

# Måling av pumpevirkningsgrad ved hjelp av termodynamisk metode

**Gudrun Ljones**

Master i produktutvikling og produksjon

Oppgaven levert: Juni 2009

Hovedveileder: Torbjørn Kristian Nielsen, EPT

Biveileder(e): Ole Gunnar Dahlhaug, EPT  
Sigve Gjerstad, Frank Mohn Flatøy AS



# Oppgavetekst

## Bakgrunn

Optimalisering av virkningsgrad i turbomaskiner har alltid vært viktig. I de seinere år er fokuset økt både grunnet økte utslipp av avgasser til atmosfære og grunnet økte kostnader ved lave virkningsgrader. Vanligvis blir virkningsgrad beregnet på grunnlag av målt mekanisk effekt tilført pumpe og avgitt hydraulisk effekt fra pumpe. For enkelte av Frank Mohn Flatøy AS sine pumper vil dette ikke være mulig fordi mekanisk tilført effekt ikke lar seg måle. Studenten skal for disse applikasjonene identifisere alternative målemetoder for å bestemme pumpevirkningsgrad, og anbefale mulige målemetoder som kan brukes. I tillegg skal studenten lage et system for termodynamisk virkningsgradsmåling. Studenten skal sette seg inn i eksisterende hardware og software som har vært brukt med probene for termodynamisk virkningsgradsmåling. Type prober og virkemåte skal etableres for videre å kunne spesifisere og kjøpe inn ny hardware og software til prober. Hovedmålet med oppgaven er at studenten skal ved hjelp av ny hardware og software bygge, teste og verifisere et komplett nytt termodynamisk virkningsgradsmålings utstyr for integrering på Frank Mohn Flatøy AS sin teststand for pumper.

## Mål

Måle virkningsgrad på en sentrifugalpumpe ved hjelp av termodynamisk metode.

Oppgaven bearbeides ut fra følgende punkter:

1. Etablere metode for termodynamisk virkningsgradsmåling av en pumpe
2. Planlegge instrumentering og gjennomføring
3. Gjennomføre målinger på Frank Mohn Flatøys teststasjon
4. Evaluere usikkerheten i målingen og sammenligne mot eksisterende målemetode

Oppgaven gjennomføres i samarbeid med Frank Mohn Flatøy AS.

Oppgaven gitt: 16. januar 2009

Hovedveileder: Torbjørn Kristian Nielsen, EPT





## MASTEROPPGAVE

for

Gudrun Ljones

Våren 2009

### **Måling av pumpevirkningsgrad ved hjelp av termodynamisk metode** *Measurement of pump efficiency by thermodynamic method*

#### **Bakgrunn**

Optimalisering av virkningsgrad i turbomaskiner har alltid vært viktig. I de seinere år er fokuset økt både grunnet økte utslipp av avgasser til atmosfære og grunnet økte kostnader ved lave virkningsgrader. Vanligvis blir virkningsgrad beregnet på grunnlag av målt mekanisk effekt tilført pumpe og avgitt hydraulisk effekt fra pumpe. For enkelte av Frank Mohn Flatøy AS sine pumper vil ikke dette være mulig fordi mekanisk tilført effekt ikke lar seg måle. Studenten skal for disse applikasjonene identifisere alternative målemetoder for å bestemme pumpevirkningsgrad, og anbefale mulige målemetoder som kan brukes. I tillegg skal studenten lage et system for termodynamisk virkningsgradsmåling. Studenten skal sette seg inn i eksisterende hardware og software som har vært brukt med probene for termodynamisk virkningsgradsmåling. Type prober og virkemåte skal etableres for å videre kunne spesifisere og kjøpe inn ny hardware og software til prober. Hovedmålet med oppgaven er at studenten skal ved hjelp av ny hardware og software bygge, teste og verifisere et komplett nytt termodynamisk virkningsgradsmålings utstyr for integrering på Frank Mohn Flatøy AS sin teststand for pumper.

#### **Mål**

Måle virkningsgrad på en sentrifugalpumpe ved hjelp av termodynamisk metode

#### **Oppgaven bearbeides ut fra følgende punkter:**

1. Etablere metode for termodynamisk virkningsgradsmåling av en pumpe
2. Planlegge instrumentering og gjennomføring
3. Gjennomføre målinger på Frank Mohn Flatøys teststasjon
4. Evaluere usikkerhet i målingen og sammenligne mot eksisterende målemetode

Oppgaven gjennomføres i samarbeid med Frank Mohn Flatøy AS

Senest 14 dager etter utlevering av oppgaven skal kandidaten levere/sende instituttet en detaljert fremdrift- og evt. forsøksplan for oppgaven til evaluering og evt. diskusjon med faglig ansvarlig/ veiledere. Detaljer ved evt. utførelse av dataprogrammer skal avtales nærmere i samråd med faglig ansvarlig.

Besvarelsen redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag både på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse etc. Ved utarbeidelsen av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelsen legges det stor vekt på at resultatene er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte, og at de er diskutert utførlig.

Alle benyttede kilder, også muntlige opplysninger, skal oppgis på fullstendig måte. (For tidsskrifter og bøker oppgis forfatter, tittel, årgang, sidetall og evt. figurnummer.)

Det forutsettes at kandidaten tar initiativ til og holder nødvendig kontakt med faglærer og veileder(e). Kandidaten skal rette seg etter de reglementer og retningslinjer som gjelder ved alle fagmiljøer som kandidaten har kontakt med gjennom sin utførelse av oppgaven, samt etter eventuelle pålegg fra Institutt for energi- og prosesssteknikk.

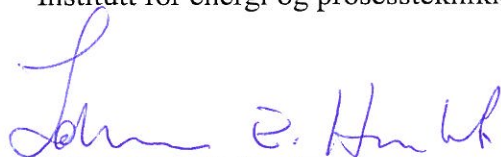
I henhold til "Utfyllende regler til studieforskriften for teknologistudiet/sivilingeniørstudiet" ved NTNU § 20, forbeholder instituttet seg retten til å benytte alle resultater i undervisnings- og forskningsformål, samt til publikasjoner.

Ett -1 komplett eksemplar av originalbesvarelsen av oppgaven skal innleveres til samme adressat som den ble utlevert fra. (Det skal medfølge et konsentrert sammendrag på maks. en maskinskrevet side med dobbel linjeavstand med forfatternavn og oppgavetittel for evt. referering i tidsskrifter).

Til Instituttet innleveres to - 2 komplette, kopier av besvarelsen. Ytterligere kopier til evt. medveiledere/oppgavegivere skal avtales med, og evt. leveres direkte til, de respektive.

Til instituttet innleveres også en komplett kopi (inkl. konsentrerte sammendrag) på CD-ROM i Word-format eller tilsvarende.

Institutt for energi og prosesssteknikk, 12. januar 2009



Johan E. Hustad  
Instituttleder



Torbjørn K. Nielsen  
Faglærer/veileder

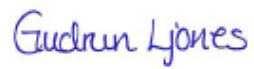
Medveiledere: Ole Gunnar Dahlhaug

## Forord

Oppgaven som presenteres her er utført ved Vannkraftlaboratoriet, Institutt for energi- og prosessteknikk, NTNU og Frank Mohn Flatøy AS.

Takk til professor Torbjørn K. Nielsen, 1. amanuensis Ole Gunnar Dahlhaug, stipendiat Jørgen Ramdal, stipendiat Pål-Tore Storli og avdelingsingeniør Joar Grilstad ved Vannkraftlaboratoriet. Ved Frank Mohn Flatøy AS ønsker jeg å takke Sigve Gjerstad, Wollert Bjørndal, Davy Espetvedt og personellet ved testavdelingen.

Trondheim 12.06.2009



---

Gudrun Ljones

## Sammendrag

Målet med denne oppgaven er å måle pumpevirkningsgrad ved hjelp av termodynamisk metode. Termodynamisk metode måler strømningsstapene over en hydraulisk strømningsmaskin. For strømningsmaskiner med løftehøyde over 100 m ligger usikkerheten mellom 0,5-1,0 % i følge ISO 5198.

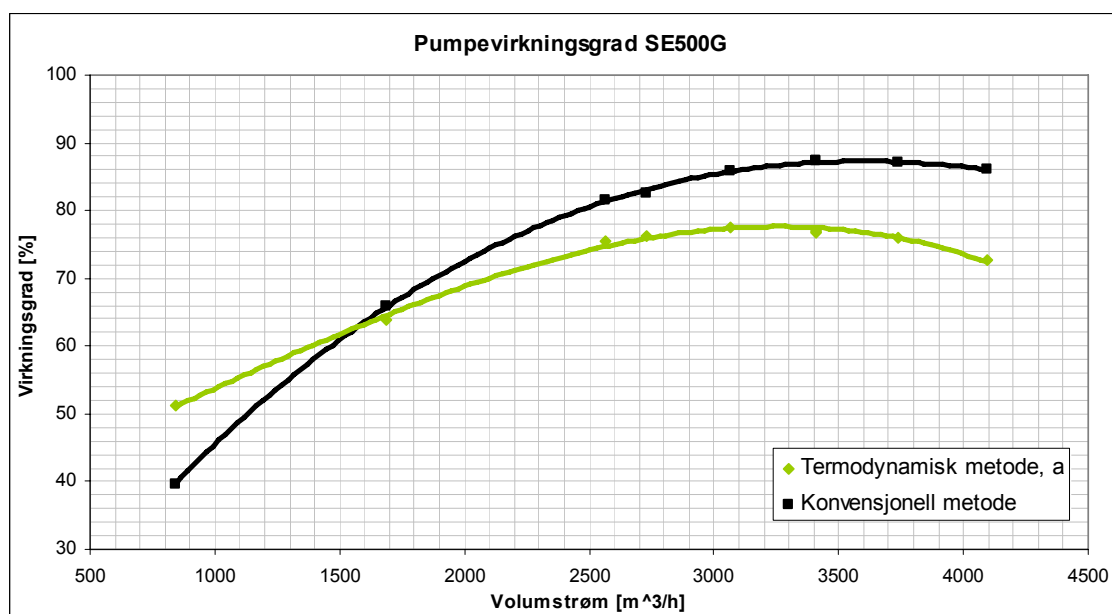
Pumpen målingene er utført på er en neddykket elektrisk sjøvannsløftepumpe, fra Frank Mohn Flatøy AS. Dette er en sentrifugalpumpe med et kort aksielt innløp. Målingene er utført ved Frank Mohn Flatøy AS sin prøvestand.

To utfordringer er knyttet til plassering av målepunkt på leveringssiden til denne pumpen. Pumpen er neddykket i en testtank under test, og den drives av en oljefylt elektromotor som er integrert i pumpekonstruksjonen. Som en følge av disse utfordringene er det valgt å benytte flere målepunkter enn det som er vanlig for termodynamisk metode.

Pumpens virkningsgrad er også målt med konvensjonell metode hvor tilført elektrisk effekt og avgitt hydraulisk effekt måles. Instrumentering til konvensjonell målemetode er standard instrumentering for testriggen som er brukt.

Logging av måledata ble gjennomført i 8 driftspunkt med to logger i designpunktet.

Resultatene fra den termodynamiske målemetoden sammenlignes med resultatene fra konvensjonell målemetode. Måleusikkerheten i den termodynamiske metoden er beregnet. Forventet virkningsgrad er 87 % ut fra tidligere tester med konvensjonell metode på samme Pumpe. Resultatene fra termodynamisk og konvensjonell metode er presentert i figuren under. Den konvensjonelle metoden gir en virkningsgrad på  $\eta=87,2\%$  i beste punkt, mens virkningsgraden fra den termodynamiske metoden er  $\eta=77,5\%$  i beste punkt. Dette er et avvik på 9,7 %.





## Måling av pumpevirkningsgrad ved hjelp av termodynamisk metode

---

Måleusikkerheten for den termodynamiske metoden er innenfor kravene fra ISO 5198, se tabellen under.

Testpunkt			2	3	4	5	6	7	8	9	10
Virkningsgrad	$\eta_h$	%	51.3	63.9	75.4	76.3	77.5	77.1	76.8	76.1	72.7
Usikkerhet	$f(\eta_h)$	%	0.78	0.84	0.89	0.92	0.88	0.84	0.79	0.82	0.79

Dette tyder på at det er en systematisk feil i den termodynamiske metoden. Den systematiske feilen er antakelig i testoppsettet for temperaturmålepunktet på leveringssiden av pumpen. Entalpien holdes ikke konstant ved trykkreduksjon i målepunktet.

## Abstract

The objective of this thesis is measurement of pump efficiency by thermodynamic method. Flow losses over a pump are measured by thermodynamic method. When the head is over 100 mlc the accuracy is between 0,5-1,0 % according to ISO 5198.

The pump which the measurement is carried out on is an electrical submerged pump, by Frank Mohn Flatøy AS. This is a centrifugal pump with an axial suction side. The measurements are performed at Frank Mohn Flatøy AS.

There are two main challenges due to the positioning of the measurement points at the delivery side of the pump. The pump is submerged during the test, and it is driven by an oil filled electric motor which is integrated in the pump construction. As a consequence of this it was decided use several more measurement points than common for thermodynamic method.

The pump efficiency will also be measured by conventional method, with measurements of input and output power. Instrumentation to conventional method is standard instrumentation on the test loop.

Measurements are logged at 8 different test points, with two measurements at design flow.

The results from both methods are compared and the accuracy for the thermodynamic method are analysed. The expected efficiency is 87 % due to previous tests by conventional method. By conventional method the efficiency is  $\eta=87,2$  %, and by thermodynamic method  $\eta=77,5$  % at best efficiency point. The difference in efficiency is 9,7 %.

The accuracy in the thermodynamic method is within the requirement by ISO 5198. The results are shown the table below.

Test point			2	3	4	5	6	7	8	9	10
Efficiency	$\eta_h$	%	51.3	63.9	75.4	76.3	77.5	77.1	76.8	76.1	72.7
Accuracy	$f(\eta_h)$	%	0.78	0.84	0.89	0.92	0.88	0.84	0.79	0.82	0.79

This indicates that there is a systematic error in the thermodynamic measurement. The systematic error is probably in the measurement arrangements at the test point at the delivery side. When the pressure is reduced at this test point, the enthalpy also changes.

## Innholdsfortegnelse

Forord .....	iii
Sammendrag .....	iv
Abstract .....	vi
Innholdsfortegnelse .....	vii
Vedlegg .....	viii
Figurliste .....	ix
Tabelliste .....	x
Symbolliste .....	xi
1 Innledning .....	1
2 Bakgrunnsteori .....	2
2.1 Virkningsgradsmåling .....	2
2.2 Termodynamisk virkningsgradsmåling .....	4
2.2.1 Målemetoder .....	6
2.2.2 Spaltevannstap .....	7
2.3 Måleusikkerhet .....	8
3 Forberedelse og gjennomføring av målinger .....	9
3.1 Beskrivelse av målearrangement og forberedelser .....	10
3.1.1 Testtrigg .....	10
3.1.2 Utstyr og instrumenter til termodynamisk metode .....	11
3.1.3 Måleoppsett for termodynamisk metode .....	12
3.2 Klargjøring og gjennomføring av målinger .....	16
3.2.1 Klargjøring .....	16
3.2.2 Gjennomføring .....	17
3.3 Bearbeiding av data .....	17
4 Resultater .....	19
4.1 Virkningsgrad .....	19
4.2 Måleusikkerhet .....	22
5 Sammenligning av termodynamisk og konvensjonell metode .....	24
6 Diskusjon .....	27
6.1 Virkningsgrad .....	27
6.2 Måleusikkerhet .....	27
6.3 Testoppsett .....	27
6.3.1 Termometer .....	27
6.3.2 Trykksensorer .....	28
6.3.3 Volumstrøm forbi termometer .....	28
6.3.4 Måleoppsettet .....	28
7 Konklusjon .....	29
8 Videre arbeid .....	30
9 Referanseliste .....	31

## Vedlegg

- A. Ligninger for usikkerhetsanalyse
- B. Kalibreringssertifikat SBE38, serienummer 0098-0100
- C. Utstysliste for termodynamisk metode
- D. Kotehøyder i målepunktene
- E. Maskintegning og stykkliste for mekaniske overganger målepunkt 2-2
- F. LabVIEW
- G. Prosedyre for termodynamisk metode
- H. Målte verdier og utregninger termodynamisk metode
- I. Målte verdier og utregninger konvensjonell metode

## Figurliste

Figur 2.1 hs-diagram .....	5
Figur 2.2 hs-diagram med struping .....	7
Figur 3.1 a) SE-pumpe, b) Snitt av SE-pumpe [7, 8] .....	9
Figur 3.2 Testtrigg for SE-pumpe .....	10
Figur 3.3 Måleprobe .....	11
Figur 3.4 Oppsett av måleinstrumenter .....	12
Figur 3.5 Målepunkter og måleinstrumenter .....	13
Figur 3.6 Utsnitt av pumpetegning [13] .....	14
Figur 3.7 Testoppsett for målepunkt 2-2 inni testtank .....	15
Figur 3.8 Måleprobe: flens med rør .....	15
Figur 4.1 Temperaturdifferanse .....	19
Figur 4.2 Virkningsgradskurver .....	21
Figur 4.3 Usikkerhetsberegning for kurve a, testpunkt 8 .....	23
Figur 5.1 Skisse av SE-pumpe med målepunktene .....	24
Figur 5.2 hs-diagram spesifikk mekanisk energi .....	25
Figur 5.3 hs-diagram for $\Delta T$ .....	25
Figur 5.4 hs-diagram $p'_{2-2}$ .....	26
Figur 7.1 Pumpevirkningsgrad .....	29

## Tabelliste

Tabell 3.1 Designdata for SE-pumpen .....	9
Tabell 3.2 Spesifikasjoner for SBE38 [10] .....	11
Tabell 3.3 Spesifikasjoner for P8AP [11] .....	11
Tabell 3.4 Usikkerhet i trykksensorene i følge kalibrering .....	12
Tabell 3.5 Oversikt over måleinstrumenter i målepunktene .....	13
Tabell 3.6 Spesifikasjoner for "kaldt rent vann" [6] .....	17
Tabell 4.1 Temperatur og trykk ved temperaturmålepunktene .....	19
Tabell 4.2 Termodynamisk virkningsgrad, metode a .....	20
Tabell 4.3 Termodynamisk virkningsgrad, metode b .....	20
Tabell 4.4 Termodynamisk virkningsgrad, metode c .....	20
Tabell 4.5 Konvensjonell virkningsgrad .....	20
Tabell 4.6 Usikkerhet i termodynamisk virkningsgrad, metode a .....	22
Tabell 4.7 Usikkerhet i termodynamisk virkningsgrad, metode b .....	22
Tabell 4.8 Usikkerhet i termodynamisk virkningsgrad, metode c .....	22
Tabell 5.1 Spesifikk mekanisk energi .....	24
Tabell 5.2 $\Delta T$ .....	25
Tabell 5.3 $p'_{2-2}$ .....	26
Tabell 5.4 $\eta$ ved korleksjon av $\Delta T$ og $p'_{2-2}$ .....	26

## Symbolliste

Parameter	Enhet	Beskrivelse
a	$10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$	Isotermisk faktor
$C_p$	J/kgK	Spesifikk varmekapasitet
c	m/s	Hastighet
E	J/kg	Spesifikk energi
$E_h$	J/kg	Spesifikk hydraulisk energi
$E_h \text{ kinetisk} = E_{hc}$	J/kg	Spesifikk hydraulisk hastighetsenergi
$E_h \text{ potensiell} = E_{mz}$	J/kg	Spesifikk hydraulisk potensiell energi
$E_h \text{ trykk} = E_{mp}$	J/kg	Spesifikk hydraulisk trykknenergi
$E_{\text{clearance}}$	J/kg	Spesifikk energi i spaltevannet
$E_m$	J/kg	Spesifikk mekanisk energi
$\delta E_m$	J/kg	Spesifikk energi i spaltevannet
$E_m \text{ clearance}$	J/kg	Spesifikk mekanisk energi i spaltevannet
$E_m \text{ kinetisk} = E_{mc}$	J/kg	Spesifikk mekanisk hastighetsenergi
$E_m \text{ potensiell} = E_{mz}$	J/kg	Spesifikk mekanisk potensiell energi
$E_m \text{ termisk} = E_{mT}$	J/kg	Spesifikk mekanisk termisk energi
$E_m \text{ trykk} = E_{mp}$	J/kg	Spesifikk mekanisk trykknenergi
$E_{\text{tap}}$	J/kg	Tap av spesifikk energi
$e_x$	[ ]	Absolutt usikkerhet
$f_{\text{tilfeldig}}$	%	Tilfeldig usikkerhet
$f_{\text{systematisk}}$	%	Systematisk usikkerhet
$f_x$	%	Usikkerhet
g	$\text{m/s}^2$	Gravitasjonskonstant
H	mVs	Løfthøyde
$\Delta H$	mVs	Løfthøyde
$\Delta H_{\text{tap}}$	mVs	Tap av løfthøyde
h	J/kg	Entalpi
$\Delta h$	J/kg	Entalpitap
I	A	Strøm
n	o/min	Omløpstall
P	W	Effekt
$P_{\text{Hydraulisk}} = P_h$	W	Hydraulisk effekt
$P_{\text{Mekanisk}} = P_m$	W	Mekanisk effekt
$P_{\text{produsert}}$	W	Produsert effekt
$P_{\text{tilgjengelig}}$	W	Tilgjengelig effekt
$\Delta P_{\text{tap}}$	W	Tapteffekt
p	bar	Trykk
$p_{\text{abs}}$	bar	Absolutt trykk
$p_{\text{atm}}$	bar	Atmosfære trykk
$\Delta p_{\text{tap}}$	bar	Trykktap
$p'$	bar	Trykk korrigert for høydeforskjell mellom trykksensor og målepunkt
Q	$\text{m}^3/\text{h}$	Volumstrøm
$Q_{\text{clearance}}$	$\text{m}^3/\text{h}$	Volumstrøm spaltevann
$Q_{\text{design}}$	$\text{m}^3/\text{h}$	Volumstrøm i designpunktet
$Q_{\text{pump}}$	$\text{m}^3/\text{h}$	Volumstrøm gjennom pumpen

s	J/kgK	Entropi
T	° C	Temperatur
$\Delta T$	° C	Temperaturdifferanse
T	Nm	Moment
U	V	Spenning
X	[ ]	Den målte størrelsen i usikkerheten
z	m	Kotehøyde
$\Delta z$	m	Høydedifferanse
$\eta$	%	Virkningsgrad
$\eta_h$	%	Hydraulisk virkningsgrad
$\eta_m$	%	Mekanisk virkningsgrad
$\eta_M$	%	Motor virkningsgrad
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Massetetthet
$\omega$	rad/s	Vinkelhastighet
-		Midlere verdi
1, 1-1, 2-1, 2-2, 3, 4		Målepunkter for trykk, temperatur og kotehøyde

#### Forkortelser

BEP	Beste virkningsgrads punkt
EPT	Institutt for energi- og prosesseteknikk
FMFL	Frank Mohn Flatøy AS
NTNU	Norges teknisk- naturvitenskaplige universitet
RSS	Root-Sum-Square, på norsk Rot-sum-kvadrat-metoden
SE-pumpe	Neddykket elektrisk sjøvanns løftepumpe



## 1 Innledning

Det er i dag stort fokus på klimautfordringene verden står ovenfor. En del av problemene er menneskeskapt og fokuset på å redusere utslippet av avgasser til atmosfæren øker.

Svært mye av utstyret på olje- og gassinstallasjoner drives av fossiltbrensel og energioptimalisering av strømningsmaskiner er viktig.

Ved energioptimalisering av pumper og for å møte krav fra kunder er det nødvendig å måle virkningsgraden på pumpene. Den vanligste metoden for virkningsgradsmåling er måling av tilført og avgitt effekt til pumpen. Tilført effekt er imidlertid ikke alltid mulig å måle direkte. I slike tilfeller kan det benyttes andre metoder hvor strømningsstapet gjennom pumpen måles. En metode som gjør dette er termodynamisk metode. Termodynamisk metode er ofte benyttet ved virkningsgradsmålinger på hydrauliske turbiner, men er mindre utbredt ved måling av pumpevirkningsgrad. For å benytte denne metoden krever IEC 41 [1] at løftehøyden må være over 100 mVs. Dette skyldes økt usikkerhet i resultatene for lavere løftehøyder.

Målet med denne oppgaven er å måle pumpevirkningsgrad ved bruk av termodynamisk metode. Frank Mohn Flatøy AS leverer pumper hvor tilført effekt ikke lar seg måle direkte og det er planer om å implementere termodynamisk metode i testprogrammet for vanninjeksjonspumpen og boosterpumpen på brannmodulen.

