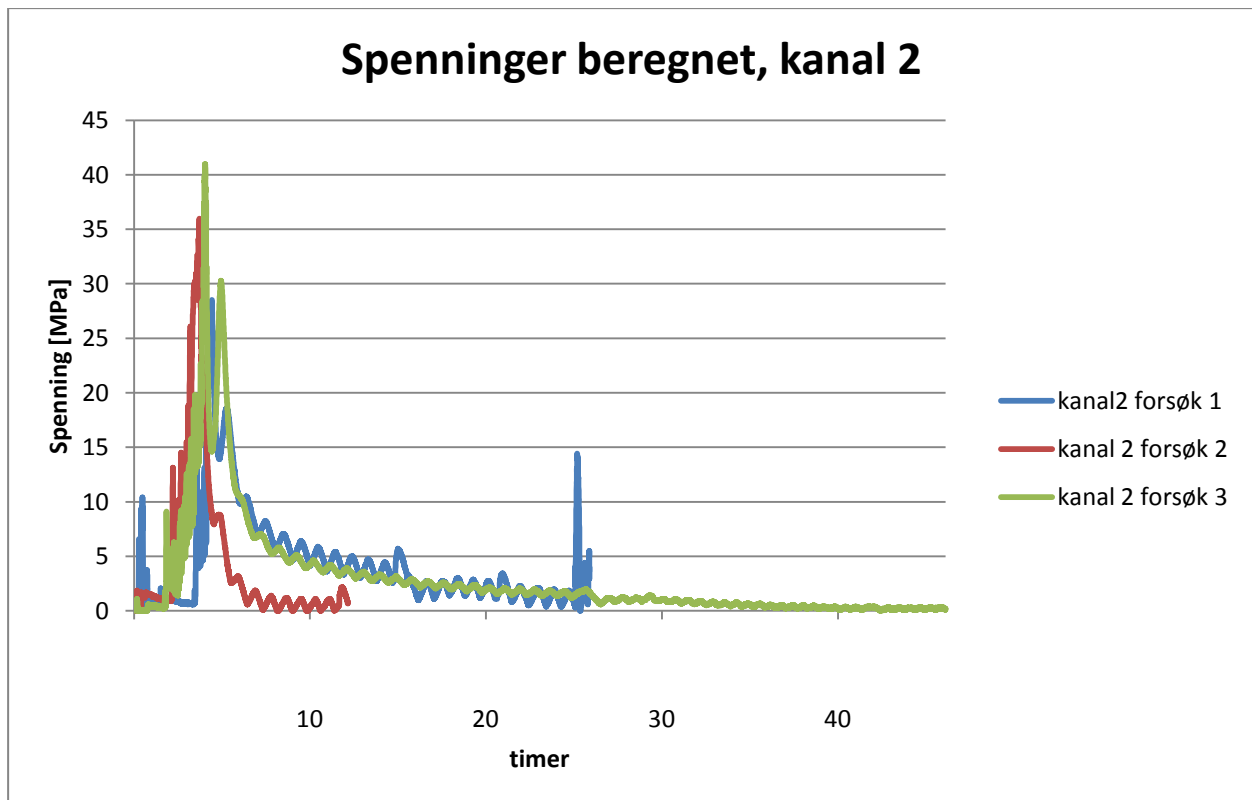


## Vedlegg B - Beregnede spenninger

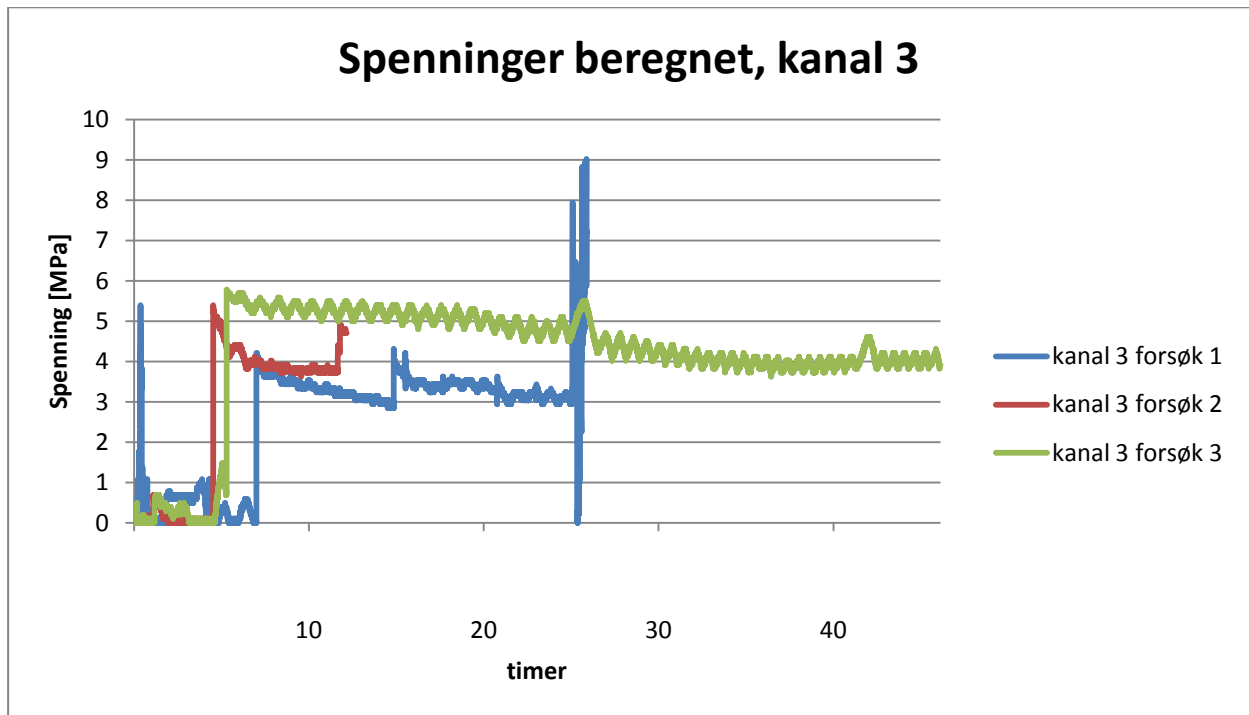
### Kanal 1



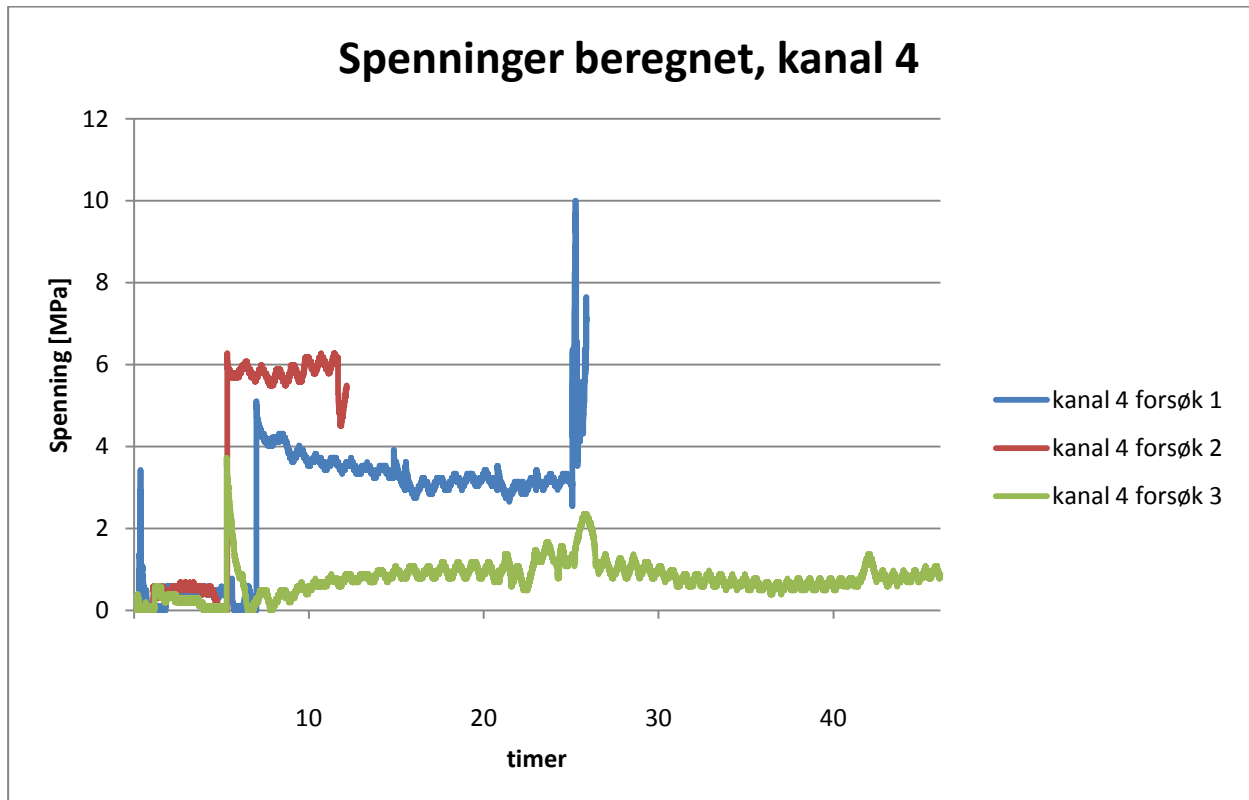
### Kanal 2



Kanal 3

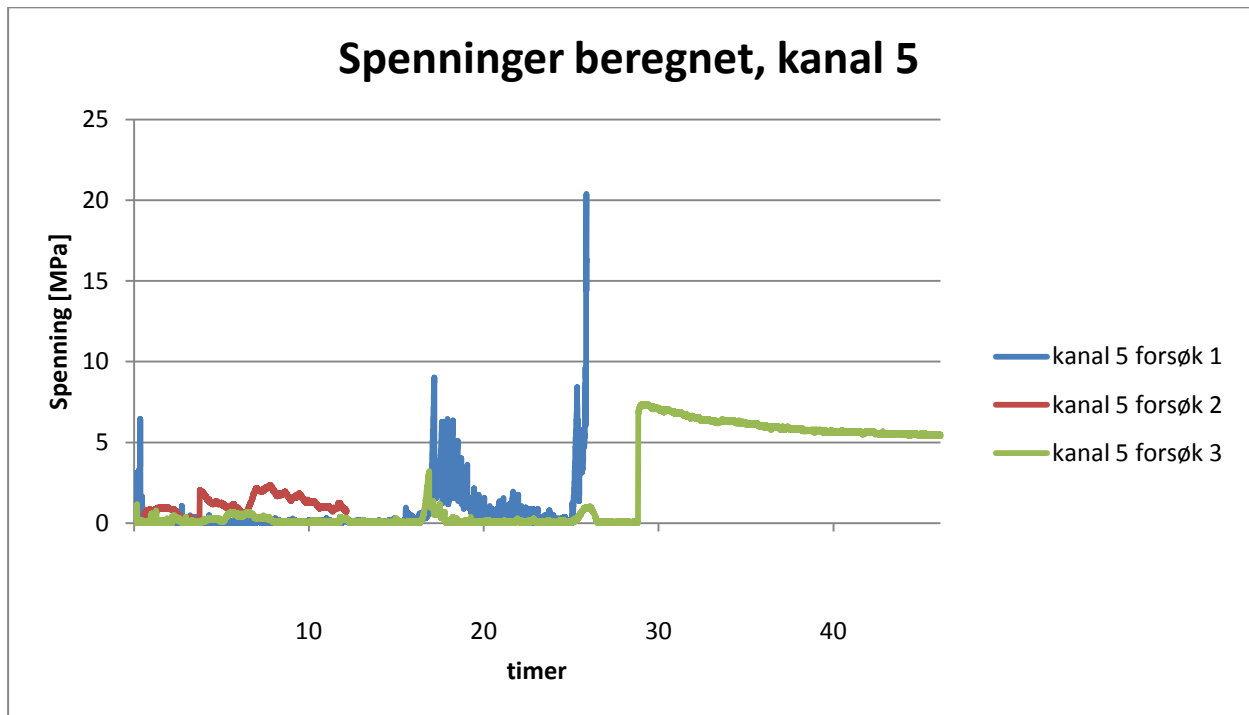


kanal 4

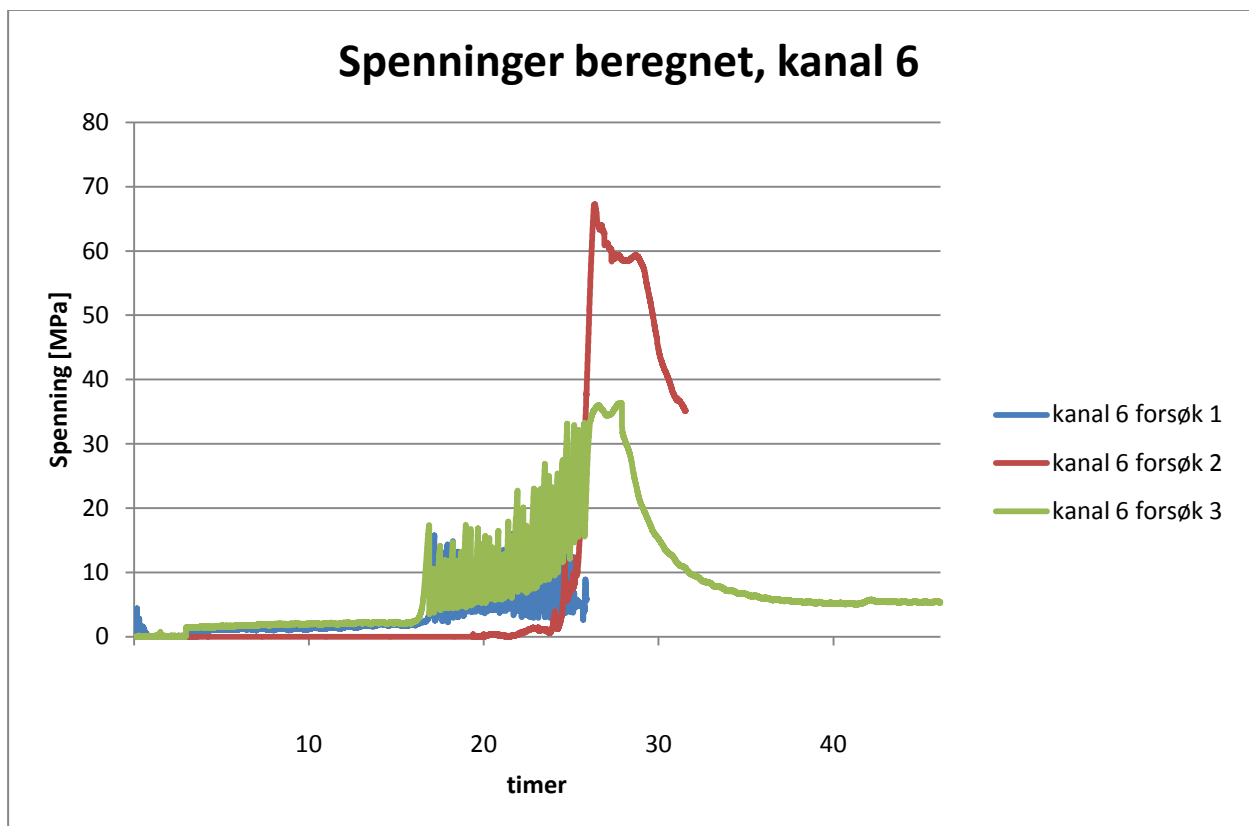




Kanal 5



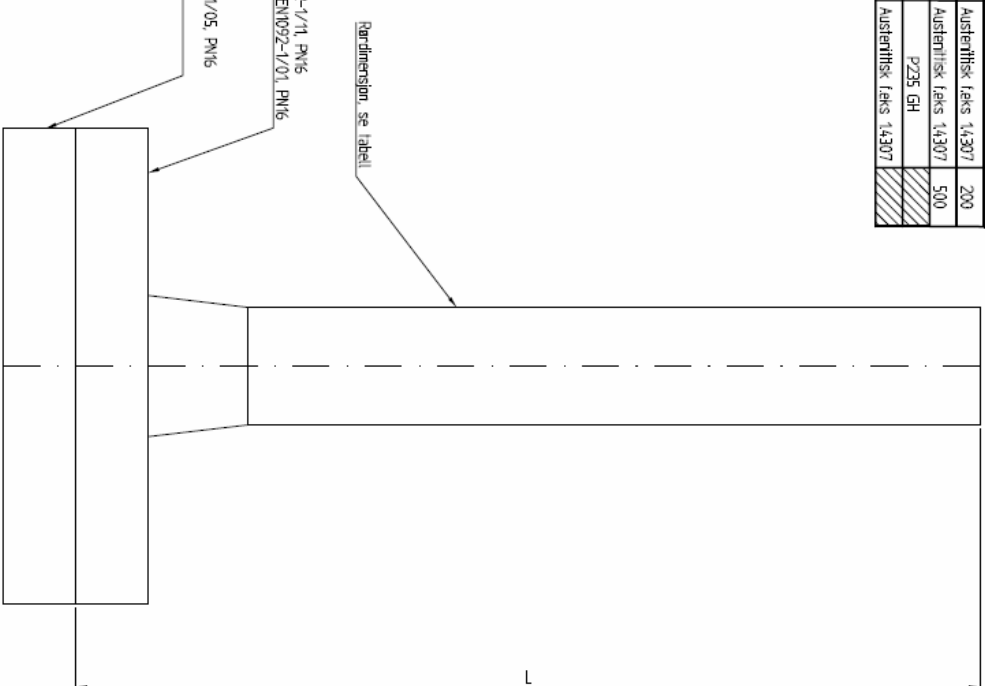
Kanal 6



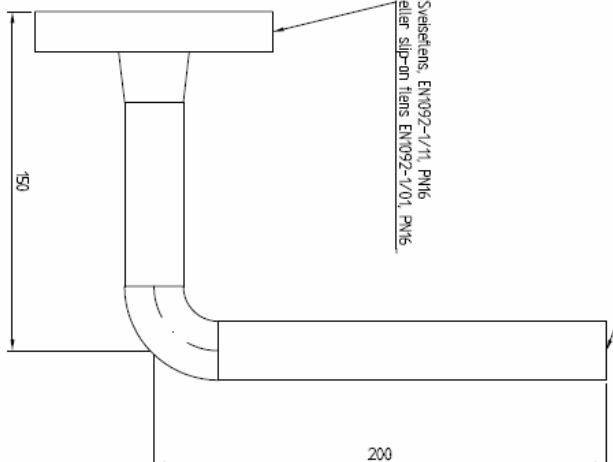
# Vedlegg C - teknisk tegning av rørdeler fra COWI

Spool nr.	Detail	Dimension Rør	Materiale	L
1	A	DN20 26.9x2.3	P235 GH	150
2	A	DN20 26.9x2.3	P235 GH	500