Virkningsgradsmålingen skal utføres på en neddykket elektrisk sjøvannsløftepumpe (SE-pumpe). Dette er en sentrifugalpumpe med et kort aksielt innløp. Tilført effekt måles også på denne pumpen, noe som muliggjør sammenligning av virkningsgrad fra termodynamisk og konvensjonell metode. SE-pumpen er neddykket i en testtank under testing og testoppsettet vil være annerledes for denne pumpen enn for pumpe som ikke er neddykket.

Vanninjeksjonspumpen og boosterpumpen er sentrifugalpumper med spiraltrømme.

Testoppsettet vil være enklere for disse pumpene, enn det som beskrives for SE-pumpen i denne oppgaven.

Oppgaven gir først et innblikk i teorien bak virkningsgradsmåling med konvensjonell metode og termodynamisk metode. Fremgangsmåte og gjennomføring av virkningsgradsmålingen på SE-pumpen beskrives deretter. Tilslutt presenteres resultatene og usikkerhetsanalysen av den termodynamiske metoden før metodene sammenlignes og diskuteres.

## 2 Bakgrunnsteori

Teorien i kapittel 2.1 - 2.2.1 er hentet fra Kjølle [2].

### 2.1 Virkningsgradsmåling

Virkningsgraden til en pumpe forteller hvor stor del av tilført mekanisk effekt som omformes til hydraulisk effekt. Denne kan finnes på to måter:

1. Måle tilført og avgitt effekt

$$\eta = \frac{\text{Avgitt effekt}}{\text{Tilført effekt}} = \frac{P_{\text{Avgitt}}}{P_{\text{Tilført}}} = \frac{P_{\text{Hydraulisk}}}{P_{\text{Mekanisk}}} \quad (2.1)$$

2. Måle strømmingstapene

$$\eta = 1 - \frac{\sum \Delta P_{\text{tap}}}{P_{\text{Mekanisk}}} \quad (2.2)$$

Kapittel 2.1 vil ta for seg den første metoden, videre omtalt som konvensjonell metode, mens den andre blir presentert i kapittel 2.2.

Pumpevirkningsgraden kan deles i hydraulisk virkningsgrad og mekanisk virkningsgrad. Den hydrauliske virkningsgraden sier noe om hvor stor del av effekten på løpehjulet som overføres til hydraulisk effekt. Den mekaniske virkningsgraden sier noe om hvor stor del av effekten som tilføres drivmotoren som overføres til løpehjulet.

Hydraulisk virkningsgrad:

$$\eta_h = \frac{P_{\text{Hydraulisk}}}{P_{\text{Løpehjul}}} \quad (2.3)$$

Mekanisk virkningsgrad:

$$\eta_m = \frac{P_{\text{Løpehjul}}}{P_{\text{Mekanisk}}} \quad (2.4)$$

Pumpevirkningsgraden blir da:

$$\eta_{\text{pumpe}} = \eta_h \eta_m = \frac{P_{\text{Hydraulisk}}}{P_{\text{Løpehjul}}} \cdot \frac{P_{\text{Løpehjul}}}{P_{\text{Mekanisk}}} = \frac{P_{\text{Hydraulisk}}}{P_{\text{Mekanisk}}} = \frac{P_h}{P_m} \quad (2.5)$$

Avgitt hydraulisk effekt beregnes fra ligning (2.6):

$$P_h = \rho Q g H \quad (2.6)$$

Tilført effekt til akslingen kan bestemmes på to måter: enten ved å måle den elektriske effekten som er tilført pumpens motor, eller ved å måle momentet på motorakslingen og omløpstallet. Den enkleste metoden er å måle den tilførte elektriske effekten der dette er mulig, selv om denne metoden gir en større usikkerhet knyttet til motorens virkningsgrad. Måling av momentet på pumpeakslingen vil gi de beste forutsetningene for nøyaktig bestemmelse av effekten. Metoden benyttes stort sett bare i laboratorier og ved effekter opp til 50 kW.

Måling av elektrisk effekt.  $P_m$  er gitt i [kW] i ligning (2.7). Ligningen er gyldig for likestrømsmotor.

$$P_m = \eta_M \frac{IU}{1000} \quad (2.7)$$

Måling av motormoment.  $P_m$  er her gitt i [W].

$$P_m = \omega T = \frac{\pi n}{30} T \quad (2.8)$$

Pumpevirkningsgraden blir da ifølge ligningene (2.6) og (2.7).

$$\eta = \frac{P_h}{P_m} = \frac{\rho Q g H}{\eta_M IU} \quad (2.9)$$

Og ifølge ligningene (2.6) og (2.8).

$$\eta = \frac{P_h}{P_m} = 30 \cdot \frac{\rho Q g H}{\pi n T} \quad (2.10)$$

Løftehøyden  $H$  finnes fra  $H = \frac{E}{\bar{g}}$  hvor:

$$E = \bar{g}H = \frac{P_{abs2} - P_{abs1}}{\bar{\rho}} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + \bar{g}(z_2 - z_1) \quad (2.11)$$

Driftspunktene som blir kjørt ved en pumpe-test vil vanligvis ligge spredt omkring de valgte omløpstall. For å korrigere for dette benyttes affinitetsligningene:

$$Q = \frac{n}{n_1} Q_1 = \sqrt{\frac{H}{H_1}} Q_1 \quad (2.12)$$

$$H = \left(\frac{n}{n_1}\right)^2 H_1 = \left(\frac{Q}{Q_1}\right)^2 H_1 \quad (2.13)$$

$$P = \left(\frac{n}{n_1}\right)^3 P_1 = \left(\frac{Q}{Q_1}\right)^3 P_1 = \sqrt{\left(\frac{H}{H_1}\right)^3} P_1 \quad (2.14)$$

## 2.2 Termodynamisk virkningsgradsmåling

Termodynamisk virkningsgradsmåling er en metode som måler strømningsstapene gjennom pumpen. Det fysiske grunnlaget er at strømningsstapene går over til varme i vannstrømmen gjennom systemet. Dette fører til en temperaturøkning på volumstrømmen.

Temperaturdifferansen  $\Delta T$  finnes ved å måle temperaturen ved innløp og utløp på pumpen.

En forenkling kan gjøres ved å se bort fra vannets kompressibilitet og temperaturutvidelse og å definere spesifikk varme ved konstant trykk som  $C_p$  [Nm/kg°C]. De spesifikke strømningsstapene beregnes da slik:

$$E_{tap} = C_p \Delta T \quad (2.15)$$

Ved å snu på ligningen kan de spesifikke strømningsstapene uttrykkes som tap av løftehøyde.

$$\Delta H_{tap} = \frac{E_{tap}}{g} = \frac{C_p}{g} \Delta T \quad (2.16)$$

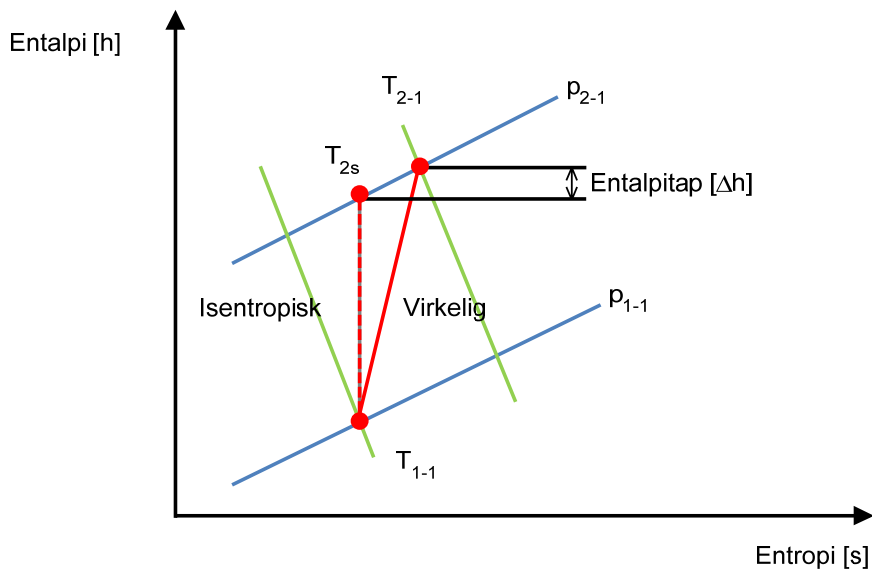
Den hydrauliske virkningsgraden kan uttrykkes slik:

$$\eta_h = \frac{P_h}{P_m} = \frac{P_m - \sum \Delta P_{tap}}{P_m} = \frac{H}{H + \Delta H_{tap}} = 1 - \frac{\Delta H_{tap}}{H + \Delta H_{tap}} \quad (2.17)$$

Temperaturdifferansen for en pumpe med  $\eta_h = 90\%$ ,  $H = 115$  m og saltvann som pumpemedium vil være  $\Delta T \approx 0,028$  °C.

Ideelt sett er prosessen gjennom en pumpe en isentropisk prosess. Dette vil si at prosessen er tapsfri og at den mekaniske effekten i sin helhet blir overført til hydraulisk effekt. Det genereres ingen varme og prosessen er adiabatisk.

Den virkelige prosessen vil alltid ha strømningsstap. Strømningsstapene fører til en økning av entropien og entalpien i vannet. Entalpidifferansen benevnes entalpitap. Figur 2.1 viser den isentropiske og den virkelige prosessen samt entalpitapet i et hs-diagram.



Figur 2.1 hs-diagram

Ligning (2.1) gir den generelle definisjonen for virkningsgrad.

Effekten  $P$  kan defineres slik:

$$P = \rho Q E \quad (2.18)$$

Fra ligningene (2.1) og (2.18) finner en følgende uttrykk:

$$\eta = \frac{E_{\text{hydraulisk}} \cdot \rho \cdot Q}{E_{\text{mekanisk}} \cdot \rho \cdot Q} = \frac{E_{\text{hydraulisk}}}{E_{\text{mekanisk}}} \quad (2.19)$$

Energien finnes fra entalpidifferansen mellom innløp og utløp.

$$\begin{aligned} E_h &= h_{2s} - h_{1-1} \\ E_m &= h_{2-1} - h_{1-1} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Den spesifikke hydrauliske energien tilsvarer den adiabatisk prosessen, og er summen av potensiell-, trykk- og hastighetsenergi. Ligning (2.21) viser dette, mens det i ligning (2.22) er satt inn uttrykk for potensiell-, trykk- og hastighetsenergi. Massetettheten finnes fra midlere verdi av trykkene  $p_1$  og  $p_2$ .

$$E_h = E_{h \text{ trykk}} + E_{h \text{ kinetisk}} + E_{h \text{ potensiell}} \quad (2.21)$$

$$E_h = \frac{1}{\rho} (p_2 - p_1) + \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) + g (z_2 - z_1) \quad (2.22)$$

Den spesifikke mekaniske energien uttrykkes tilsvarende med ledd for potensiell-, termisk-, trykk- og hastighetsenergi:

$$E_m = E_m \text{ trykk} + E_m \text{ termisk} + E_m \text{ kinetisk} + E_m \text{ potensiell} \quad (2.23)$$

Innsatt:

$$E_m = \bar{a}(p_{2-1} - p_{1-1}) + \bar{C}_p(T_{2-1} - T_{1-1}) + \frac{1}{2}(c_{2-1}^2 - c_{1-1}^2) + g(z_{2-1} - z_{1-1}) \quad (2.24)$$

$\bar{a}$  og  $\bar{C}_p$  finnes for:  $p = \frac{p_{1-1} + p_{2-1}}{2}$  og  $T = \frac{T_{1-1} + T_{2-1}}{2}$

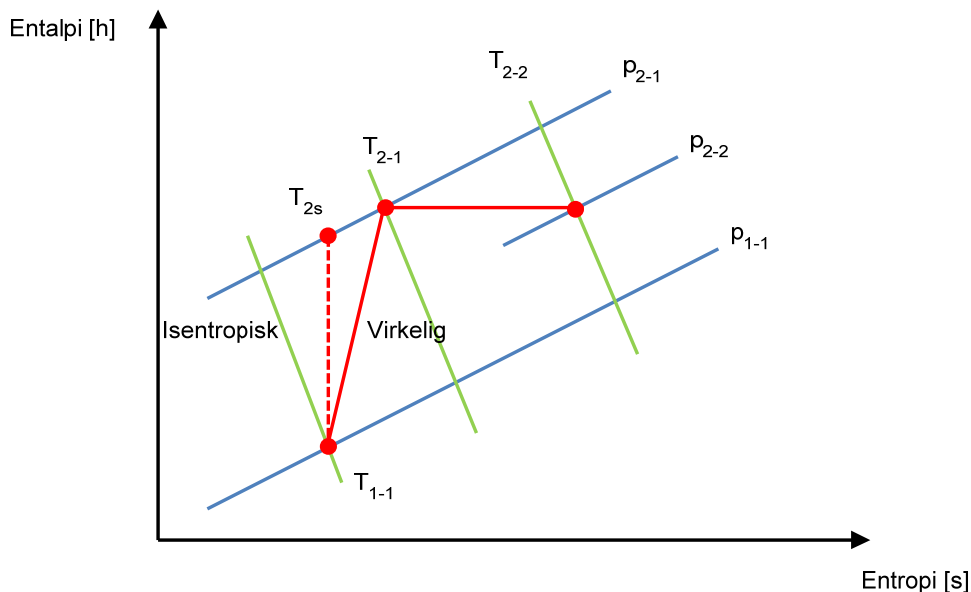
Virkningsgraden kan nå uttrykkes slik:

$$\eta = \frac{E_h}{E_m} = \frac{\frac{1}{\rho}(p_2 - p_1) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1)}{\bar{a}(p_{2-1} - p_{1-1}) + \bar{C}_p(T_{2-1} - T_{1-1}) + \frac{1}{2}(c_{2-1}^2 - c_{1-1}^2) + g(z_{2-1} - z_{1-1})} \quad (2.25)$$

### 2.2.1 Målemetoder

Tre ulike målemetoder kan anvendes ved måling av temperatur og trykk, avhengig av måleproben og tilkomst til målepunktet.

1. Direkte måling: Temperatur og trykk måles uten at trykket strupes ned før termometeret. Dette krever at måleproben kan plasseres direkte i strømmingen.
2. Delvis nedstuping: Delvis nedstuping brukes for å oppnå null temperaturdifferanse. I følge Kjølle [2] er dette kun mulig på turbiner, mens ISO 5198 [3] hevder at dette kan gjøres på pumper med tilstrekkelig høyt innløpsstrykk. For mer informasjon om denne metoden vises det til standarden.
3. Total nedstрупing: Når trykket ved utløpet ikke kan måles direkte, strupes det gjennom måleproben til et lavere trykk ved konstant entalpi, se Figur 2.2. Om trykket strupes ned til atmosfæretrykk kan den termodynamiske virkningsgraden bestemmes kun fra temperaturmålinger.



Figur 2.2 hs-diagram med struping

## 2.2.2 Spaltevannstap

Teorien i dette kapitlet er hentet fra Ramdal [4].

For pumper hvor spaltevannet ledes bort, må det korrigeres for dette i den spesifikke mekaniske energien og virkningsgraden. I ligning (2.25) er det ikke tatt hensyn til tapet som går gjennom spalten,  $\delta E_m$ . Dette må legges til den spesifikke mekaniske energien. Ligningen for spesifikk mekanisk energi blir da:

$$E_m = \bar{a}(p_{2-1} - p_{1-1}) + \bar{C}_p(T_{2-1} - T_{1-1}) + \frac{1}{2}(c_{2-1}^2 - c_{1-1}^2) + g(z_{2-1} - z_{1-1}) + \delta E_m \quad (2.26)$$

Spaltevannstapet uttrykkes slik:

$$\delta E_m = -\frac{Q_{\text{clearance}}}{Q_{\text{pump}}} \cdot E_{\text{clearance}} \quad (2.27)$$

Hastighetsenergien gjennom spalten antas å være tilnærmet lik null. Den spesifikke mekaniske energien for spaltevannstapet kan da skrives:

$$E_{m \text{ clearance}} = \bar{a}(p_{2-1} - p_{\text{atm}}) + \bar{C}_p(T_{2-1} - T_{\text{clearance}}) + g(z_{2-1} - z_{\text{clearance}}) \quad (2.28)$$

Endelig uttrykk for virkningsgraden, når det er tatt hensyn til spaltevannstapet, blir:

$$\eta = \frac{E_h}{E_m} = \frac{\frac{1}{\bar{\rho}}(p_2 - p_1) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1)}{\bar{a}(p_{2-1} - p_{1-1}) + \bar{C}_p(T_{2-1} - T_{1-1}) + \frac{1}{2}(c_{2-1}^2 - c_{1-1}^2) + g(z_{2-1} - z_{1-1}) + \delta E_m} \quad (2.29)$$

## 2.3 Måleusikkerhet

Teorien i dette avsnittet er hentet fra Wheeler og Ganji [5] og IEC 41 [1].

Alle målinger vil inneholde feil i form av at resultatene som logges vil være litt forskjellige fra de faktiske verdiene en måler. Dette skyldes to feilkilder: tilfeldige feil og systematiske feil. Tilfeldige feil finnes i selve måleresultatene, mens de systematiske feilene spores tilbake til usikkerhet i måleinstrumentene og kalibreringen av disse.

Usikkerheten i en målt størrelse skrives slik:

$$f_x = \frac{e_x}{X} \quad (2.30)$$

$f_x$  er måleusikkerheten, mens  $e_x$  er den absolutte usikkerheten i målingen av  $X$ .  $e_x$  har den samme benevnningen som den målte størrelsen  $X$ .

Den totale usikkerheten finnes ved å kombinere tilfeldig og systematisk usikkerhet ved bruk av RSS-metoden (Root-Sum-Square).

$$f_{total} = \sqrt{(f_{tilfeldig})^2 + (f_{systematisk})^2} \quad (2.31)$$

Virkningsgraden er som beskrevet tidligere spesifikk hydraulisk energi dividert på spesifikk mekanisk energi. Den totale usikkerheten i virkningsgraden beregnes fra ligning (2.32).

$$f_{\eta} = \pm \sqrt{(f_{E_h})^2 + (f_{E_m})^2} \quad (2.32)$$

Usikkerhet i hydraulisk energi:

$$f_{E_h} = \pm \frac{e_{E_h}}{E_h} = \pm \frac{\sqrt{e_{E_{hp}}^2 + e_{E_{hc}}^2 + e_{E_{hz}}^2}}{E_{hp} + E_{hc} + E_{hz}} \quad (2.33)$$

Usikkerhet i mekanisk energi:

$$f_{E_m} = \pm \frac{e_{E_m}}{E_m} = \pm \frac{\sqrt{e_{E_{mp}}^2 + e_{E_{mT}}^2 + e_{E_{mc}}^2 + e_{E_{mz}}^2}}{E_{mp} + E_{mT} + E_{mc} + E_{mz}} \quad (2.34)$$

Ligninger for mellomregninger og detaljer i usikkerhetsanalysen er vist i Vedlegg A.

Usikkerhetsanalysen er basert på 95 % konfidensintervall. I følge ISO 5198 [3] skal usikkerheten i virkningsgraden være mellom 0,5-1,0 % når løftehøyden er høyere enn 100m.

Usikkerheten i virkningsgraden for den konvensjonelle metoden er i følge ISO 9906 [6]  $e_{\eta} = \pm 3,2$  %.



### 3 Forberedelse og gjennomføring av målinger

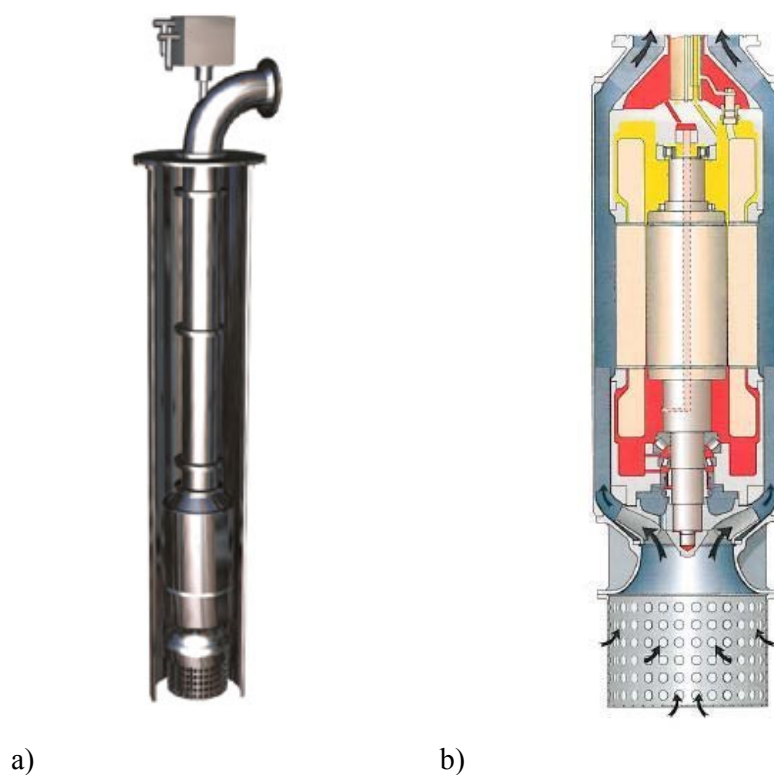
Målingen utføres på en neddykket elektrisk sjøvanns løftepumpe, SE-pumpe. Dette er en sentrifugalpumpe med et kort aksielt innløp. Pumpemediet strømmer fra utløpet av impelleren langs en oljefylt elektrisk motor, som er integrert i pumpekonstruksjonen, til toppbend og levering. Elektrisk effekt og tilkobling for tur/retur av hydraulikkolje til motoren gjøres i en koblingsboks på topp-bendet.

Tabell 3.1 viser designdata for pumpen som skal testes.

**Tabell 3.1 Designdata for SE-pumpen**

Volumstrøm	3410 m <sup>3</sup> /h
Løftehøyde	113,4 m
Omdreiningstall	1780 rpm
Utløpsdiameter impeller	580 mm

Figur 3.1 a) viser en SE-pumpe og Figur 3.1 b) viser snittet av impeller og motor [7, 8].



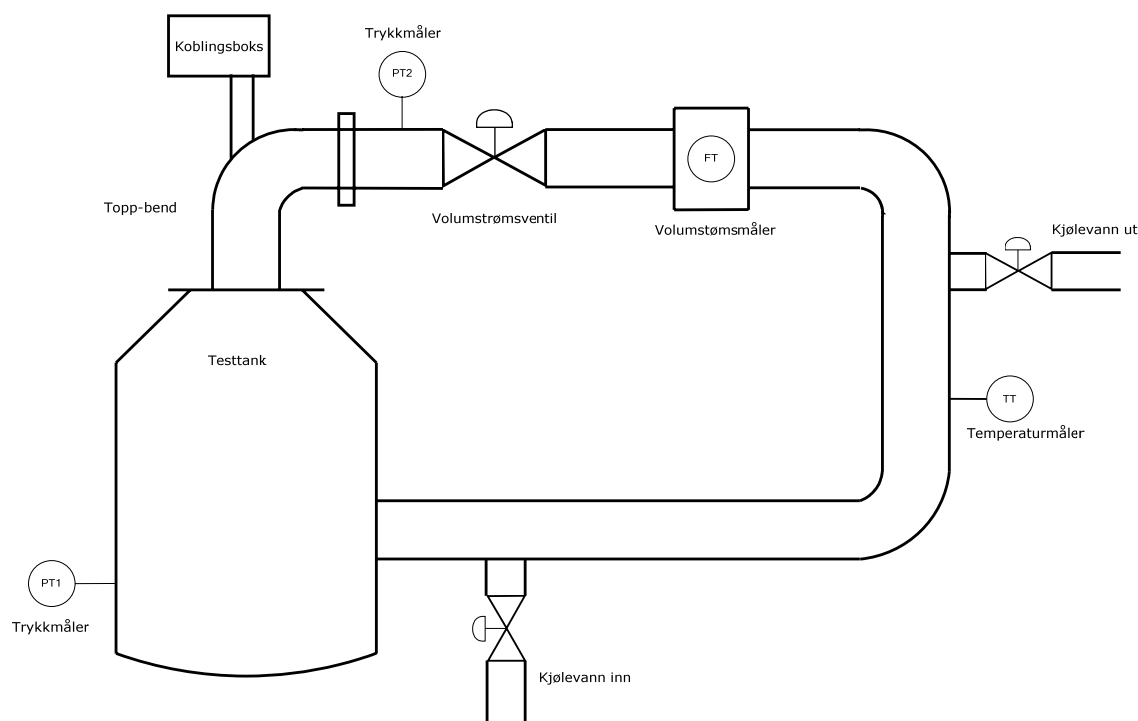
**Figur 3.1 a) SE-pumpe, b) Snitt av SE-pumpe [7, 8]**

### 3.1 Beskrivelse av målearrangement og forberedelser

#### 3.1.1 Testrigg

Frank Mohn Flatøy AS har prøvestand for SE-pumper hvor pumpevirkningsgraden måles ved bruk av konvensjonell metode.