3	A	DN20 26.9x2.0	Austenitisk fæks 14.307	150
4	A	DN20 26.9x2.0	Austenitisk fæks 14.307	500
5	A	DN100 14.3x3.6	P235 GH	200
6	A	DN100 14.3x3.6	P235 GH	500
7	A	DN100 14.3x2.6	Austenitisk fæks 14.307	200
8	A	DN100 14.3x2.6	Austenitisk fæks 14.307	500
9	B	DN20 26.9x2.3	P235 GH	500
10	B	DN20 26.9x2.0	Austenitisk fæks 14.307	500

Detail: A



Detail: B



Sveisesertens, EN1092-1/11, PN16 eller slip-on tilens EN1092-1/01, PN16

Bindtilens, EN1092-1/05, PN16 karbonstål

Rørdimensjon, se tabell

Sveisesertens, EN1092-1/11, PN16 eller slip-on tilens EN1092-1/01, PN16

Smått sluss DN20

<b>COWI</b>	FROST I RØR
A050371	A050371
005	200

INDUSTRY & ENERGY OSLO

Genveien 88, Postboks 6412, Etensdald  
0405 Oslo, Norge  
Tlf: 02594

## Vedlegg D - ANSYS APDL script

```

!-----*****-----
!Test script for frostsprengning i pipes
!-----*****-----
!Header:
finish
/clear,all
/title, Martin Hoffmann 2014
!-----
! Data input
!-----
/prep7

! - legger inn materialdata:

ET,1,SOLSH190
MP,EX,1,201660
MP,PRXY,1,0.3
MP,DENS,1,7930

!-----
! Variabels
!-----
!Dimensjoner for profilene (SECNUM)
*SET,ri,11.45 !velg aktuell radius.