Prøvestanden for SE-pumper er vist i Figur 3.2. Pumpen er under test dykket i en testtank trykksatt med 2 barg. Pumpemediet er sjøvann. Utløpstrykket etter pumpen avhenger av pumpen som testes, men kan maksimalt være 20 barg. Volumstrømmen til pumpen reguleres av en ventil nedstrøms pumpen, og måles deretter av en volumstrømsmåler. Temperaturen i testsløyfen overvåkes kontinuerlig da den vil øke når pumpen kjøres over lengre tid. Ved behov kjøles en del av volumstrømmen. En boosterpumpe og en trykkreduksjonsventil brukes til å trykksette testtanken. Dette arrangementet sørger også for kjølingen til testsløyfen [9].



Figur 3.2 Testrigg for SE-pumpe

Parametre som logges på denne prøvestanden er blant annet:

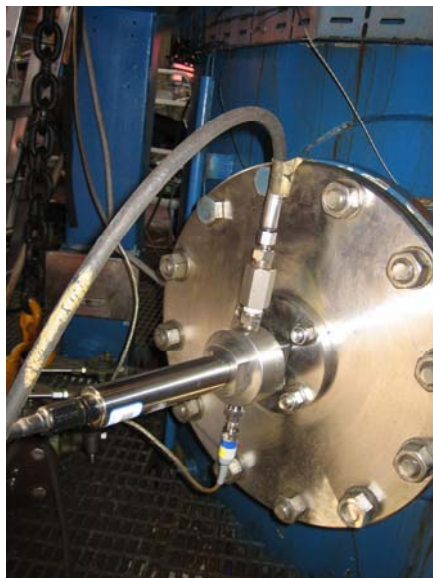
- Trykk før og etter pumpen
- Volumstrøm
- Temperatur i testsløyfen
- Tilført elektrisk effekt

Motorvirkningsgraden måles i en egen test før pumpetesten.

### 3.1.2 Utstyr og instrumenter til termodynamisk metode

#### 3.1.2.1 Måleprobe

Måleproben som brukes er designet tidligere av Frank Mohn Flatøy AS. Termometeret monteres i midten av måleproben, mens trykksensor og hydraulikkslange til å lede bort vannet er montert i henholdsvis over- og underkant av måleproben, se Figur 3.3. I enden av hydraulikkslangen er det montert en nålventil for regulering av trykk og volumstrøm. Volumstrømmen som ledes forbi termometeret skal i følge IEC 41 og ISO 5198 være i størrelses orden 0,1-0,5 l/s [1, 3].



Figur 3.3 Måleprobe

#### 3.1.2.2 Termometer

Termometerne som benyttes er SBE38, levert av Seabird Electronics. Kalibrering er utført av leverandør våren 2009. Kalibreringssertifikat finnes i Vedlegg B. Tabell 3.2 viser spesifikasjoner for SBE38 [10].

Tabell 3.2 Spesifikasjoner for SBE38 [10]

Måleområde	-5 til +35 °C
Initial nøyaktighet	± 0,001 °C

#### 3.1.2.3 Trykksensorer

Trykksensorene som brukes er av type P8AP, levert av HBM. Dette er absoluttmålere. Tabell 3.3 viser måleområde og usikkerhet for trykksensorene [11].

Tabell 3.3 Spesifikasjoner for P8AP [11]

Måleområde	0-50 bar
Usikkerhet	± 0,3 %

ISO 5198 krever at nøyaktigheten til trykksensorene skal være minst 0,1 % [3]. Tabell 3.3 viser at trykksensorene ikke tilfredsstillter dette kravet.

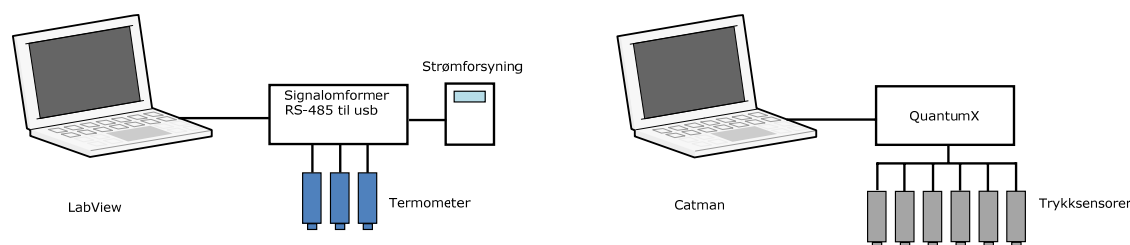
Trykksensorene kalibreres med dødvekttester opp mot QuantumX og Catman, fra HBM, på PC. Kalibreringen er gjort for måleområdet 0-30 bar da dette er tilstrekkelig ut fra trykkene som skal måles. Usikkerheten i trykksensorene etter kalibrering er vist Tabell 3.4. Tabellen viser at usikkerheten i trykksensorene PT1, PT2-1 og PT2-2 er innenfor kravet fra ISO 5198 [3]. PT1-1 og PT4 er bedre enn det som er oppgitt fra leverandør, mens PT3 overstiger dette.

**Tabell 3.4 Usikkerhet i trykksensorene i følge kalibrering**

Målepunkt	Type	Måleområde	Usikkerhet
PT1	P8AP	0-30 bar	0,05 %
PT1-1	P8AP	0-30 bar	0,18 %
PT2-1	P8AP	0-30 bar	0,06 %
PT2-2	P8AP	0-30 bar	0,05 %
PT3	P8AP	0-30 bar	0,58 %
PT4	P8AP	0-30 bar	0,16 %

### 3.1.2.4 Oppsett av måleinstrumenter

Figur 3.4 viser hvordan måleinstrumentene er koblet opp. Det brukes et loggesystem for temperaturmålingene og et for trykkmålingene. Termometerne kobles til en signalomformer som omformer signalene fra RS-485 til usb, før signalene tas inn på PC og LabVIEW. En strømforsyning må også kobles til termometerene. Trykksensorene kobles til QuantumX som tar signalet inn til PC med Catman.



**Figur 3.4 Oppsett av måleinstrumenter**

Utstyrsliste for termodynamisk metode er lagt ved i Vedlegg C.

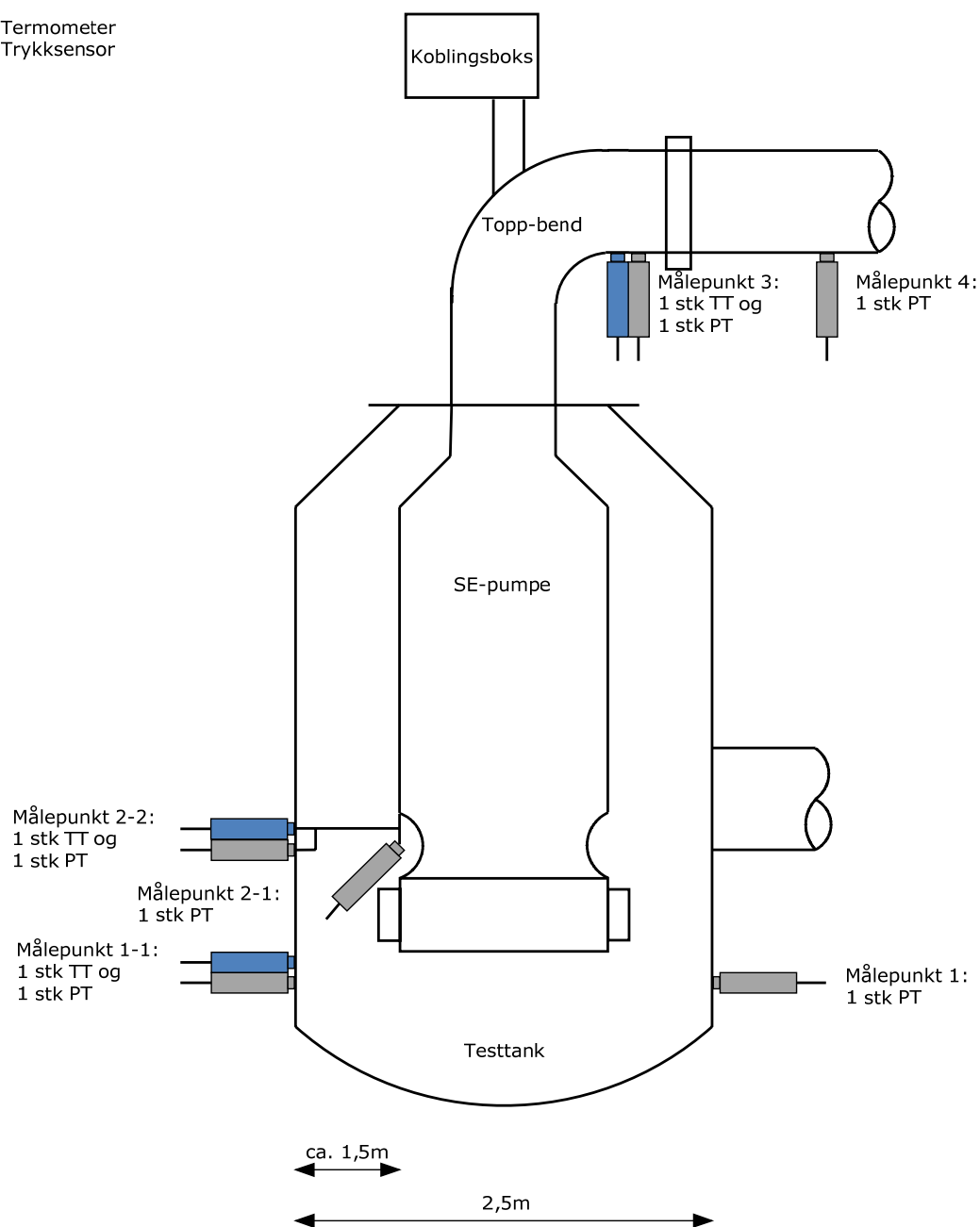
### 3.1.3 Måleoppsett for termodynamisk metode

Testtriggen og pumpen instrumenteres med tre termometer og seks trykksensorer. Tabell 3.5 gir en oversikt over målepunktene og hvilke måleinstrumenter som er plassert der. Figur 3.5 viser plasseringen av målepunkter og måleinstrumenter.

Tabell 3.5 Oversikt over måleinstrumenter i målepunktene

Målepunkt		Termometer	Trykksensor
1	Testtank	-	Ja
1-1	Innløp sugedeksel, temperatur måleprobe	Ja	Ja
2-1	Utløp impeller	-	Ja
2-2	Utløp impeller, temperatur måleprobe	Ja	Ja
3	Topp-bend, temperatur måleprobe	Ja	Ja
4	Levering	-	Ja

TT = Termometer  
PT = Trykksensor



Figur 3.5 Målepunkter og måleinstrumenter

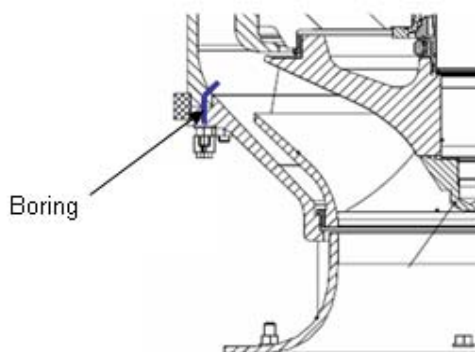
For alle gjennomføringer av måleutstyr til målepunkter i testtanken er det forsøkt å benytte eksisterende gjennomføringer. Dette medfører høydeforskjeller mellom målepunkt og trykksensor i enkelte målepunkt. Trykkmålingene blir korrigert for dette før utregning av virkningsgrad, se kapittel 3.3. Oversikt over kotehøydene for instrumentene finnes i Vedlegg D.

### 3.1.3.1 Målepunkt 1-1

Måleproben og termometer for temperaturmåling før pumpens innløp monteres direkte på utsiden av testtanken. Inni testtanken blir en slange ledet fra veggen av testtanken og måleproben til sugedekselet for å hente vann til målingen derfra.

### 3.1.3.2 Målepunkt 2-2

I utgangspunktet er det kun nødvendig å ha to termometer og to til fire trykksensorer ved termodynamisk metode, men pumpen målingene gjøres på byr på to utfordringer. Motoren er som nevnt tidligere oljefyllt og integrert i pumpekonstruksjonen. Det er forventet at den vil avgis varme og bidra til temperaturøkning på pumpemediet. En temperaturmåling på topp-bendet vil derfor ikke gi et korrekt bilde av temperaturøkningen som skyldes strømningstap over impelleren. For å kunne si noe om temperaturøkningen grunnet motoren er det montert et termometer på topp-bendet. Dette etter ønske fra Frank Mohn Flatøy AS. Temperaturøkningen over pumpen må derfor måles umiddelbart etter impellerens utløp. Diffusorvirkningsgraden kommer da ikke med, men ved måling etter diffusoren vil pumpemediet ha passert en del av motoren. I pumpehuden er det en boring på 4mm [12], fra vannveien og ut til et skruehull hvor sugedekselet festes etter impelleren, se Figur 3.6 [13]. Dette brukes vanligvis til måling av trykkpulsasjoner.



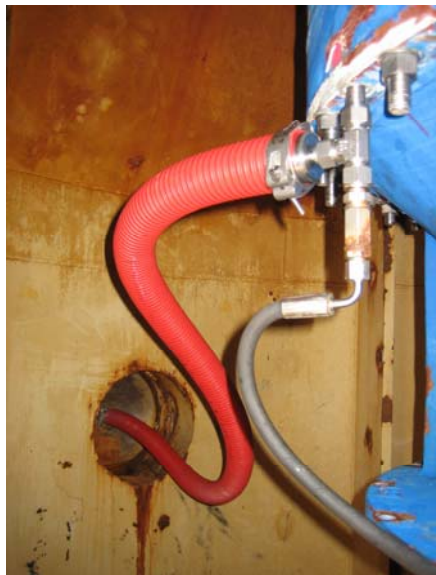
Figur 3.6 Utsnitt av pumpetegning [13]

Den neste utfordringen er hvor måleproben og termometeret skal monteres siden pumpen er neddykket under test. To alternativer ble vurdert:

1. Måleprobe og termometer monteres umiddelbart utenfor skruehullet. Signalkabel fra termometer og hydraulikkslange for trykkmåling ledes til utsiden av testtanken. Dette tilsvarer direkte måling beskrevet i kapittel 2.2.1.
2. Måleprobe og termometer monteres på utsiden av testtanken. En liten del av pumpemediet ledes fra vannveien etter impelleren via boringen og skruehullet til en hydraulikkslange som fører pumpemediet gjennom testtanken. Trykket strupes ned før temperatur og trykk måles, se målemetoden total nedstruping i kapittel 2.2.1.

Fordelen med 1. er at temperaturen måles rett etter skruehullet i pumpehuden i testtanken. Måleproben og termometeret må isoleres ved bruk av en vann- og trykktett boks som fylles med et isolerende materiale. Isoleringen vil være enklere for 2., da kun hydraulikkslangen må isoleres inni testtanken. Grunnet dette ble 2. valgt. Mekaniske overganger og stykkeklister for koblinger mellom pumpe og hydraulikkslange er vist i Vedlegg E.

Figur 3.7 viser måleoppsettet inni testtanken for temperatur- og trykkmåling etter impelleren. Fra et t-stykke som er skrudd i pumpen er hydraulikkslanger til målepunkt 2-1 og 2-2 tilkoblet. Den svarte slangen går til PT2-1, mens den røde går til PT2-2 og TT2-2.



**Figur 3.7** Testoppsett for målepunkt 2-2 inni testtank

### 3.1.3.3 Målepunkt 3

Måleproben med termometer og trykksensor er montert på en flens som er sveiset i topp-bendet. På måleproben er det montert en flens med et rør som er lukket i enden, men som har små hull i lengderetningen. Hullene er rettet mot strømningsretningen inni topp-bendet. Figur 3.8 viser flensen og røret.



**Figur 3.8** Måleprobe: flens med rør

De øvrige tre trykksensorene er plassert i følgende målepunkter: i testtanken (PT1), direkte etter skruerhull ved utløpet til impelleren (PT2-1) og på leveringsrøret i testsløyfen (PT4). PT2-1 og PT2-2 er tilknyttet samme uttak i pumpen, se Figur 3.7 og kapittel 3.1.3.2. PT2-1 måler statisk trykk inni pumpen, etter impellerens utløp, når ventilen ved målepunkt 2-2 er stengt.

### 3.2 Klargjøring og gjennomføring av målinger

#### 3.2.1 Klargjøring

Før målingen gjennomføres må det velges hvilke punkter som skal kjøres. IEC 41 anbefaler å kjøre 7-9 punkter fordelt over driftsområdet [1]. Følgende testpunkter er valgt, oppgitt i prosent av  $Q_{\text{design}}$ : 0, 25, 50, 75, 80, 90, 100, 100, 110, 120. Det er her valgt å logge to ganger ved  $Q_{\text{design}}$  for å kontrollere repeterbarheten i målingene. For SE-pumper er 120 % av  $Q_{\text{design}}$  maks kapasitet. Hele måleserien vil logges to ganger.

I hvert testpunkt vil det også gjøres logginger med loggesystemet på prøvestanden.

Resultatene fra måling med termodynamisk metode vil sammenlignes med resultatene fra konvensjonell metode.

Instrumentene monteres på testtriggen og funksjonstestes før oppstart. Alle instrumentene skal ha gyldige kalibreringssertifikater. Etter montering isoleres termometerne og måleprobenes for å hindre påvirkning fra omgivelsene.

##### 3.2.1.1 Forventede resultater

Pumpen ble testet i år 2000 da den ble produsert, og den skal nå testes igjen etter service. Virkningsgraden ved beste virkningsgradspunkt, BEP, var den gang  $\eta \approx 87\%$  i følge pumpekurven fra testen [14]. Det forventes at virkningsgraden vil være lik.  $\eta \approx 87\%$  tilsvarer en temperaturøkning på  $\Delta T \approx 0,036\text{ °C}$  ved direkte måling. Trykket i målepunkt 2-2 er strupet ned og temperaturdifferansen vil være litt høyere, se Figur 2.2.

$$\Delta T = \frac{(1 - \eta_h) \cdot H \cdot g}{c_p} = \frac{(1 - 0,87) \cdot 113,4\text{ m} \cdot 9,81\text{ m/s}^2}{3992\text{ J/kgK}} \approx 0,036\text{ °C}$$

##### 3.2.1.2 Loggeprogram

Under målingene vil det brukes to loggeprogram, et til temperaturmålingene og et til trykkmålingene. Til temperaturmålingene brukes LabVIEW fra National Instruments, mens det på trykkmålingene brukes Catman fra HBM. Denne programvaren brukes sammen med QuantumX og trykksensorer fra HBM. Skjermbildekopier av LabVIEW programmene finnes i Vedlegg F. Programmene i LabVIEW er utarbeidet i samarbeid med stipendiat Jørgen Ramdal og avdelingsingeniør Joar Grilstad [15, 16].

Årsaken til at det benyttes to ulike systemer skyldes at Frank Mohn Flatøy AS ikke bruker LabVIEW.

Det presiseres at LabVIEW kan logge temperatur og trykk samtidig forutsatt at hardwaren trykksensorene er tilkoblet er kompatibel med LabVIEW.

Temperaturen blir logget i intervall på 3-4 sekunder i 2-3 minutter. Trykket logges med en loggefrequens på 50 Hz i 40 sekunder. Dataene som logges skrives til Excel-fil.



### 3.2.2 Gjennomføring

Pumpen er testet i henhold til Frank Mohn Flatøy AS sin prosedyre for testing av SE-pumper [9]. Den termodynamiske målingen er utført i henhold til prosedyre for termodynamisk metode, se Vedlegg G.

Isolering av termometer og måleprober ble ikke gjort. Fra tidligere erfaringer med termodynamisk metode mente testpersonellet ved Frank Mohn Flatøy AS at isolering av termometer ikke var så viktig. Isoleringen ble derfor ikke utført.

Det var planlagt å kjøre pumpen på ni driftspunkt, med to logger ved 100 % av  $Q_{\text{design}}$ . Etter samtaler med testpersonellet ved Frank Mohn Flatøy AS ble det bestemt at det ikke skulle kjøres mot stengt ventil (0 % kapasitet). Driftspunktene det ble logget på er: 25, 50, 75, 80, 90, 100, 100, 110, 120 av  $Q_{\text{design}}$ . Grunnet tidsmangel ble det kun gjennomført en måleserie.

Logging av måledata ble gjennomført slik:

- 1) Volumstrømmen ble regulert til testpunktet som skulle logges.
- 2) Når strømmingen hadde stabilisert seg, ble trykk og temperatur logget.
- 3) Ventilene i tilknytning til måleprobene ble stengt.
- 4) Ny logging ble gjennomført.

1) til 4) ble gjentatt for alle testpunktene. Loggingen ble gjort i to omganger siden PT2-1 og PT2-2 er tilknyttet samme uttak i pumpen, se kapittel 3.1.3.3.

Volumstrømmen gjennom måleprobene ble målt ved 25 % for alle tre måleprobene. For målepunkt 2-2 ble volumstrømmen også målt ved 100 %. Måling av volumstrømmen ble gjort ved å måle hvor lang tid det tok å fylle en bøtte. Mengden ble så målt opp i målebeger.

### 3.3 Bearbeiding av data

Måledataene ble bearbeidet i Excel. Dataene ble først plottet for å kontrollere loggefilene for loggefeil. Eventuelle loggefeil ble fjernet før gjennomsnitt, standardavvik og absolutt usikkerhet ble beregnet.

I loggeprogrammet for trykkmålingene ble ikke kalibreringskurvene for trykksensorene lagt inn. Resultatene fra trykkmålingene er derfor blitt korrigert for dette i ettertid.

Trykkmålingene korrigeres også for høydeforskjell mellom målepunkt og trykksensor før virkningsgraden beregnes etter ligningene i kapittel 2.2.

I ligning (2.25) inngår faktorene isotermisk faktor, spesifikk varmekapasitet og massetetthet for pumpemediet. IEC 41 og ISO 5198 inneholder tabeller for disse faktorene som er temperatur- og trykkavhengige [1, 3]. Tabellene gjelder for rent vann. Pumpemediet for SE-pumper er sjøvann. Det har ikke vært mulig å finne tabeller for sjøvann for disse faktorene som både er temperatur- og trykkavhengige.

ISO 9906 [6] definerer en væske som "kaldt rent vann" slik (utdrag fra tabell nr. 5):

**Tabell 3.6 Spesifikasjoner for "kaldt rent vann" [6]**

Betegnelse	Enhet	Maks.
Temperatur	°C	40
Kinematisk viskositet	m <sup>2</sup> /s	1,75·10 <sup>-6</sup>
Massetetthet	kg/m <sup>3</sup>	1050

Massetettheten for sjøvann er rundt  $1022 \text{ kg/m}^3$ . Ut fra dette er det besluttet å bruke tabellene for vann for isotermisk faktor og spesifikk varmekapasitet. Det presiseres at det dette medfører en systematisk feil i resultatene. I usikkerhetsanalysen er det ikke tatt hensyn til dette. Etter veiledning og samtaler med Nielsen er det bestemt å benytte massetettheten for sjøvann som ble målt samme dag som testen fant sted i virkningsgraden [17].

Hastigheten ved innløp og utløp til pumpen er beregnet fra pumpens volumstrøm, målt med en volumstrømsmåler. For turbiner settes det opp en iterasjonsrekke for å beregne pumpens volumstrøm, men det lar seg ikke gjøre for dette testoppsettet. Usikkerheten i volumstrømsmålingen er i følge Espetvedt  $1,0 \%$  [18].

Måling av volumstrømmen forbi temperaturmålepunktene ble ikke gjort for alle testpunktene. Volumstrømmen målt ved testpunkt 2 blir benyttet i beregningene for alle testpunktene.

Virkningsgraden for konvensjonell målemetode er beregnet etter ligningene i kapittel 2.1.

Usikkerhetsanalysen er utført etter ligningene i kapittel 2.3 og Vedlegg A.

## 4 Resultater

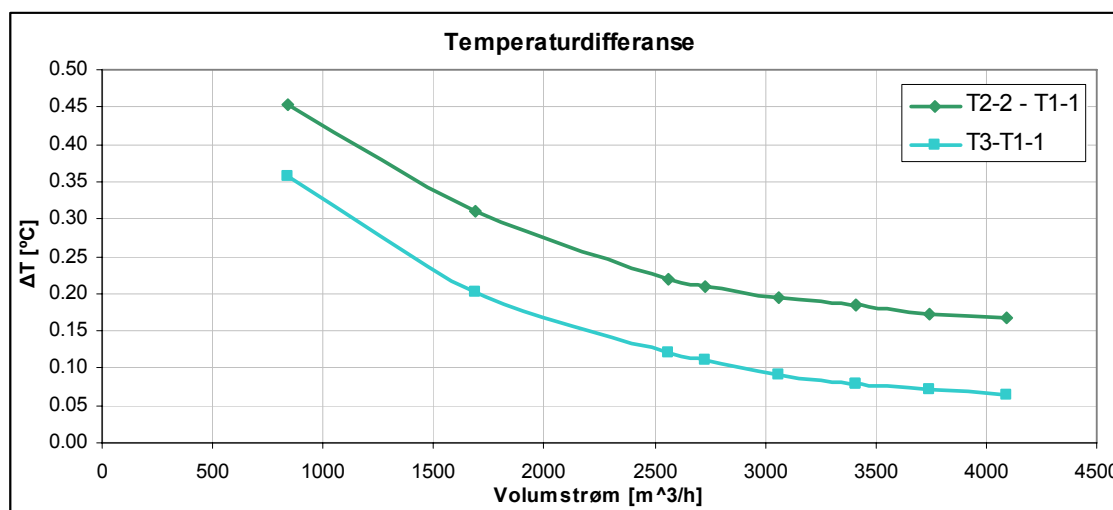
### 4.1 Virkningsgrad

Målte verdier for temperatur og trykk er vist i Tabell 4.1. Trykket er korrigert for høydeforskjell mellom målepunkt og plassering av trykksensor, se kapittel 3.3.

Temperaturdifferansen i testpunkt 7 og 8 er høyere enn antydnet i kapittel 3.2.1.1. Figur 4.1 viser temperaturdifferansen grafisk.

**Tabell 4.1 Temperatur og trykk ved temperaturmålepunktene**

Testpunkt		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q	m <sup>3</sup> /h	840	1689	2562	2730	3064	3412	3410	3739	4096
T <sub>1</sub>	° C	11.2659	11.8467	12.3808	12.6614	13.0207	13.2487	13.3198	13.4198	13.5424
T <sub>2</sub>	° C	11.7183	12.1565	12.5993	12.8717	13.2143	13.4337	13.5044	13.5912	13.7095
T <sub>3</sub>	° C	11.6226	12.0497	12.5010	12.7718	13.1126	13.3287	13.3981	13.4900	13.6072
T <sub>2-2</sub> -T <sub>1-1</sub>	° C	0.4524	0.3098	0.2185	0.2103	0.1936	0.1850	0.1846	0.1715	0.1671
T <sub>3</sub> -T <sub>1-1</sub>	° C	0.3567	0.2030	0.1202	0.1104	0.0919	0.0800	0.0783	0.0703	0.0648
p' <sub>1-1</sub>	bara	3.1256	3.1803	2.9566	2.9919	2.8710	2.8535	2.8363	2.6577	2.5826
p' <sub>2-2</sub>	bara	12.6472	11.9108	11.3009	11.1471	10.8294	10.3830	10.4378	9.8546	9.3201
p' <sub>3</sub>	bara	17.0467	16.3071	15.4240	15.2238	14.6453	13.9854	13.9800	13.0496	12.0971



**Figur 4.1 Temperaturdifferanse**

Antallet termometer og trykksensorer medfører at to størrelser,  $E_m$  termisk og  $E_h$  trykk i den termodynamiske virkningsgraden kan defineres på flere måter. Følgende benevnninger brukes videre:

Metode a:  $E_{m \text{ termisk}} = \overline{C_p} (T_{2-2} - T_{1-1})$  og  $E_{h \text{ trykk}} = \frac{1}{\rho} (p'_{4-1} - p_1)$

Metode b:  $E_{m \text{ termisk}} = \overline{C_p} (T_{2-2} - T_{1-1})$  og  $E_{h \text{ trykk}} = \frac{1}{\rho} (p'_{2-1} - p_1)$

Metode c:  $E_{m \text{ termisk}} = \overline{C_p} (T_3 - T_{1-1})$  og  $E_{h \text{ trykk}} = \frac{1}{\rho} (p'_{4-1} - p_1)$

Tabell 4.2 til Tabell 4.4 viser virkningsgraden for termodynamisk metode a, b og c. For detaljer i beregningen og mellomregninger, se Vedlegg H.

**Tabell 4.2 Termodynamisk virkningsgrad, metode a**

Testpunkt			2	3	4	5	6	7	8	9	10
Løftehøyde	$\Delta H$	m	147.3	139.6	132.2	129.7	124.7	117.9	117.8	109.4	99.9
Effekt tilført motor	$P_{\text{tilført}}$	kW	989	1122	1284	1319	1367	1415	1413	1446	1459
Volumstrøm	$Q$	m <sup>3</sup> /h	840	1689	2562	2730	3064	3412	3410	3739	4096
Hydraulisk virkningsgrad	$\eta_h$	%	51.3	63.9	75.4	76.3	77.5	77.1	76.8	76.1	72.7

**Tabell 4.3 Termodynamisk virkningsgrad, metode b**

Testpunkt			2	3	4	5	6	7	8	9	10
Løftehøyde	$\Delta H$	m	-	131.2	125.7	124.5	121.4	115.9	116.3	110.5	104.7
Effekt tilført motor	$P_{\text{tilført}}$	kW	989	1122	1284	1319	1367	1415	1413	1446	1459
Volumstrøm	$Q$	m <sup>3</sup> /h	840	1689	2562	2730	3064	3412	3410	3739	4096
Hydraulisk virkningsgrad	$\eta_h$	%	-	59.8	70.7	72.2	74.1	74.0	73.9	74.2	72.9

**Tabell 4.4 Termodynamisk virkningsgrad, metode c**

Testpunkt			2	3	4	5	6	7	8	9	10
Løftehøyde	$\Delta H$	m	147.3	139.6	132.2	129.7	124.7	117.9	117.8	109.4	99.9
Effekt tilført motor	$P_{\text{tilført}}$	kW	989	1122	1284	1319	1367	1415	1413	1446	1459
Volumstrøm	$Q$	m <sup>3</sup> /h	840	1689	2562	2730	3064	3412	3410	3739	4096
Hydraulisk virkningsgrad	$\eta_h$	%	50.4	63.8	74.9	76.3	79.2	80.7	81.1	81.4	80.9

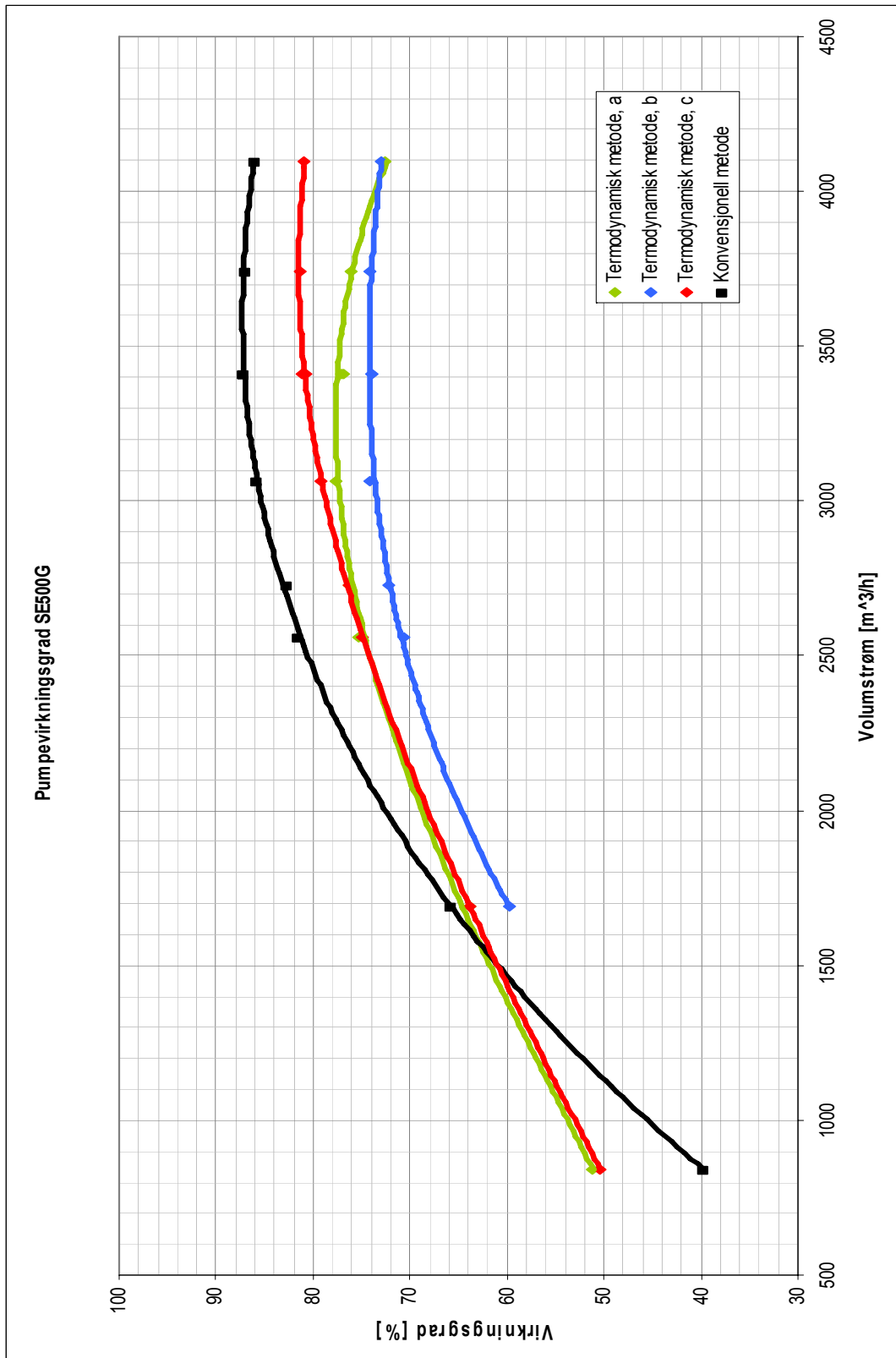
Virkningsgraden beregnet for konvensjonell målemetode er vist i Tabell 4.5. Målte verdier og utregninger er lagt ved i Vedlegg I.

**Tabell 4.5 Konvensjonell virkningsgrad**

Testpunkt			2	3	4	5	6	7	8	9	10
Løftehøyde	$\Delta H$	m	146.8	139.0	131.6	129.1	124.4	117.6	117.5	109.5	99.7
Effekt tilført motor	$P_{\text{tilført}}$	kW	989	1122	1284	1319	1367	1415	1413	1446	1459
Volumstrøm	$Q$	m <sup>3</sup> /h	840	1689	2562	2730	3064	3412	3410	3739	4096
Virkningsgrad	$\eta$	%	39.7	65.9	81.5	82.7	85.9	87.2	87.2	87.0	86.1

Fra Tabell 4.2 til Tabell 4.5 sees det at virkningsgraden beregnet ved hjelp av termodynamisk metode, a-c er 6-13 % lavere enn virkningsgraden beregnet fra den konvensjonelle målemetoden i designpunktet. Dette kan også sees i Figur 4.2, hvor virkningsgradene fra tabellene over er fremstilt grafisk. For testpunkt 2, som tilsvarer 25 % av volumstrømmen ved designpunktet, er virkningsgradene for metode a og c 10-11 % høyere enn for den konvensjonelle målemetoden. Metode a har BEP ved en volumstrøm som er lavere enn  $Q_{\text{design}}$ , mens b har det ved  $Q_{\text{design}}$ . Virkningsgraden for metode c og virkningsgraden for den konvensjonelle målemetoden har BEP like etter  $Q_{\text{design}}$ . Virkningsgradskurvene for metode b og c, og konvensjonell målemetode flater nærmest ut rundt  $Q_{\text{design}}$ . a derimot faller tilnærmet 5 % i virkningsgrad fra BEP til testpunkt 10 ( $Q \approx 120 \% Q_{\text{design}}$ ).

Repetibarheten i testpunktene 7 og 8 er god for alle metodene, se Tabell 4.2 til Tabell 4.5. Resultatene for disse testpunktene avviker lite fra hverandre.



Figur 4.2 Virkningsgradskurver

## 4.2 Måleusikkerhet

Måleusikkerhet i metode a-c er vist under i Tabell 4.6 til Tabell 4.8. For a og b ligger usikkerheten under 1 % for alle testpunkter, mens den ligger litt over 1 % for noen av testpunktene i c.

**Tabell 4.6 Usikkerhet i termodynamisk virkningsgrad, metode a**

Testpunkt			2	3	4	5	6	7	8	9	10
Virkningsgrad	$\eta_h$	%	51.3	63.9	75.4	76.3	77.5	77.1	76.8	76.1	72.7
Usikkerhet	$f(\eta_h)$	%	0.78	0.84	0.89	0.92	0.88	0.84	0.79	0.82	0.79

**Tabell 4.7 Usikkerhet i termodynamisk virkningsgrad, metode b**

Testpunkt			2	3	4	5	6	7	8	9	10
Virkningsgrad	$\eta_h$	%		59.8	70.7	72.2	74.1	74.0	73.9	74.2	72.9
Usikkerhet	$f(\eta_h)$	%		0.83	0.87	0.90	0.86	0.82	0.77	0.80	0.77

**Tabell 4.8 Usikkerhet i termodynamisk virkningsgrad, metode c**

Testpunkt			2	3	4	5	6	7	8	9	10
Virkningsgrad	$\eta_h$	%	50.4	63.8	74.9	76.3	79.2	80.7	81.1	81.4	80.9
Usikkerhet	$f(\eta_h)$	%	0.85	0.94	1.02	1.06	1.04	1.02	0.97	1.01	0.98

Figur 4.3 viser detaljer fra beregning av usikkerheten i termodynamisk virkningsgrad metode a, testpunkt 8.

## Måling av pumpevirkningsgrad ved hjelp av termodynamisk metode

### Usikkerhet i mekanisk energi

#### Usikkerhet i mekanisk trykkenergi

	f [%]	e [ ]	
P1-1	0.185996		2.844319
P2-2	0.054452		10.44583
e(P1-1)	bara		0.00529
e(P2-2)	bara		0.005688
$\rho$	0	1020	
g	0		9.81
z innløp&probe		0.005	
z1-1		0.01	
z2-2		0.01	
$\Delta z$	m		-0.08
e(P'1-1)	bara		0.005407
e(P'2-2)	bara		0.005797
T1-1		0.001947	13.31976
T2-2		0.001909	13.50436
$\delta a / \delta T$			0.003537
$\delta a / \delta P$			0.000107
a tabell	0.2		0.962021
e(a)	m <sup>3</sup> /g		0.001924
f(Emp)	0.225558		731.2814
e(Emp)	J/kg		1.649462

#### Usikkerhet i mekanisk hastighetsenergi

	f [%]	e [ ]	
V bølge		0.01	10
t bølge		1	60
A probe	0.1		0.000154
f(c1-1)	0.016727		0.37894
f(c2-2)	0.016727		1.082687
e(Emc)	J/kg		0.019754

#### Usikkerhet i mekanisk potensiell energi

	f [%]	e [ ]	
z1-1		0.01	
z2-2		0.01	
z2-2-z1-1			-0.02
g	0		
f(Emz)	70.71068		-0.1962
e(Emz)	J/kg		-0.13873

#### Usikkerhet i mekanisk termisk energi

	f [%]	e [ ]	
T1-1		0.001947	13.31976
T2-2		0.001909	13.50436
P'1-1		0.005407	2.836314
P'2-2		0.005797	10.43782
Cp tabell	0.5		4189.694
$\delta C_p / \delta T$			1
$\delta C_p / \delta P$			0.333333
e(Cp)	J/kgK		20.94847
E1	0.4		1505.009
E4	0.6		1505.009
EmT			773.4092
e(EmT)	J/kg		11.39493

#### Total usikkerhet i Em

e(Em)	J/kg	11.51455
Em	J/kg	1505.009
f(Em)	%	0.765082

#### Usikkerhet i bestemmelse av hydraulisk virkningsgrad

f( $\eta_h$ )	%	0.794335
---------------	---	----------

### Usikkerhet spesifikk hydraulisk energi

#### Usikkerhet i hydraulisk trykkenergi

	f [%]	e [ ]	
P1	0.090747		3.10978
P4	0.163055		14.46981
$\rho$	0	1020	
g	0		9.81
z4		0.05	3
z4probe		0.01	2.7625
$\Delta z4$			0.2375
P'4			14.44604
e(P'4)	bara		0.024139
f(Ehp)	0.214388		1111.398
e(Ehp)	J/kg		2.3827

#### Usikkerhet i hydraulisk hastighetsenergi

	f [%]	e [ ]	
A1	0.1		4.908739
A4	0.1		0.148617
Qpumpe	1		852.5
f(c1)	1.004988		0.192967
f(c4)	1.004988		6.373581
e(Ehc)	J/kg		0.408252

#### Usikkerhet i hydraulisk potensiell energi

	f [%]	e [ ]	
g	0		9.81
z1		0.01	
z4		0.05	
z4-z1			2.46
f(Ehz)	2.072772		24.1326
e(Ehz)	J/kg		0.500214

#### Total usikkerhet i Eh

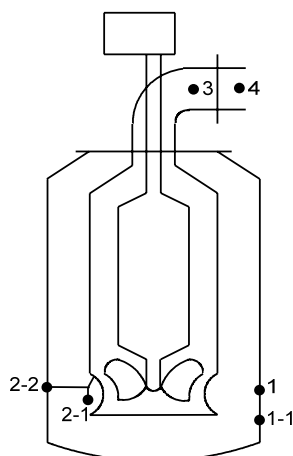
e(Eh)	J/kg	2.468632
Eh	J/kg	1155.823
f(Eh)	%	0.213582

Figur 4.3 Usikkerhetsberegning for kurve a, testpunkt 8

## 5 Sammenligning av termodynamisk og konvensjonell metode

Dette kapitlet vil sammenligne metodene og forutsetningene som er lagt til grunn for hver enkelt av dem.

Figur 3.2 viser hvor trykksensorene som brukes til å beregne virkningsgraden for konvensjonell metode er plassert. Løftehøyden til pumpen defineres mellom disse sensorene. Løftehøyden, den spesifikke hydrauliske energien, for termodynamisk metode er beregnet med ulike utløpstrykk. Virkningsgradskurve a og c har hydraulisk energi definert fra  $p'_4 - p_1$ . Løftehøyden i Tabell 4.2 og Tabell 4.4 er 0,3 m høyere enn løftehøyden i Tabell 4.5 for testpunkt 7 og 8. Dette skyldes ulik høydeforskjell mellom trykksensorene brukt i termodynamisk og konvensjonell metode. For virkningsgradskurve b er den hydrauliske energien definert over impelleren, mellom  $p'_{2-1}$  og  $p_1$ . Se Figur 3.5 og Figur 5.1 for plassering av trykksensorer for termodynamisk metode.



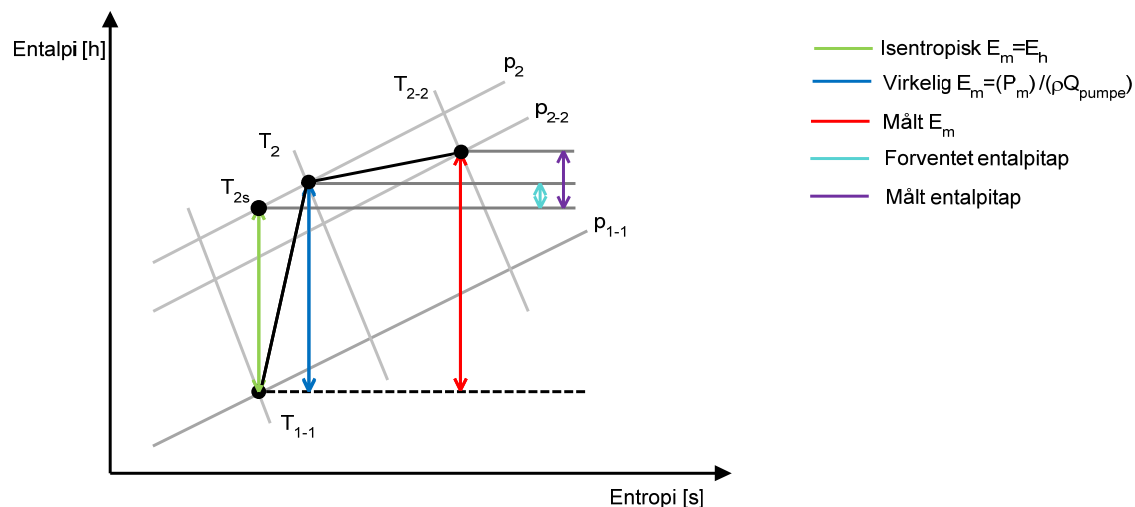
Figur 5.1 Skisse av SE-pumpe med målepunktene

Den spesifikke mekaniske energien som er beregnet for virkningsgrad a – c er høyere enn den en får ved å beregne  $E_m$  fra effekten på pumpeakslingen,  $P_m$ , se Tabell 5.1. Figur 5.2 viser et  $h$ - $s$ -diagram hvor spesifikk mekanisk energi for isentropisk prosess, virkeligprosess og målt ved  $(p'_{2-2}, T_{2-2})$  er tegnet inn. Trykkreduksjonen som skjer fra utløpet etter impelleren til målepunktet 2-2 foregår ikke ved konstant entalpi. Forventet entalpitap og målt entalpitap er også vist.

Tabell 5.1 Spesifikk mekanisk energi

Prosess	Enhet	a	b	c
Isentropisk prosess, $E_m = E_n$	J/kg	1156.0	1111.3	1156.0
Virkelig prosess, $E_m = P_m / (\rho Q_{pumpe})$	J/kg	1324.1	1324.1	1324.1
Målt prosess, $E_m = \text{målt}$	J/kg	1502.5	1502.5	1428.5



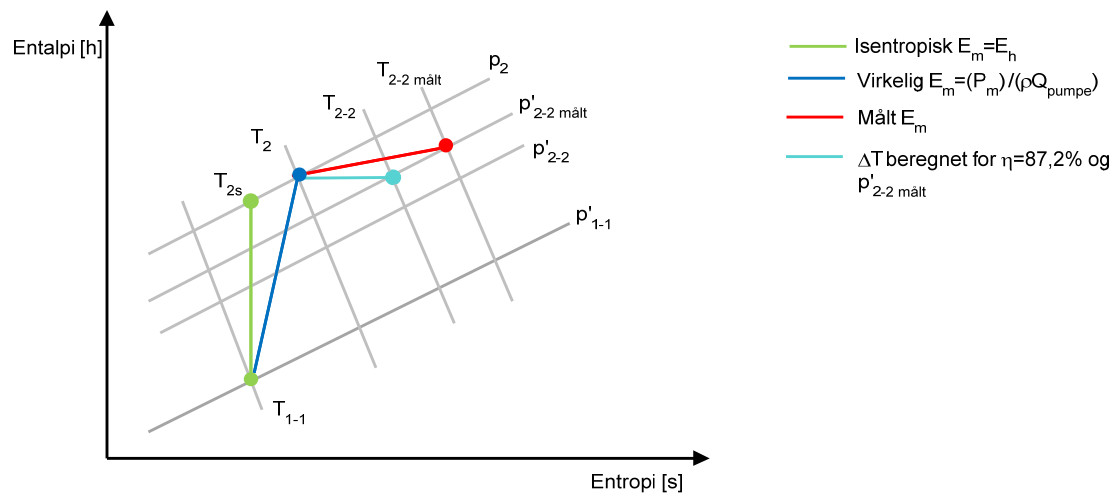


Figur 5.2 hs-diagram spesifikk mekanisk energi

Med utgangspunkt i virkningsgraden som er målt med konvensjonell metode ved  $Q_{design}$ , og trykkene som trykkene som inngår i  $E_{mp}$  er det forsøkt å komme frem til hvilken temperaturdifferanse dette tilsvarer, se Tabell 5.2. Dette et presenter grafisk i Figur 5.3.