*SET,wt,2.0 !velg aktuell veggtykkelse
*SET,ilength,500 !indre lengde av kammeret
R,1,wt
!-----
! Geometr(y/ies)
!-----
/prep7
!lager sylinder ved hjelp av Cylind-funksjonen
CYLIND, ri, ri+wt, -ilength/2, ilength/2
!-----
! Mesh

```

```

!-----
/prep7
Esize,0.5      !elementstørrelsen satt til 0.5mm
vsweep,1,1,2  !mesher volumet
!-----
! DOF
!-----
FINISH
/SOL
da,1,all      !låser røret i ene enden - tilsvarer flensen.

csys,1
asel,s,loc,x,ri
aplot
csys,0
sfa,all,1,pres,22.732  !setter på et indre trykk tilsvarende beregnet pi
allsel,all
!-----
! Solver settings
!-----
/solu
ANTYPE,STATIC  !Static analysis defined
solve          !Solving the system
!-----
! Results
!-----
FINISH
/POST1
PLNSOL, s,X, 0,1.0  !plotter spenninger i x-retning
                   !dette tilsvarer tangentialspenningen
                   !i punktene øverst og nederst på røret

PLNSOL, u,x,0,1.0  !plotter forskyvninger i x-retning
                   !tilsvarende endring i radie ved punktene
                   !til høyre og venstre i plottet.

```



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

Postboks

5003