Tabell 5.2  $\Delta T$

Metode	$\eta$ [%]	$E_m$ [J/kg]	$\Delta T$ [° C]	$(\Delta T_{m\ddot{a}lt}) - (\Delta T)$ [° C]
a	87.20	1325.66	0.14259	0.04222
b	87.20	1274.29	0.13033	0.05448
c	87.20	1325.66	0.01909	0.06010

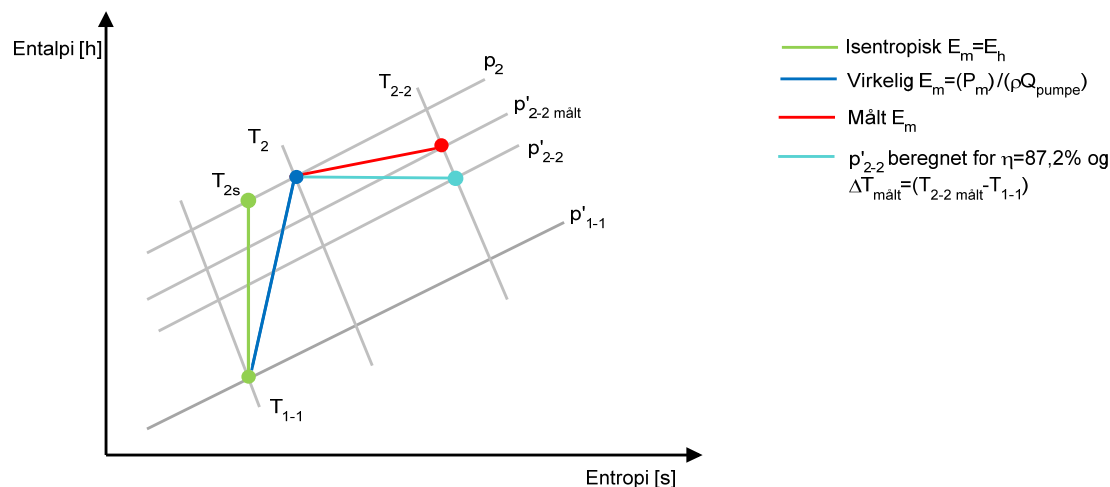


Figur 5.3 hs-diagram for  $\Delta T$

Videre er det samme gjort for å beregne hvilket utløpstrykk  $\eta=87,2\%$  og den målte temperaturdifferansen tilsvarer. Resultatene er presentert i Tabell 5.3 og Figur 5.4.

Tabell 5.3  $p'_{2-2}$ 

Metode	$\eta$ [%]	$E_m$ [J/kg]	$p'_{2-2}$ [bara]	$(p'_{2-2 \text{ målt}})-(p'_{2-2})$	$p'_3$ [bara]	$(p'_{3 \text{ målt}})-(p'_3)$
a	87.20	1325.66	8.5721	1.8383	-	-
b	87.20	1274.29	8.0382	2.3722	-	-
c	87.20	1325.66	-	-	12.9138	1.0689


 Figur 5.4 hs-diagram  $p'_{2-2}$ 

Resultatene for beregningene over er middelværdier av resultatene fra testpunkt 7 og testpunkt 8. De målte verdiene er hentet fra Vedlegg H.

Det statiske trykket som måles ved stengt ventil i målepunkt 2-1 er trykket inni pumpen etter impellerens utløp. For  $Q_{\text{design}}$  er  $p'_{2-1} = 14,14$  bara. Dette er midlere verdi for testpunkt 7 og 8. Trykkfallet fra  $p'_{2-1}$  til  $p'_{2-2}$  beregnet fra Bernoulli med tap er  $\Delta p \approx 3,81$  bar. Trykkfallet bidrar til temperaturøkning på  $\Delta T \approx 0,0892$  °C.

Forøk på å endre  $p'_{2-2}$  til 14,14 bar og å trekke temperaturdifferansen beregnet over fra temperaturdifferansen som er målt, fører til en økning på henholdsvis  $\Delta\eta = 0,6$  % og  $\Delta\eta = 0,9$  % for testpunkt 7 og 8. Se Tabell 5.4. I tabellen sees også det at den spesifikke mekaniske energien endrer seg lite.  $E_{mp}$  øker, mens  $E_{mT}$  synker tilsvarende. Selv om virkningsgraden øker noe som følge av denne endringen er den fortsatt svært mye lavere enn den beregnet fra den konvensjonelle målemetoden.

 Tabell 5.4  $\eta$  ved korreksjon av  $\Delta T$  og  $p'_{2-2}$ 

Parametre	Enheter	Målte verdier		Korrigerte verdier	
		a		a	
		Testpunkt		Testpunkt	
		7	8	7	8
$T_{2-2} - T_{1-1}$	°C	0.18502	0.184598	0.09582	0.0954
$p'_{2-2}$	bara	10.38	10.44	14.14	14.14
$z_{2-2} - z_{1-1}$	m	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02
$E_{mp}$	J/kg	724.54	731.28	1086.07	1087.44
$E_{mT}$	J/kg	775.19	773.41	401.46	399.69
$E_m$	J/kg	1500.05	1505.01	1487.85	1487.45
$\eta_h$	%	77.1	76.8	77.7	77.7

## 6 Diskusjon

### 6.1 Virkningsgrad

Virkningsgraden for termodynamisk metode a - c, er betydelig lavere enn virkningsgraden fra konvensjonell metode, Figur 4.2. Den konvensjonelle virkningsgraden er som forventet ut fra tidligere tester av pumpen, se kapittel 3.2.1.1. Teoretisk skal virkningsgraden fra termodynamisk metode være noe høyere enn virkningsgraden fra konvensjonell metode. Dette siden den konvensjonelle virkningsgraden er produktet av hydraulisk- og mekanisk virkningsgrad, mens den termodynamiske kun er hydraulisk virkningsgrad. Faktorer som kan ha påvirket måleresultatene og virkningsgraden fra termodynamisk metode diskuteres i de følgende avsnittene.

### 6.2 Måleusikkerhet

Nøyaktigheten til termometerne er svært god i følge kalibreringssertifikatene, se Vedlegg B. Nullpunkt kalibrering før målingene ble ikke utført, men termometerne kom tilbake fra kalibrering fra Sea-bird Electronics like før målingene ble gjennomført. Kravet fra ISO 5198 [3] til nøyaktigheten i trykksensorene oppfylles ikke i den nominelle nøyaktigheten oppgitt fra HBM, se kapittel 3.1.2.3. I følge kalibreringen er 5 av trykksensorene innenfor 0,3 %, og 3 av disse er innenfor kravet fra ISO 5198 [3], se Tabell 3.4. Trykksensoren i målepunkt 3, PT3, er den med dårligst nøyaktighet.

Måleusikkerheten i virkningsgraden ligger innenfor intervallet for usikkerhet gitt av ISO 5198 [3], se kapittel 2.3, for metode a og b. Metode c overstiger denne grensen for enkelte testpunkter, dette skyldes usikkerheten i trykksensor PT3. Måleusikkerheten for termodynamisk metode og konvensjonell metode faller ikke innenfor hverandres usikkerhet. Det vil si at det er en systematisk feil her, sannsynligvis i den termodynamiske metoden.

Tabellene fra IEC 41 [1] som er brukt til å finne spesifikk varmekapasitet og isotermisk faktor er som beskrevet i kapittel 3.3 for vann og ikke sjøvann som er pumpemediet. Ut fra definisjonen av "kaldt rent vann" i ISO 9906 [6] er det likevel valgt å benytte tabellene fra IEC 41 [1]. Dette medfører en systematisk feil i beregningene.

### 6.3 Testoppsett

#### 6.3.1 Termometer

Logging av temperaturen ble gjort med tre termometer. Termometeret  $T_{1-1}$  brukes som referanse. Temperaturstigningen fra  $T_{1-1}$  til  $T_{2-2}$  er høyere enn forventet, se kapittel 3.2.1.1 og Figur 4.1. Mulige årsaker til dette vil diskuteres senere.

Temperaturmålingen ved topp-bendet,  $T_3$ , var forventet til å være høyere enn  $(T_{2-2}-T_{1-1})$ , grunnet motoren som vannet strømmer langs. Hydraulikkoljen i motoren holder en temperatur på om lag 50 °C. Denne målingen ga imidlertid en lavere temperaturdifferanse,  $(T_3-T_{1-1})$ , enn  $(T_{2-2}-T_{1-1})$ .  $T_3$  kan være påvirket av flere faktorer: varmebidrag fra motoren, kjøling gjennom pumpehuden fra vannet i testtanken og varmeveksling med omgivelsene gjennom topp-bendet. Grunnet dette anbefales det å se bort fra metode c ved sammenligning av termodynamisk metode og konvensjonell metode.

Ingen av termometerne eller måleprobene var isolert, slik at målingene kan ha blitt påvirket av omgivelsestemperaturen. Termometerne var plassert forholdsvis nærme hverandre fysisk. Det antas derfor at en eventuell påvirkning fra omgivelsene har vært lik for alle termometerne.

### 6.3.2 Trykksensorer

Pumpe og testrigg var instrumentert med 6 trykksensorer, hvor av tre av disse målte trykk som er brukt i beregning av hydraulisk energi / løftehøyde. De øvrige tre trykksensorene var plassert i samme målepunkt som termometerne.

Løftehøyden for den konvensjonelle metoden beregnes mellom trykksensor på leveringsrør og trykksensor i testtank. For metode a og c er løftehøyden definert på samme måte. PT2-1 er brukt til å beregne løftehøyden for metode b, sammen med PT1. Dette gjør at virkningsgraden fra metode b ikke er direkte sammenlignbar med virkningsgraden fra den konvensjonelle metoden.

### 6.3.3 Volumstrøm forbi termometer

IEC 41 og ISO 5198 [1, 3] stiller krav til hvor stor volumstrømmen bør være forbi termometerne. Dette kravet er 0,1-0,5 l/s. For målingene her er volumstrømmen forbi  $T_2$  og  $T_3$  innenfor dette kravet, mens den for  $T_1$  er for liten. Volumstrømmen ved  $T_1$  er 0,06 l/s, se Vedlegg H.

Tabell 5.3 viser at reduksjon av strupingen i ventilen etter  $T_2$ , fører til en reduksjon av  $p'_{2-2}$ , mens volumstrømmen øker. Om temperaturen ikke endres vil virkningsgraden da øke til  $\eta \approx 87\%$ . For måleoppsettet må hydraulikkslangen og ventilen byttes ut, dette fordi ventilen var helt åpen under målingene. Videre kommer det an på hvor stor volumstrøm det er mulig å ha gjennom boringen/dysen i uttaket fra pumpen. Altså hvor mye dysens diameter begrenser volumstrømmen.

### 6.3.4 Måleoppsettet

Måleoppsettet ved  $T_{1-1}$  og  $T_3$  måler trykk og temperatur tilnærmet direkte. Ved  $T_{2-2}$  reduseres trykket når vannet ledes fra pumpen til målepunktet. Denne målemetoden krever at trykkreduksjonen skjer ved struping hvor entalpien holdes konstant, Figur 2.2.

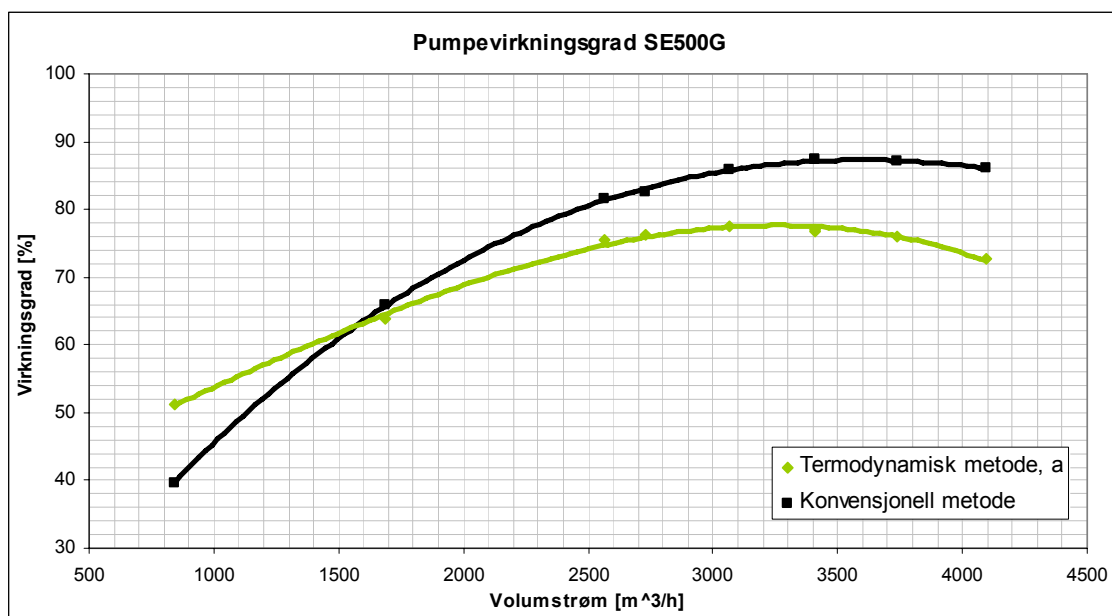
Virkningsgraden er lavere for metode a enn for konvensjonell metode. Tabell 5.1 og Figur 5.2 viser at entalpien endres fra utløpet til impelleren inni pumpen, punkt 2, til målepunkt 2-2. Forutsetningene for denne målemetoden innfris ikke.

Forsøk på å korrigere  $p'_{2-2}$  og  $T_{2-2}$  for trykktapet fra PT2-1, stengt ventil, til PT2-2 fører ikke til noen betydelig endring av virkningsgraden.

## 7 Konklusjon

Utregningen av den termodynamiske virkningsgraden ved metode b er ikke definert ved samme løftehøyde som metode a og c og konvensjonell metode. Dette gjør at resultatene fra metode b ikke er direkte sammenlignbar med de øvrige metodene. Videre kan  $T_3$  som benyttes i metode c være påvirket av flere faktorer. Usikkerheten rundt  $T_3$  gjør at det velges å se bort fra metode c i sammenligningen med konvensjonell metode.

Virkningsgradene fra metode a og konvensjonell metode står da tilbake som metodene det anbefales å sammenligne. Figur 7.1 viser pumpevirkningsgradene for termodynamisk metode a og konvensjonell metode. Virkningsgraden for termodynamisk metode er 77,5 % i BEP, mens den for konvensjonell metode er 87,2 % BEP. Måleusikkerheten for metode a tilfredsstiller kravene fra ISO 5198 [3]. Usikkerheten i konvensjonell metode gitt av ISO 9906 [6] og måleusikkerheten beregnet for metode a faller ikke innenfor hverandres usikkerhet. Dette tyder på at det er en systematisk usikkerhet i den termodynamiske metoden. Den systematiske feilen er antakelig i testoppsettet for målepunkt 2-2 hvor entalpien ikke holdes konstant under trykkreduksjonen.



Figur 7.1 Pumpevirkningsgrad

## 8 Videre arbeid

Testoppsettet for målepunkt 2-2 må gjennomgås og endres slik at entalpien holdes konstant når trykket reduseres.

Et alternativ kan være å vurdere direkte måling, hvor termometer og trykksensor plasseres inni testtanken, neddykket, umiddelbart etter uttaket fra pumpen. Isolering fra pumpemediet vil være mer krevende da instrumentene neddykkes i testtanken.

Alle måleinstrumentene som benyttes må tilfredsstille kravene fra ISO 5198 [3] for å redusere måleusikkerheten i termodynamisk metode.

Termometer og måleprober må isoleres for å eliminere usikkerheten om målingene påvirkes av omgivelsene.

Bruk av et loggesystem for trykk og temperatur vil forenkle selve gjennomføringen av målingene. Kalibreringskonstanter for trykkene bør legges inn i loggeprogrammet.

For implementering av termodynamisk metode på vanninjeksjonspumpe og boosterpumpe på brannmodul vises det til IEC 41 og ISO 5198 for plassering av målepunkt [1, 3]. Standardene anbefaler avstander fra målepunkt til innløp og utløp på pumper. Termodynamisk metode bør verifiseres med annen metode om mulig. Dette kan gjøres ved måling av omdreiningstall og motormoment. Måleusikkerheten bør også analyseres.

## 9 Referanseliste

1. IEC, *Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines*. IEC publication 41. 1991, Genève: IEC.
2. Kjølle, A., *Hydraulisk måleteknikk. Grunnleggende prinsipper og målemetoder*. 2 ed. 2003, Trondheim: Vannkraftlaboratoriet, NTNU.
3. ISO, *Sentrifugalpumper, halvaksial- og aksialpumper, Regler for hydrauliske ytelsesprøving. Nøyaktighetsklasse. (ISO 5198:1987)*. 1987, Genève: ISO.
4. Ramdal, J., *Forelesningsnotater i TEP4195 Turbomaskiner*. Vannkraftlaboratoriet, NTNU, 2008.
5. Wheeler, A.J. and A.R. Ganji, *Introduction to engineering experimentation*. 2004, Upper Saddle River, N.J.: Pearson/Prentice Hall. XI, 452 s.
6. ISO, *Sentrifugalpumper. Hydrauliske godkjenningssprøver av ytelse. Klasse 1 og 2. (ISO 9906:1999)*. 2000, Genève: ISO.
7. Framo, *Reliable pumping systems through innovation and robustnes*. 2009, Frank Mohn Flatøy AS: Flatøy.
8. Framo. *Frank Mohn Flatøy AS*. 2009 [cited 2009 27.04]; Available from: [www.framo.no](http://www.framo.no).
9. Framo, *Performance test procedure for Framo submerged electric pumps*. 2004, Frank Mohn Flatøy AS: Flatøy.
10. Sea-bird Electronics, I. *SBE 38 Digital Oceanographic Thermometer, With RS-232 or optional RS-485 Interface, User's manual*. 2006 [cited 2009 23.05]; Available from: <http://www.seabird.com/products/ModelList.htm>.
11. HBM. *P8AP Absolutt pressure transducer, Data sheet*. 2009 [cited 2009 23.05]; Available from: <http://www.hbm.com/en/menu/products/transducers-sensors/pressure-transducers/documentation/categorie/pressure/product/p8ap/?cHash=3b48038a0d&parent=&pg=3>.
12. Gjerstad, S., *Personlig kommunikasjon*. 2009, Frank Mohn Flatøy AS: Flatøy.
13. Framo, *Frank Mohn Flatøy AS*. 2009: Flatøy.
14. Framo, *Pumpekurve: ordrenr. 623421, pumpenr. 200319*. 2000, Frank Mohn Flatøy AS: Flatøy.
15. Ramdal, J., *Personlig kommunikasjon*. 2009, Vannkraftlaboratoriet NTNU: Trondheim.
16. Grilstad, J., *Personlig kommunikasjon*. 2009, Vannkraftlaboratoriet NTNU: Trondheim.
17. Nielsen, T.K., *Personlig kommunikasjon*. 2009, Vannkraftlaboratoriet NTNU: Trondheim.
18. Espetvedt, D., *Personlig kommunikasjon*. 2009, Frank Mohn Flatøy AS: Flatøy.





## Vedlegg

- A. Ligninger for usikkerhetsanalyse
- B. Kalibreringssertifikat SBE38, serienummer 0098-0100
- C. Utstysrliste for termodynamisk metode
- D. Kotehøyder i målepunktene
- E. Maskintegning og stykkliste for mekaniske overganger målepunkt 2-2
- F. LabVIEW
- G. Prosedyre for termodynamisk metode
- H. Målte verdier og utregninger termodynamisk metode
- I. Målte verdier og utregninger konvensjonell metode



## **Vedlegg A.**

### **Ligninger for usikkerhetsanalyse**



Detaljerte ligninger til beregning av måleusikkerhet i virkningsgrad beregnet fra termodynamisk måle metode. Vedlegget er basert på IEC 41 og samtaler med Storli [1, 2].

## A. Måleusikkerhet i termdynamisk virkningsgrad

$$f_{\eta} = \pm \sqrt{(f_{E_h})^2 + (f_{E_m})^2} \quad (\text{A.1})$$

### A.1 Spesifikk mekanisk energi

Spesifikk mekanisk energi er definert slik:

$$E_m = E_{mp} + E_{mT} + E_{mc} + E_{mz} \quad (\text{A.2})$$

Usikkerheten beregnes fra:

$$f_{E_m} = \pm \frac{e_{E_m}}{E_m} = \pm \frac{\sqrt{e_{E_{mp}}^2 + e_{E_{mT}}^2 + e_{E_{mc}}^2 + e_{E_{mz}}^2}}{E_{mp} + E_{mT} + E_{mc} + E_{mz}} \quad (\text{A.3})$$

#### A.1.1 Spesifikk mekanisk trykkenergi

$$E_{mp} = \bar{a} (p'_{2-2} - p'_{1-1}) \quad (\text{A.4})$$

$$f_{E_{mp}} = \sqrt{f_{\bar{a}}^2 + \frac{(e_{p'_{2-2}}^2 + e_{p'_{1-1}}^2)}{(p'_{2-2} - p'_{1-1})^2}} \quad (\text{A.5})$$

#### A.1.2 Spesifikk mekanisk hastighetsenergi

$$E_{mc} = \frac{1}{2} (c_{2-2}^2 - c_{1-1}^2) \quad (\text{A.6})$$

$$e_{E_{mc}} = \sqrt{c_{2-2}^4 f_{c_{2-2}}^2 + c_{1-1}^4 f_{c_{1-1}}^2} \quad (\text{A.7})$$

#### A.1.3 Spesifikk mekanisk termisk energi

$$E_{mT} = \bar{C}_p (T_2 - T_1) \quad (\text{A.8})$$

$$e_{E_{mT}} = \sqrt{\left( E_{mT} \cdot \sqrt{f_{C_p}^2 + \frac{(e_{T_2}^2 + e_{T_1}^2)}{(T_2 - T_1)^2}} \right)^2 + e_{E_1}^2 + e_{E_4}^2} \quad (\text{A.9})$$

### A.1.4 Spesifikk mekanisk potensiell energi

$$E_{mz} = g(z_{2-2} - z_{1-1}) \quad (\text{A.10})$$

$$f_{E_{mz}} = \sqrt{f_g^2 + \frac{(e_{z_{2-2}}^2 + e_{z_{1-1}}^2)}{(z_{2-2} - z_{1-1})^2}} \quad (\text{A.11})$$

### A.2 Spesifikk hydraulisk energi

Spesifikk hydraulisk energi er definert slik:

$$E_h = E_{hp} + E_{hc} + E_{hz} \quad (\text{A.12})$$

$$f_{E_h} = \pm \frac{e_{E_h}}{E_h} = \pm \frac{\sqrt{e_{E_{hp}}^2 + e_{E_{hc}}^2 + e_{E_{hz}}^2}}{E_{hp} + E_{hc} + E_{hz}} \quad (\text{A.13})$$

### A.2.1 Spesifikk hydraulisk trykkenergi

$$E_{h \text{ trykk}} = \frac{1}{\rho}(p_4 - p_1) \quad (\text{A.14})$$

$$f_{E_{hp}} = \sqrt{f_\rho^2 + \frac{(e_{p'_4}^2 + e_{p'_1}^2)}{(p'_4 - p'_1)^2}} \quad (\text{A.15})$$

### A.2.2 Spesifikk hydraulisk hastighetsenergi

$$E_{h \text{ kinetisk}} = \frac{1}{2}(c_4^2 - c_1^2) \quad (\text{A.16})$$

$$e_{E_{hc}} = \sqrt{c_4^4 f_{c_4}^2 + c_1^4 f_{c_1}^2} \quad (\text{A.17})$$

### A.2.3 Spesifikk hydraulisk potensiell energi

$$E_{h \text{ potensiell}} = g(z_4 - z_1) \quad (\text{A.18})$$

$$f_{E_{hz}} = \sqrt{f_g^2 + \frac{(e_{z_4}^2 + e_{z_1}^2)}{(z_4 - z_1)^2}} \quad (\text{A.19})$$

## A.3 Størrelser og usikkerheter som brukes i den spesifikke mekaniske energiens usikkerhet

### A.3.1 Isentropisk konstant ved midlere temperatur og trykk

$$e_{\bar{a}} = \sqrt{\left( \left. \frac{\partial a}{\partial T} \right|_{T=\frac{T_1+T_2}{2}} \right)^2 \cdot (e_{T_1}^2 + e_{T_2}^2) + \left( \left. \frac{\partial a}{\partial p} \right|_{p=\frac{p'_{1-1}+p'_{2-1}}{2}} \right)^2 \cdot (e_{p'_{1-1}}^2 + e_{p'_{2-1}}^2) + e_{a_{table}}^2} \quad (\text{A.20})$$

Fra [1]

$$f_{a_{table}} = 0,2\%$$

### A.3.2 Trykk ved temperaturmålepunkt i probe

$$p'_{1-1} = p_{1-1} + \rho \cdot g \cdot (z_{innløp\&probe} - z_{1-1}) \quad (\text{A.21})$$

$$e_{p'_{1-1}} = \sqrt{e_{p_{1-1}}^2 + \left( \rho \cdot g \cdot (z_{innløp\&probe} - z_{1-1}) \right)^2 \cdot \left( f_{\rho}^2 + f_g^2 + \frac{(e_{z_{innløp\&probe}}^2 + e_{z_{1-1}}^2)}{(z_{innløp\&probe} - z_{1-1})^2} \right)} \quad (\text{A.22})$$

$$f_{p_{1-1}} = \sqrt{(f_{p_{1-1}tilfeldig})^2 + (f_{p_{1-1}systematisk})^2} \quad (\text{A.23})$$

$$e_{p_{1-1}tilfeldig} = \pm \frac{t_{95,v} \cdot s_{p_{1-1}}}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.24})$$

Ligningene over benyttes også for  $p'_{2-2}$ .

### A.3.3 Hastighet ved temperaturmålepunkt i probe

$$c_{1-1} = \frac{Q_{bøtte}}{A_{probe}} = \frac{V_{bøtte}}{A_{probe} \cdot t_{bøtte}} \quad (\text{A.25})$$

$$f_{c_{1-1}} = \sqrt{f_{V_{bøtte}}^2 + f_{t_{bøtte}}^2 + f_{A_{probe}}^2} \quad (\text{A.26})$$

Ligningene over benyttes også for  $c_{2-2}$ .

### A.3.4 Spesifikk varmekapasitet

$$\bar{C}_p = C_p \left( \frac{T_1 + T_2}{2}, \frac{p_{1-1} + p_{2-2}}{2} \right) \quad (\text{A.27})$$

$$e_{Cp} = \sqrt{\left(\left.\frac{\partial Cp}{\partial T}\right|_{T=\frac{T_1+T_2}{2}}\right)^2 \cdot (e_{T_1}^2 + e_{T_2}^2) + \left(\left.\frac{\partial Cp}{\partial p}\right|_{p=\frac{p'_{1-1}+p'_{2-1}}{2}}\right)^2 \cdot (e_{p'_{1-1}}^2 + e_{p'_{2-1}}^2) + e_{Cp_{table}}^2} \quad (\text{A.28})$$

Fra [1]

$$f_{C_{p_{table}}} = 0,5\%$$

### A.3.5 Temperatur ved målepunkt i probe

$$e_{T_{i-1}} = \sqrt{(e_{T_{i-1},\text{tilfeldig}})^2 + (e_{T_{i-1},\text{systematisk}})^2} \quad (\text{A.29})$$

$$e_{T_{i-1},\text{tilfeldig}} = \pm \frac{t_{95,v} \cdot s_{T_{i-1}}}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.30})$$

Usikkerheten for  $T_2$  og  $T_3$  finnes fra ligningene over.

### A.3.6 Energifordeling ved innløp

$$e_{E_1} = 0,4\% \cdot E_m$$

### A.3.7 Energifordeling ved utløp

$$e_{E_4} = 0,6\% \cdot E_m$$

### A.3.8 Massetetthet

Usikkerheten i massetettheten er her satt til:

$$f_{\rho} \approx 0$$

Når  $\rho$  finnes fra tabeller, [1], kan usikkerheten beregnes slik:

$$e_{\rho_{i-1}} = \sqrt{\left(\left.\frac{\partial \rho}{\partial T}\right|_{T=T_i}\right)^2 \cdot e_{T_i}^2 + \left(\left.\frac{\partial \rho}{\partial p}\right|_{p=p'_{i-1}}\right)^2 \cdot e_{p'_{i-1}}^2 + e_{\rho_{table}}^2} \quad (\text{A.31})$$

Fra [1]

$$f_{\rho_{table}} = 0,1\%$$

### A.3.9 Gravitasjonskonstant

$$f_g \approx 0$$



### A.3.10 Stedshøyder

$$e_{z_{1-1}} = 0,01$$

$$e_{z_{2-2}} = 0,01$$

$$e_{z_{innløp\&probe}} = 0,005$$

## A.4 Størrelser og usikkerheter som brukes i den spesifikke hydrauliske energiens usikkerhet

### A.4.1 Massetetthet

Usikkerheten i massetettheten er her satt til:

$$f_{\rho} \approx 0$$

Når  $\rho$  finnes fra tabeller, [1], kan usikkerheten beregnes slik:

$$e_{\bar{\rho}} = \sqrt{\left( \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_{T=\frac{T_1+T_2}{2}} \right)^2 \cdot (e_{T_1}^2 + e_{T_2}^2) + \left( \left. \frac{\partial \rho}{\partial p} \right|_{p=\frac{p'_{1-1}+p'_{2-2}}{2}} \right)^2 \cdot (e_{p'_{1-1}}^2 + e_{p'_{2-2}}^2) + e_{\rho_{table}}^2} \quad (\text{A.32})$$

Fra [1]

$$f_{\rho_{table}} = 0,1\%$$

### A.4.2 Trykk ved senterlinje leveringsrør

$$p'_{4} = p_4 + \rho \cdot g \cdot (z_{4probe} - z_4) \quad (\text{A.33})$$

$$e_{p'_{4}} = \sqrt{e_{p_4}^2 + (\rho \cdot g \cdot (z_{4probe} - z_4))^2 \cdot \left( f_{\rho}^2 + f_g^2 + \frac{(e_{z_{4probe}}^2 + e_{z_4}^2)}{(z_{4probe} - z_4)^2} \right)} \quad (\text{A.34})$$

$$f_{p_4} = \sqrt{(f_{p_4,tilfeldig})^2 + (f_{p_4,systematisk})^2} \quad (\text{A.35})$$

$$e_{p_4,tilfeldig} = \pm \frac{t_{95,v} \cdot S_{p_4}}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.36})$$

### A.4.3 Trykk i testtank/innløp

$$f_{p_1} = \sqrt{(f_{p_1,tilfeldig})^2 + (f_{p_1,systematisk})^2} \quad (\text{A.37})$$

$$e_{p_1, \text{tilfeldig}} = \pm \frac{t_{95, \nu} \cdot s_{p_1}}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.38})$$

#### A.4.4 Hastighet utløp

$$c_4 = \frac{Q_{pumpe}}{A_4} \quad (\text{A.39})$$

$$f_{c_4} = \sqrt{f_{Q_{pumpe}}^2 + f_{A_4}^2} \quad (\text{A.40})$$

$$f_{Q_{pumpe}} = 1,0\%$$

$$f_{A_4} = 0,1\%$$

$$f_{A_1} = 0,1\%$$

Usikkerheten i hastighet innløp beregnes på samme måte.

#### A.4.5 Gravitasjonskonstant

$$f_g \approx 0$$

#### A.4.6 Stedshøyder

$$e_{z_4} = 0,05$$

$$e_{z_{4 \text{ probe}}} = 0,01$$

$$e_{z_1} = 0,01$$

### Referanseliste

1. IEC, *Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines. IEC publication 41*. 1991, Genève: IEC.
2. Storli, P.-T., *Persolig kommunikasjon*. 2009, Vannkraftlaboratoriet, NTNU: Trondheim.

**Vedlegg B.**

**Kalibreringssertifikat SBE38, serienummer 0098-0100**



# SEA-BIRD ELECTRONICS, INC.

1808 136th Place N.E., Bellevue, Washington, 98005 USA

Phone: (425) 643 - 9866 Fax (425) 643 - 9954 Email: seabird@seabird.com

SENSOR SERIAL NUMBER: 0098  
CALIBRATION DATE: 11-Mar-09

SBE 38 TEMPERATURE CALIBRATION DATA  
ITS-90 TEMPERATURE SCALE

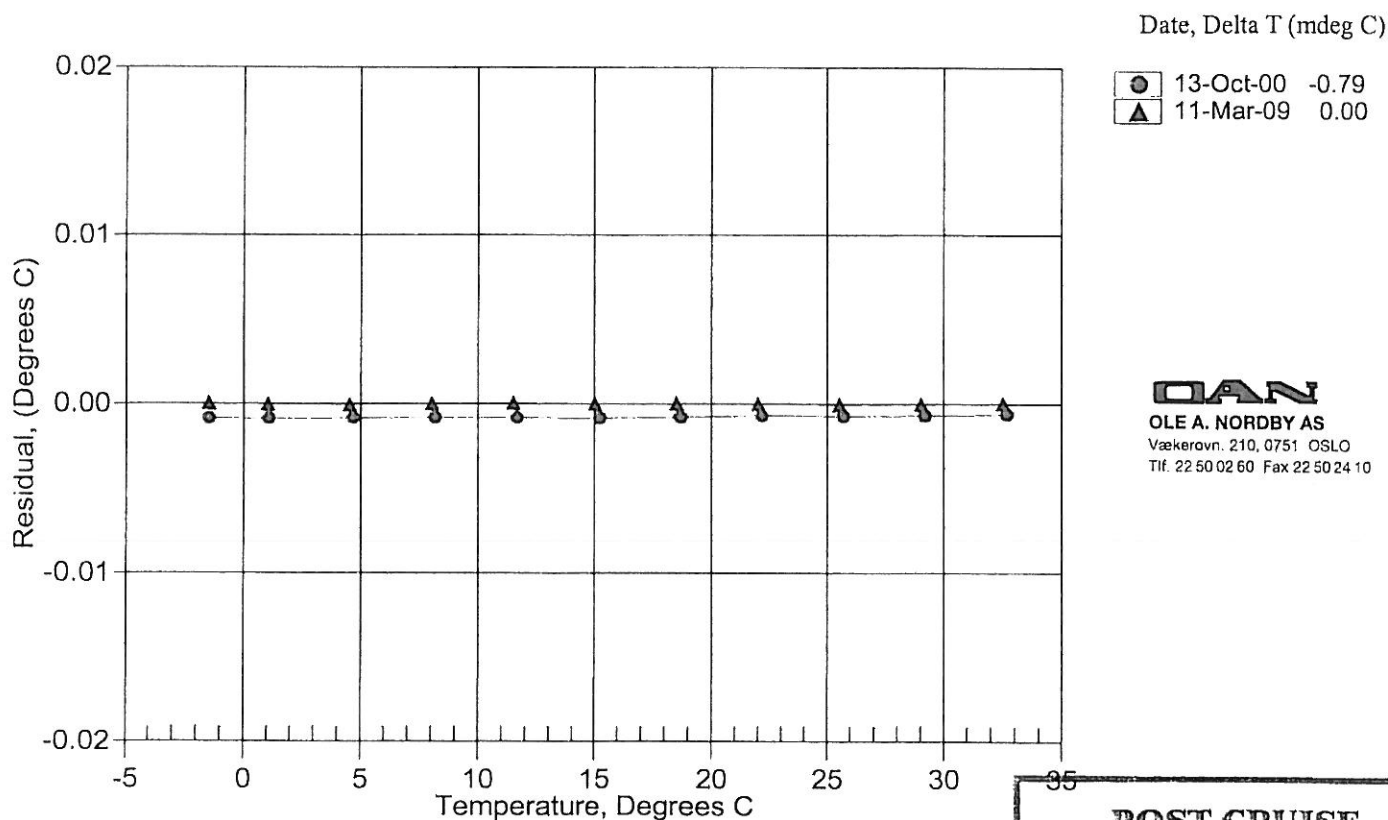
## ITS-90 COEFFICIENTS

a0 = 3.200406e-006  
a1 = 2.742308e-004  
a2 = -2.428370e-006  
a3 = 1.539262e-007

BATH TEMP (ITS-90)	INSTRUMENT OUTPUT	INST TEMP (ITS-90)	RESIDUAL (ITS-90)
-1.50010	835257.9	-1.50007	0.00003
0.99990	744964.9	0.99988	-0.00002
4.49990	636559.3	4.49984	-0.00006
7.99990	545724.9	7.99991	0.00001
11.49990	469355.8	11.49994	0.00004
14.99990	404934.3	14.99992	0.00002
18.49990	350413.6	18.49992	0.00002
21.99990	304127.2	21.99989	-0.00001
25.49990	264710.5	25.49987	-0.00003
28.99990	231043.5	28.99987	-0.00003
32.49990	202203.7	32.49994	0.00004

Temperature ITS-90 =  $1 / \{a_0 + a_1[\ln(n)] + a_2[\ln^2(n)] + a_3[\ln^3(n)]\} - 273.15$  (°C)

Residual = instrument temperature - bath temperature



**QAN**

OLE A. NORDBY AS  
Vækerøvn. 210, 0751 OSLO  
Tlf. 22 50 02 60 Fax 22 50 24 10

**POST CRUISE  
CALIBRATION**



# SEA-BIRD ELECTRONICS, INC.

1808 - 136th Place Northeast, Bellevue, Washington 98005 USA

Phone: (425) 643-9866 Fax: (425) 643-9954 www.seabird.com

## Temperature Calibration Report

Customer:	Ole A. Nordby AS		
Job Number:	53793	Date of Report:	3/12/2009
Model Number:	SBE 38	Serial Number:	380098

*Temperature sensors are normally calibrated 'as received', without adjustments, allowing a determination sensor drift. If the calibration identifies a problem, then a second calibration is performed after work is completed. The 'as received' calibration is not performed if the sensor is damaged or non-functional, or by customer request.*

*An 'as received' calibration certificate is provided, listing coefficients to convert sensor frequency to temperature. Users must choose whether the 'as received' calibration or the previous calibration better represents the sensor condition during deployment. In SEASOFT enter the chosen coefficients using the program SEACON. The coefficient 'offset' allows a small correction for drift between calibrations (consult the SEASOFT manual). Calibration coefficients obtained after a repair apply only to subsequent data.*

### 'AS RECEIVED CALIBRATION'

Performed     Not Performed

Date:

Drift since last cal:  Degrees Celsius/year

Comments:

### 'CALIBRATION AFTER REPAIR'

Performed     Not Performed

Date:

Drift since Last cal:  Degrees Celsius/year

Comments:

# SEA-BIRD ELECTRONICS, INC.

1808 136th Place N.E., Bellevue, Washington, 98005 USA

Phone: (425) 643 - 9866 Fax (425) 643 - 9954 Email: seabird@seabird.com

SENSOR SERIAL NUMBER: 0099  
CALIBRATION DATE: 11-Mar-09

SBE 38 TEMPERATURE CALIBRATION DATA  
ITS-90 TEMPERATURE SCALE

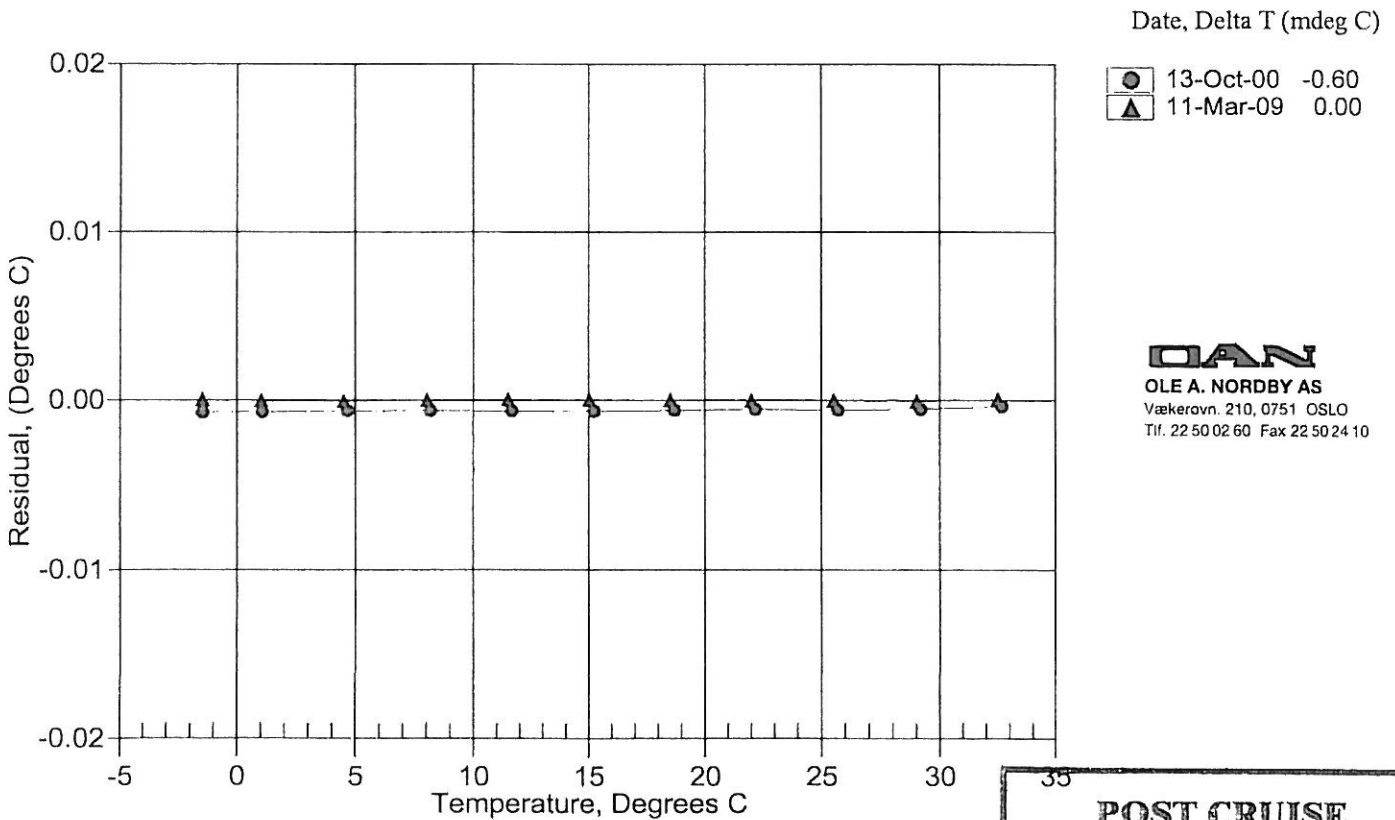
## ITS-90 COEFFICIENTS

a0 = -2.196042e-005  
a1 = 2.792827e-004  
a2 = -2.743923e-006  
a3 = 1.637636e-007

BATH TEMP (ITS-90)	INSTRUMENT OUTPUT	INST TEMP (ITS-90)	RESIDUAL (ITS-90)
-1.50010	807494.2	-1.50006	0.00004
0.99990	720667.2	0.99987	-0.00003
4.49990	616340.5	4.49983	-0.00007
7.99990	528845.8	7.99991	0.00001
11.49990	455220.8	11.49994	0.00004
14.99990	393061.4	14.99993	0.00003
18.49990	340412.2	18.49992	0.00002
21.99990	295678.7	21.99988	-0.00002
25.49990	257554.3	25.49989	-0.00001
28.99990	224967.0	28.99984	-0.00006
32.49990	197030.5	32.49995	0.00005

Temperature ITS-90 =  $1 / \{a_0 + a_1[\ln(n)] + a_2[\ln^2(n)] + a_3[\ln^3(n)]\} - 273.15$  (°C)

Residual = instrument temperature - bath temperature



**IAN**

OLE A. NORDBY AS

Vækeravn. 210, 0751 OSLO

Tlf. 22 50 02 60 Fax 22 50 24 10

**POST CRUISE  
CALIBRATION**



# SEA-BIRD ELECTRONICS, INC.

1808 - 136th Place Northeast, Bellevue, Washington 98005 USA

Phone: (425) 643-9866 Fax: (425) 643-9954 www.seabird.com

## Temperature Calibration Report

Customer:	Ole A. Nordby AS		
Job Number:	53793	Date of Report:	3/12/2009
Model Number:	SBE 38	Serial Number:	380099

*Temperature sensors are normally calibrated 'as received', without adjustments, allowing a determination sensor drift. If the calibration identifies a problem, then a second calibration is performed after work is completed. The 'as received' calibration is not performed if the sensor is damaged or non-functional, or by customer request.*

*An 'as received' calibration certificate is provided, listing coefficients to convert sensor frequency to temperature. Users must choose whether the 'as received' calibration or the previous calibration better represents the sensor condition during deployment. In SEASOFT enter the chosen coefficients using the program SEACON. The coefficient 'offset' allows a small correction for drift between calibrations (consult the SEASOFT manual). Calibration coefficients obtained after a repair apply only to subsequent data.*

### 'AS RECEIVED CALIBRATION'

Performed     Not Performed

Date:

Drift since last cal:  Degrees Celsius/year

Comments:

### 'CALIBRATION AFTER REPAIR'

Performed     Not Performed

Date:

Drift since Last cal:  Degrees Celsius/year

Comments:



# SEA-BIRD ELECTRONICS, INC.

1808 136th Place N.E., Bellevue, Washington, 98005 USA

Phone: (425) 643 - 9866 Fax (425) 643 - 9954 Email: seabird@seabird.com

SENSOR SERIAL NUMBER: 0100  
CALIBRATION DATE: 11-Mar-09

SBE 38 TEMPERATURE CALIBRATION DATA  
ITS-90 TEMPERATURE SCALE

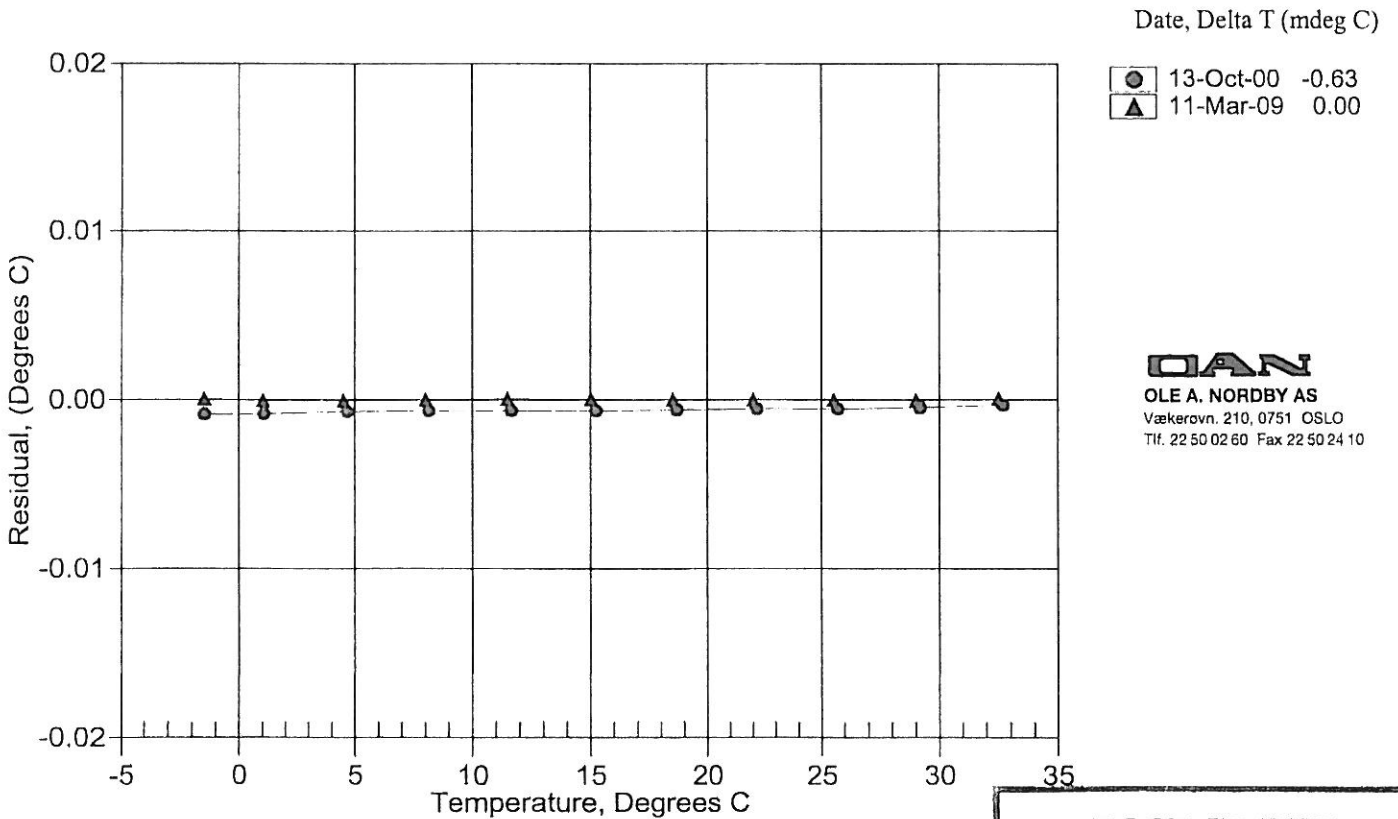
## ITS-90 COEFFICIENTS

a0 = -2.810360e-005  
a1 = 2.823300e-004  
a2 = -2.942679e-006  
a3 = 1.707526e-007

BATH TEMP (ITS-90)	INSTRUMENT OUTPUT	INST TEMP (ITS-90)	RESIDUAL (ITS-90)
-1.50010	764807.4	-1.50005	0.00005
0.99990	682853.8	0.99986	-0.00004
4.49990	584331.4	4.49983	-0.00007
7.99990	501656.4	7.99991	0.00001
11.49990	432047.1	11.49996	0.00006
14.99990	373246.6	14.99993	0.00003
18.49990	323415.6	18.49990	0.00000
21.99990	281054.3	21.99989	-0.00001
25.49990	244933.8	25.49988	-0.00002
28.99990	214043.9	28.99985	-0.00005
32.49990	187550.3	32.49995	0.00005

Temperature ITS-90 =  $1 / \{a_0 + a_1[\ln(n)] + a_2[\ln^2(n)] + a_3[\ln^3(n)]\} - 273.15$  (°C)

Residual = instrument temperature - bath temperature



**QIAN**

OLE A. NORDBY AS  
Vækerovn. 210, 0751 OSLO  
Tlf. 22 50 02 60 Fax 22 50 24 10

**POST CRUISE  
CALIBRATION**



# SEA-BIRD ELECTRONICS, INC.

1808 - 136th Place Northeast, Bellevue, Washington 98005 USA

Phone: (425) 643-9866 Fax: (425) 643-9954 www.seabird.com

## Temperature Calibration Report

Customer:	Ole A. Nordby AS		
Job Number:	53793	Date of Report:	3/12/2009
Model Number:	SBE 38	Serial Number:	380100

*Temperature sensors are normally calibrated 'as received', without adjustments, allowing a determination sensor drift. If the calibration identifies a problem, then a second calibration is performed after work is completed. The 'as received' calibration is not performed if the sensor is damaged or non-functional, or by customer request.*

*An 'as received' calibration certificate is provided, listing coefficients to convert sensor frequency to temperature. Users must choose whether the 'as received' calibration or the previous calibration better represents the sensor condition during deployment. In SEASOFT enter the chosen coefficients using the program SEACON. The coefficient 'offset' allows a small correction for drift between calibrations (consult the SEASOFT manual). Calibration coefficients obtained after a repair apply only to subsequent data.*

### 'AS RECEIVED CALIBRATION'

Performed     Not Performed

Date:

Drift since last cal:  Degrees Celsius/year

Comments:

### 'CALIBRATION AFTER REPAIR'

Performed     Not Performed

Date:

Drift since Last cal:  Degrees Celsius/year

Comments:

## **Vedlegg C.**

### **Utstysliste for termodynamisk metode**



## Utstysrliste for termodynamisk metode

Antall	Utstyr
3	Termometer type SBE38
6	Trykksensorer
1	Strømkilde
3	Måleprober
3	Hydraulikkslanger
3	Nåleventiler
1	Signalomformer RS-485 – usb, lånt fra Vannkraftlaboratoriet NTNU
1	QuantumX fra HBM
1	PC med LabVIEW
1	PC med Catman
1	Mekaniske overganger og hydraulikkslange for målepunkt 2-2, se Vedlegg E

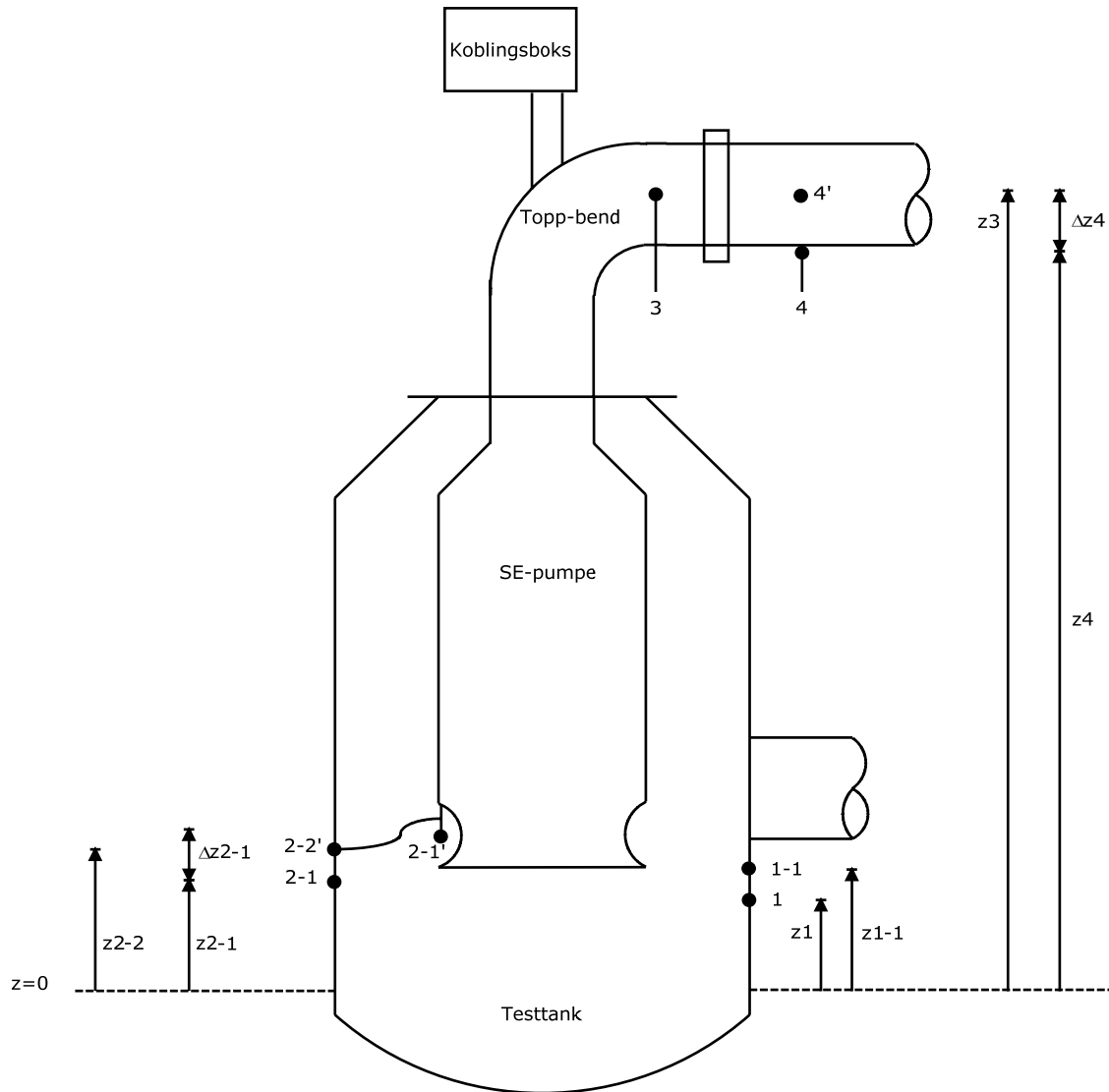


**Vedlegg D.**  
**Kotehøyder i målepunktene**





Figur 1 viser hvor de ulike kotehøydene for måleoppsettet for termodynamisk metode er definert.



**Figur 1** Oversikt over kotehøyder for måleoppsett termodynamisk metode



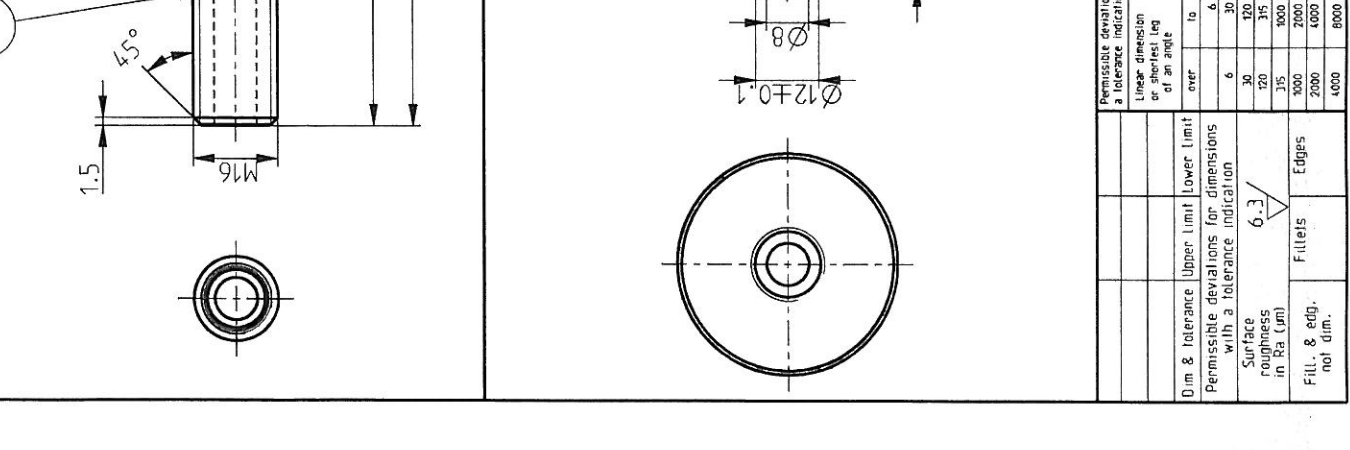
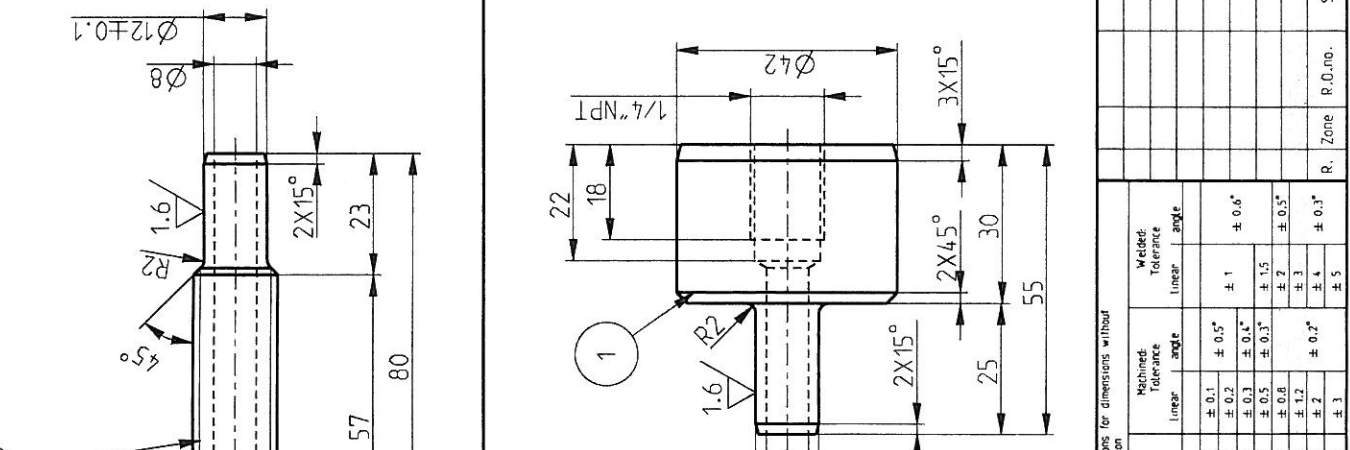
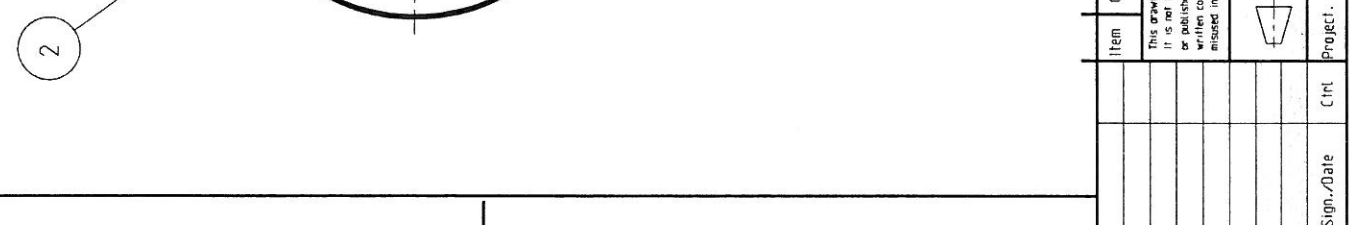
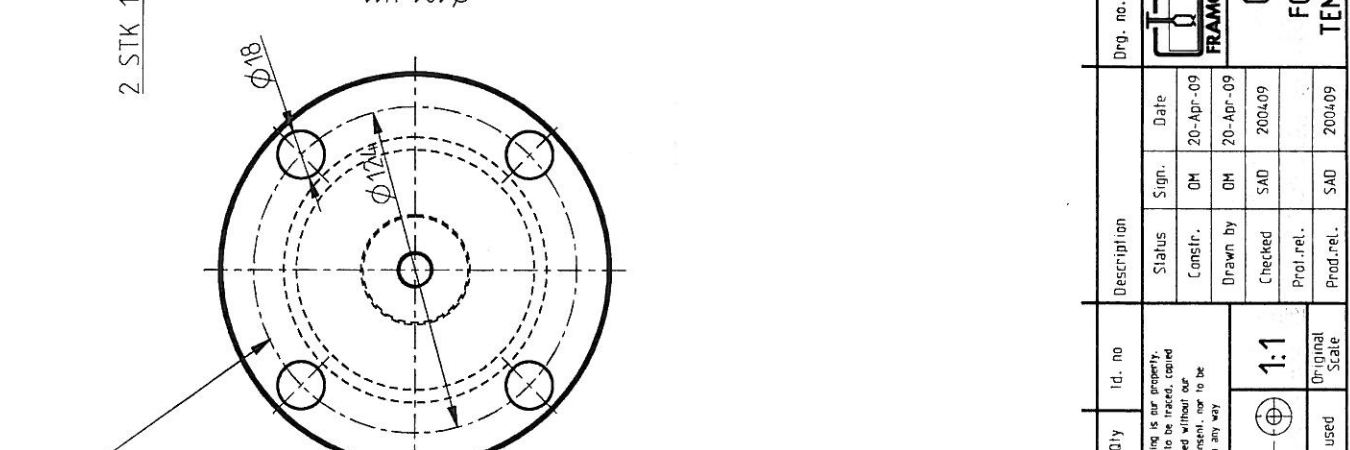
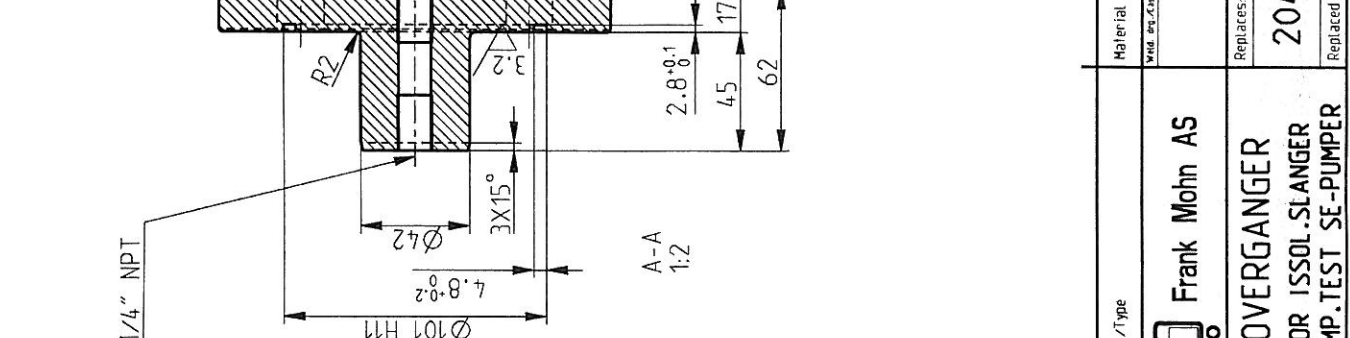
## **Vedlegg E.**

### **Maskintegning og stykke liste for mekaniske overganger målepunkt 2-2**



F E D C B A

1 2 3 4 5 6 7 8



Permissible deviations for dimensions without a tolerance indication		Mechanical		Welded	
Linear dimension or shortest leg of an angle	to	Linear	angle	Linear	angle
6	6	± 0.1	± 0.5°	± 1	± 0.6°
30	120	± 0.2	± 0.4°	± 1.5	± 0.5°
120	315	± 0.3	± 0.3°	± 2	± 0.5°
315	1000	± 0.5	± 0.6	± 3	± 1
1000	2000	± 0.8	± 1.2	± 4	± 1
2000	4000	± 1.2	± 0.7°	± 5	± 0.3°
4000	8000	± 2	± 1	± 5	± 0.3°

Item	Qty	Id. no	Description		Drng. no./Type	Material
This drawing is our property. It is not to be traced, copied or published without our written consent, nor to be misused in any way.			Status	Date	FRANK MOHN AS	2044-576-3
Project. used			Constr.	20-Apr-09		
Original Scale			Drawn by	20-Apr-09	OVERGANGER FOR ISSOL-SLANGER TEMP. TEST SE-PUMPER	Replaces:
1:1			Checked	2004/09		
R. Zone			Prod. rel.		2044-576-3	Replaced by:
R. O. no.			Prod. rel.	2004/09		

2 STK 1/4" NPT

A-A 1:2

Ø150

R2

3.2

2.8+0.1

4.5

17

62

Ø42

3X15°

4.8+0.2

Ø101 H11

Ø8

1.5

55°

M16

57

80

23

2X15°

R2

1.6

Ø12±0.1

Ø8

22

18

1/4" NPT

Ø42

3X15°

2X45°

30

55

25

2X15°

Ø8

Ø12±0.1

Ø150

R2

3.2

2.8+0.1

4.5

17

62

Ø42

3X15°

4.8+0.2

Ø101 H11

A-A 1:2

Ø150

R2

3.2

2.8+0.1

4.5

17

62

Ø42

3X15°

4.8+0.2

Ø101 H11

A-A 1:2

Ø150

R2

3.2

2.8+0.1

4.5

17

62

Ø42

3X15°

4.8+0.2

Ø101 H11

A-A 1:2

Ø150

R2

3.2

2.8+0.1

4.5

17

62

Ø42

3X15°

4.8+0.2

Ø101 H11

A-A 1:2

Ø150

R2

3.2

2.8+0.1

4.5

17

62

Ø42

3X15°

4.8+0.2

Ø101 H11

A-A 1:2

Ø150

R2

3.2

2.8+0.1

4.5

17

62

Ø42

3X15°

4.8+0.2

Ø101 H11

A-A 1:2

Ø150

R2

3.2

2.8+0.1

4.5

17

62

Ø42

3X15°

4.8+0.2

Ø101 H11

A-A 1:2

NIVÅ	POS. ARTIKKEL	BETEGNELSE DIMENSJON SERTIFIKATER/DOKUMENTER	DELER TIL TEMP. TEST SE	TEGNINGSNR. MATERIAL	REV VARETYPE	ANT. SENH	TOTAL AENH ST DI	PH OP	BA SN
	2044576301			F29258					
1	1	2044576301-01	OVERGANG ISSOL. PUMPESIDE	2044-576-3		1.0 STK	1.000 STK	NP	N N
			BAR CIRCULAR	1.4404					
2	1	2079580	Ø 45	1.4404		50.0 MM	0.050 M	I0	N N
1	2	2044576301-02	OVERGANG ISSOL. TANKSIDE	2044-576-3		1.0 STK	1.000 STK	NP	N N
			BAR CIRCULAR	1.4404					
2	1	108282	Ø150	1.4404		70.0 MM	0.070 M	I0	N N
1	3	2044576301-03	STUD OVERGANG PUMPESIDE	2044-576-3		1.0 STK	1.000 STK	NP	N N
			STUD	DIN938					
2	1	F13139	M16X 80	A4-80 ISO 3506		1.0 STK	1.000 STK	I8	N N
			T-EQUAL	ETM12-316					
1	50	176875	12	1.4401		1.0 STK	1.000 STK	I12	N N
1	51	F6317	HOSE CLAMP	PC-20055-SS		2.0 STK	2.000 STK	I4	N N
			45- 55	1.4404					
1	200	F21292	O-RING	NITRIIL90 2-240		1.0 STK	1.000 STK	I4	N N
			NI 94.84X3.53	90NBR					

**Vedlegg F.**  
**LabVIEW**





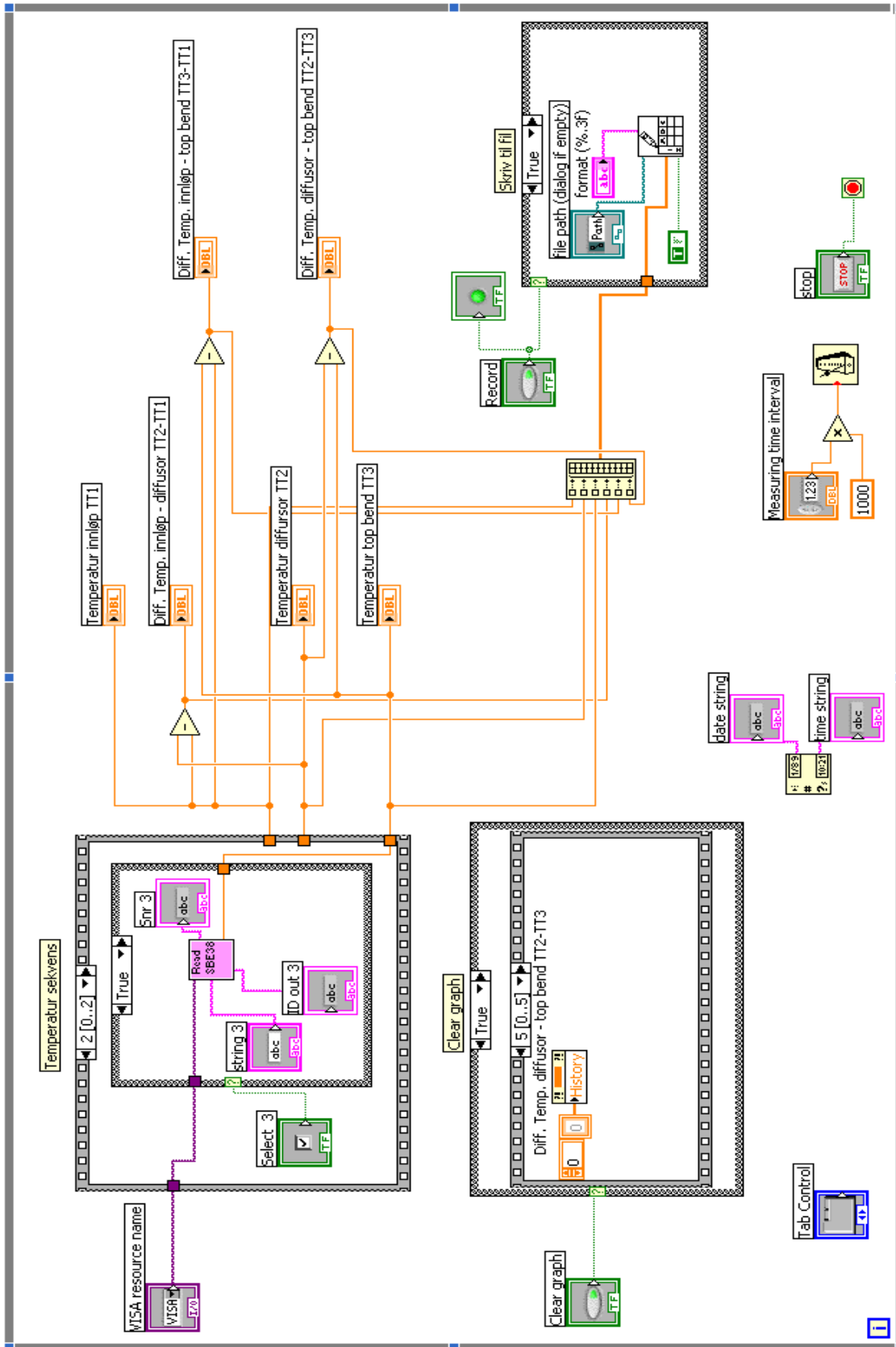
## LabVIEW

Figur 1 – Figur 3 viser blokkdiagram og frontpanel for loggeprogrammet.

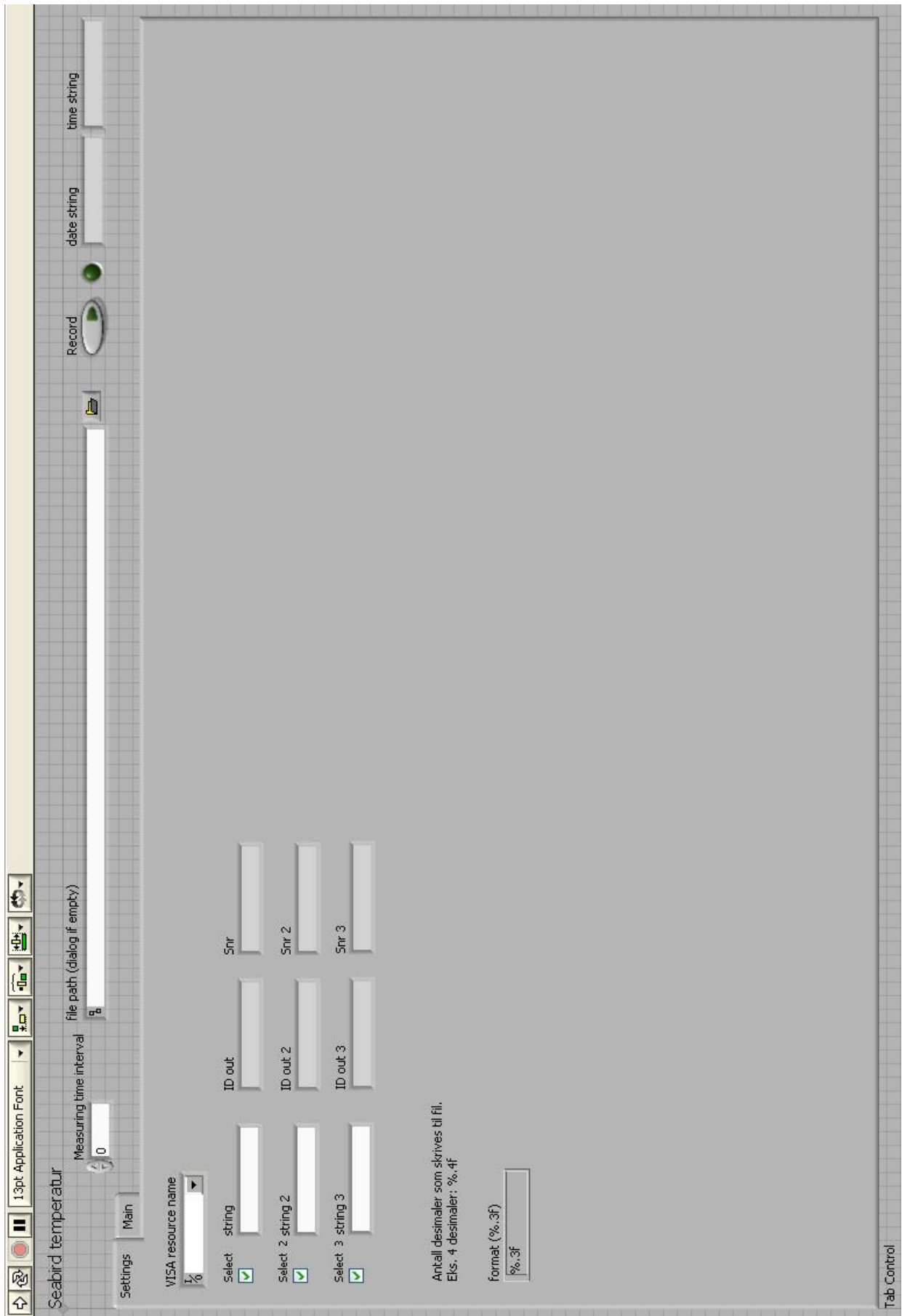
Frontpanelet i Figur 2 brukes på følgende måte:

- 1) Velg com-port.
- 2) Fyll inn id nummer til termometerne i string – string 3, hvor string 1 er temperaturen ved innløpet, string 2 er temperaturen ved utløp impeller og string 3 er temperatur ved topp-bend. I indikatorene ved siden av skal id nummer og serienummer for termometerne returneres når programmet er startet.
- 3) Antall desimaler velges. Termometerne har en oppløsning på 0,00025 °C.
- 4) Velg tidsintervall for logging av temperatur. I denne oppgaven er 3 s brukt.
- 5) Velg lagringssted for data som logges.

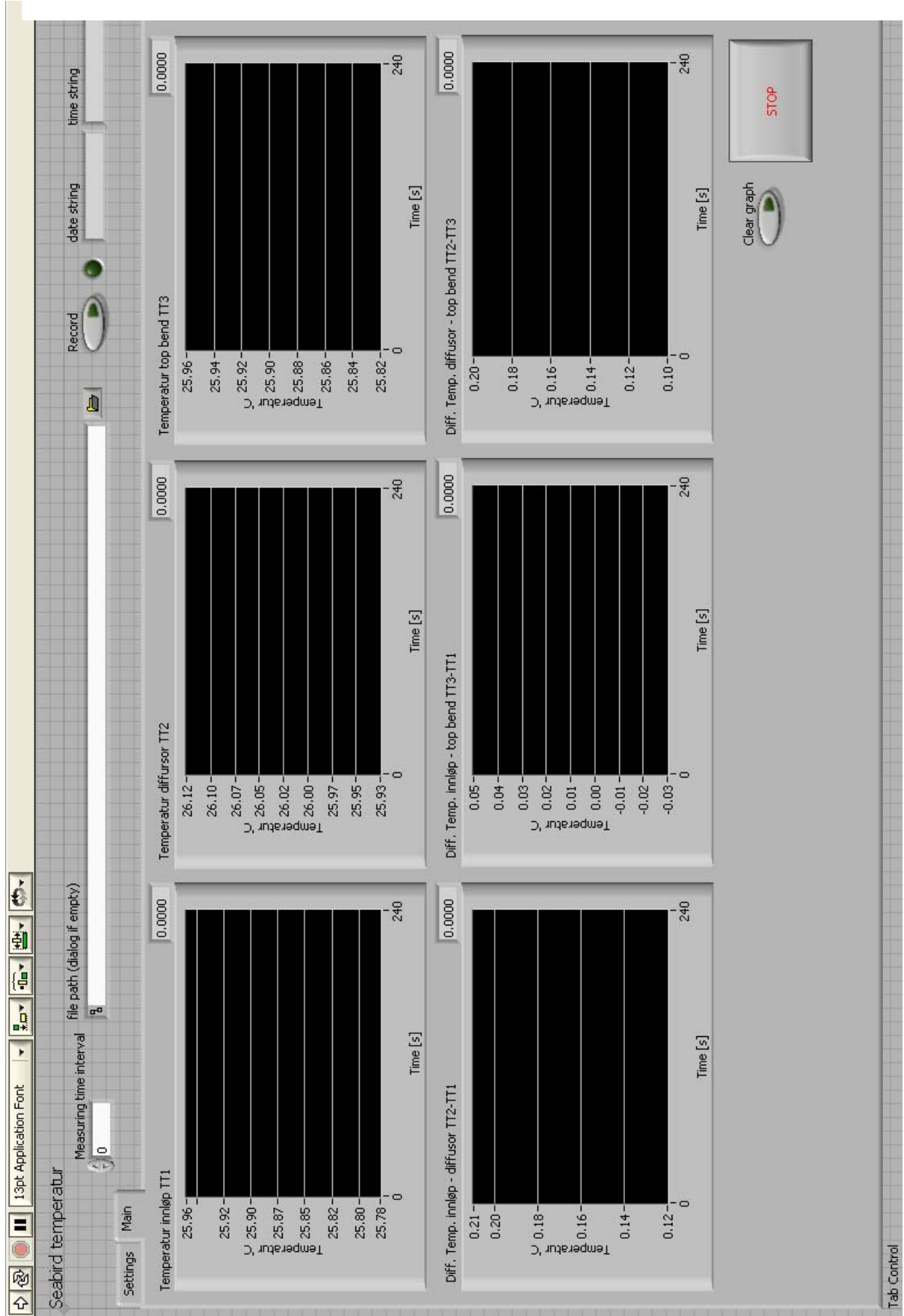
Figur 4 og Figur 5 viser blokkdiagram og frontpanel for SBE Read som er en såkalt subVI for loggeprogrammet.



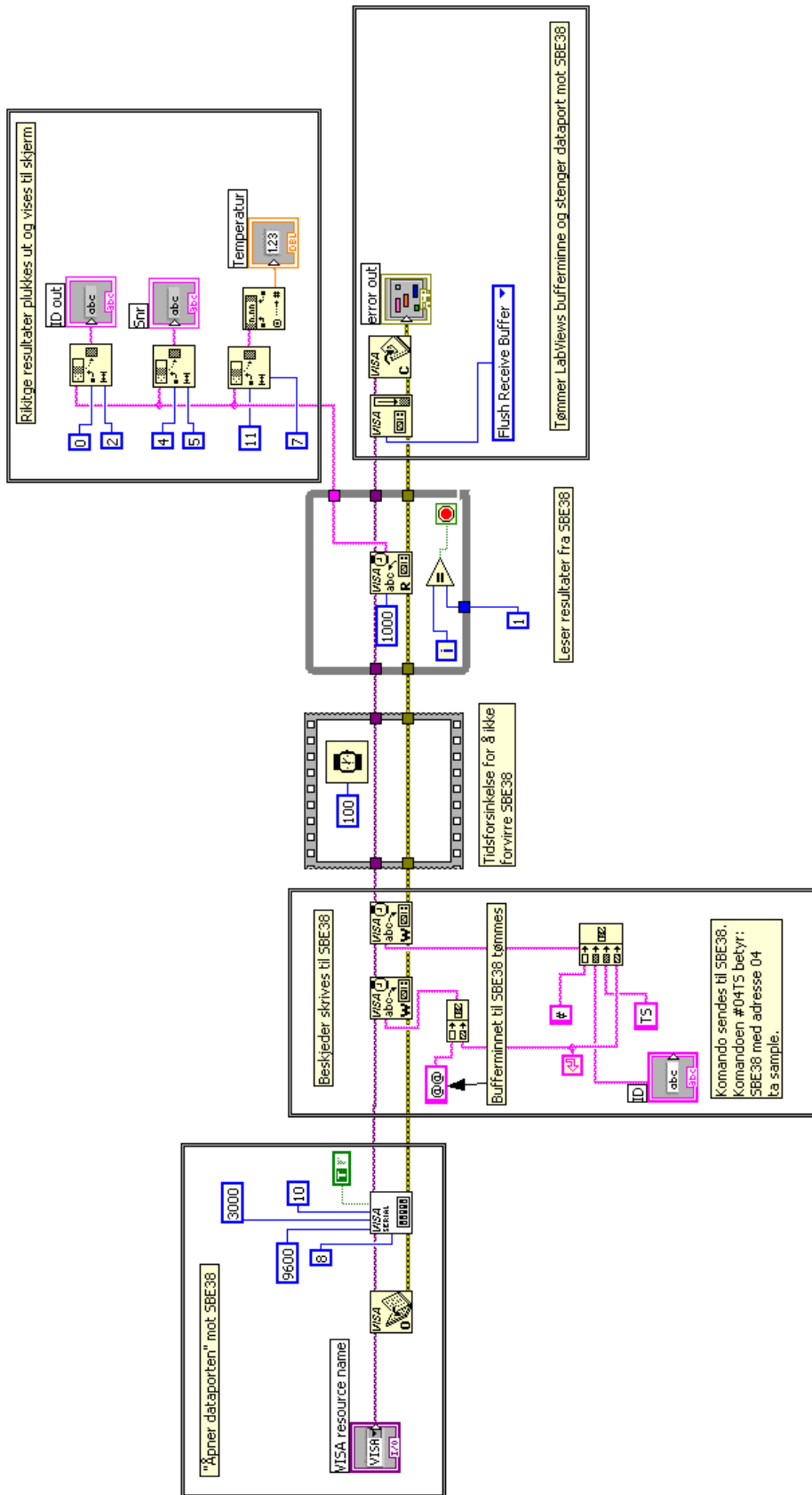
Figur 1 Seabird 3 temp.vi blokkdiagram



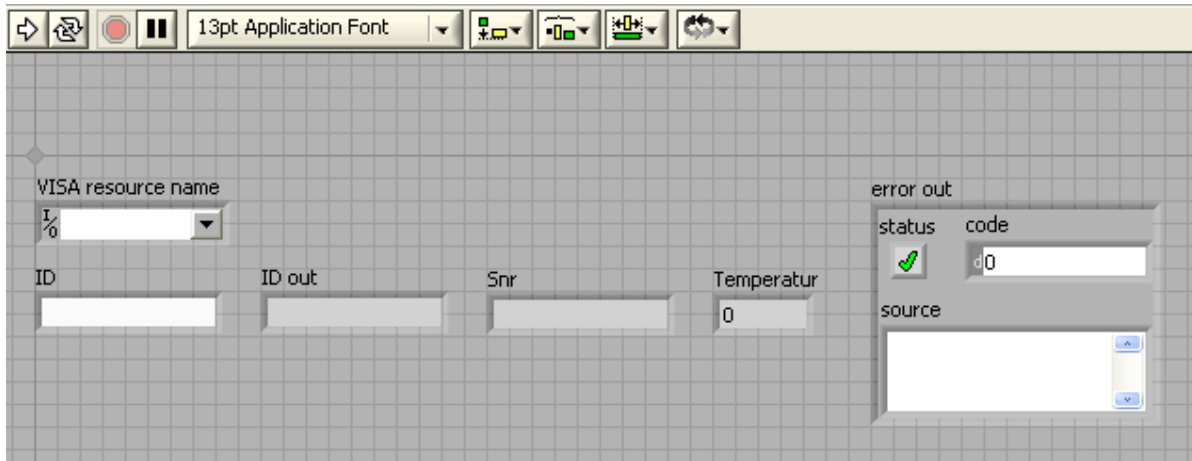
Figur 2 Seabird 3 temp.vi frontpane ”Settings”



Figur 3 Seabird 3 temp.vi frontpane "Main"



Figur 4 SBE38 Read.vi blokkdiagram



**Figur 5 SBE38 Read.vi frontpanel**

## **Vedlegg G.**

### **Prosedyre for termodynamisk metode**





## **Testoppsett og prosedyre for måling av pumpevirkningsgrad ved bruk av termodynamisk metode**

## Innholdsfortegnelse

1	Generelt .....	3
1.1	Formål og standarder .....	3
1.2	Testoppsett .....	3
1.2.1	Generelt for SE-pumper .....	3
1.2.2	Termodynamisk metode .....	3
1.3	Aktiviteter før oppstart .....	3
2	Ytelsestest av pumpe .....	5
2.1	Testpunkter .....	5
2.2	Målte parametere .....	5
3	Testrapport .....	7
4	Beregninger .....	8
4.1	Testbetingelse .....	8
5	Skisse av testoppsett .....	9
6	Loggeskjema .....	11
7	Referanseliste .....	15

## 1 Generelt

### 1.1 Formål og standarder

Dette dokumentet beskriver hvordan måling av pumpevirkningsgrad ved bruk av termodynamisk metode skal utføres. Testoppsett, aktiviteter før oppstart av pumpe og prosedyre for målingene er beskrevet. Testen utføres ved Frank Mohn Flatøy AS i henhold til ISO 9906, ISO 5198 og IEC 41 [1-3]. For ytterligere informasjon om test av SE-pumper vises det til Frank Mohn Flatøy AS sin testprosedyre, dokument nummer 466-011-4 [4].

### 1.2 Testoppsett

#### 1.2.1 Generelt for SE-pumper

Dette avsnittet er basert på [4]:

Pumpen installeres vertikalt i en testtank som inngår i en lukket trykksatt sløyfe. Motoren, som er oljefyllt og integrert i pumpekonstruksjonen, drives av elektrisk effekt som tilføres via topp-bendet. Volumstrømmen til pumpen reguleres av en ventil nedstrøms pumpen, og måles så av en volumstrømsmåler. Trykktransmittere er montert oppstrøms og nedstrøms pumpen for beregning av pumpens løftehøyde. Tilført elektrisk effekt måles. Sirkulasjon av hydraulikkoljen gjennom motoren gjøres ved et sirkulasjonsaggregat som er montert på teststanden. Testsløyfen trykkeses av en boosterpumpe og en trykkreguleringsventil. Dette arrangementet sørger også for kjøling til systemet. Pumpemediet er sjøvann.

#### 1.2.2 Termodynamisk metode

Testtriggen instrumenteres på følgende vis for måling av pumpevirkningsgrad ved bruk av termodynamisk metode. Termometer av type SBE38 monteres sammen med trykksensorer i temperaturmålepunktene 1-1, 2-2 og 3. I tillegg måles trykket separat før og etter pumpen. Disse dataene inngår i beregningene av den hydrauliske effekten. Se skisse av testtrigg, kapittel 5, for plassering av målepunkter.

### 1.3 Aktiviteter før oppstart

Før oppstart skal følgende kontrolleres/gjøres:

- 1) Alle termometer og trykksensorer som skal brukes skal ha gyldige kalibreringssertifikat.
- 2) Innstillinger på termometer kontrolleres og eventuelle endringer gjøres. Programmet Seaterm fra [www.seabird.com](http://www.seabird.com) [5] og en signalomformer (RS-485 til usb) brukes til å kommunisere med termometerne. Endring av innstillinger skal gjøres når kun et termometer er tilkoblet signalomformer og PC. a.-d. gjentas for hvert termometer.
  - a. Send ds (display status).
  - b. Kontroller at NAVG=4 og AUTORUN=N. Har termometeret andre innstillinger må endres til dette.
  - c. Id-nummer. Når flere sensorer skal brukes sammen må disse ha ulike id-nummer. Id-nummer endres ved å sende \*id=ii, ii=0-99. Kommandoen sendes to ganger. OBS! Er flere sensorer koblet til ved endring av id-nummer vil sensorene få samme nummer.
  - d. Send ts (take sample). Sensoren svarer med id-nummer, serienummer og temperaturen.

For ytterligere informasjon om innstillinger og programmering av temperatursensorene vises det til brukermanualen for SBE38.

- 3) Måleprobene monteres så i målepunktene 1-1, 2-2 og 3, se kapittel 5.
- 4) Termometer og trykksensorene monteres på målesondene, samt hydraulikkslangen med ventil. Noter id-nummer på sensorene og hvilket målepunkt de er montert på.
- 5) Termometerne kobles sammen med signalomformerer og PC med LabVIEW. Kontroller at det er kontakt med alle sensorene. Dette gjøres ved bruk av loggeprogrammet Seabird 3 temp.vi
- 6) Måleprobene og termometerne isoleres.
- 7) Alle ventiler skal være stengt.
- 8) Trykksensorene kobles sammen med QuantumX og PC med Catman. Kontroller at det er kontakt med alle sensorene.

## 2 Ytelsestest av pumpe

### 2.1 Testpunkter

Temperatur og trykk skal logges ved følgende punkter under drift av pumpen ved stabile forhold. En pumpekurve kjøres.

Testpkt.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q [%]	0	25	50	75	80	90	100	100	110	120
Q [m <sup>3</sup> /h]										

Når temperaturen har stabilisert seg etter endring av volumstrømmen, logges temperaturen kontinuerlig med intervall på 3-4 sekunder mellom hver måling i 2-3 minutter. Dataene midles så over måleperioden.

Trykkene logges med en loggefrequens på 50Hz i 40 sekunder. Trykksensorene PT2-1 og PT2-2 er koblet til i samme uttak etter impelleren. Grunnet dette må ventilen ved PT2-2 stenges når PT2-1 skal logges. Dataene midles over måleperioden etter endt logging.

I temperaturmålepunktene måles volumstrømmen for hvert testpunkt. Dette gjøres ved bruk av en 10-liters bøtte, målebeger og stoppeklokke.

### 2.2 Målte parametere

Design parametre:

Parameter	Symbol	Enhet
Volumstrøm	Q	m <sup>3</sup> /h
Løftehøyde	H	m
Omløpstall	n	o/min
Utløpsdiameter impeller	d <sub>2</sub>	mm
Utvendig diameter stator		mm
Innvendig diameter pumpehud		mm

Parametre som skal måles:

Parameter	Symbol	Enhet
Massetetthet sjøvann	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>
Tyngdeakselerasjon	g	m/s <sup>2</sup>
Kotehøyde PT1	z <sub>1</sub>	m
Kotehøyde PT1-1	z <sub>1-1</sub>	m
Kotehøyde PT2-1	z <sub>2-1</sub>	m
Kotehøyde PT2-2	z <sub>2-2</sub>	m
Kotehøyde PT3	z <sub>3</sub>	m
Kotehøyde PT4	z <sub>4</sub>	m
Høydediff. senter	$\Delta z$	m

Måling av pumpevirkningsgrad ved bruk av termodynamisk metode  
 Masteroppgave 2009 Gudrun Ljones

måleprobe til trykksensor i temp. målepkt.		
Høydediff. målepkt. på pumpe og trykksensor	$\Delta z_{2-1}$	m
Høydediff. senterlinje leveringsrør og trykksensor	$\Delta z_4$	m
Diameter testtank		m
Diameter leveringsrør		m
Diameter innvendig flens måleprobe		mm

Følgende parametre skal måles med en med en usikkerhet som beskrevet i ISO 5198 [2] eller bedre.

Systematisk usikkerhet i instrumentene:

Parameter	Symbol	Enhet	Nøyaktighet
Temperatur	$T_{1-1}, T_{2-2}, T_3$	° C	$\pm 0,001$ ° C
Trykk	$p_1 - p_4$	bara	0,1 %
Virkningsgrad	$\eta$	%	0,5-1,0 % for $H > 100\text{m}$

Parametere som skal logges for hvert testpunkt:

Parameter	Symbol	Enhet
Atmosfæretrykk	$p_{\text{atm}}$	bar
Temperatur ved innløp	$T_{1-1}$	° C
Temperatur ved utløp impeller	$T_{2-2}$	° C
Temperatur top-bend	$T_3$	° C
Trykk innløp	$p_1$	bara
Trykk ved innløp	$p_{1-1}$	bara
Trykk ved utløp impeller	$p_{2-1}$	bara
Trykk ved $T_2$	$p_{2-2}$	bara
Trykk top-bend	$p_3$	bara
Trykk utløp top-bend	$p_4$	bara
Volumstrøm i temperaturmålepunktene	$Q_1, Q_2, Q_3$	l/s
Volumstrøm pumpe	$Q$	$\text{m}^3/\text{h}$

### **3 Testrapport**

Testrapporten skal inneholde følgende:

- Loggeskjema for temperatur og trykk med filnavn for rådata
- Utskifter fra testlogg
- Pumpekaraktistikk basert på data fra testlogg
- Kalibreringssertifikat fra alle brukte instrumenter

## 4 Beregninger

### 4.1 Testbetingelse

Følgende parametre skal beregnes for hvert testpunkt

Parameter	Symbol	Enhet
Trykk ved innløp	$p'_{1-1}$	bara
Trykk ved utløp impeller	$p'_{2-1}$	bara
Trykk ved $T_2$	$p'_{2-2}$	bara
Trykk top-bend	$p'_3$	bara
Trykk utløp top-bend	$p'_4$	bara
Hastighet innløp pumpe	$c_1$	m/s
Hastighet måleprobe	$c_{1-1}$	m/s
Hastighet måleprobe	$c_{2-2}$	m/s
Hastighet levering	$c_4$	m/s
Spesifikk mekanisk energi	$E_m$	J/kg
Spesifikk hydraulisk energi	$E_h$	J/kg
Virkningsgrad	$\eta$	%

$\bar{a}$  og  $\bar{C}_p$  finnes fra tabeller i ISO 5198 eller IEC 41 [2, 3], for midlere verdier av:

$$\frac{p_{1-1} + p_{2-2}}{2} \text{ og } \frac{T_{1-1} + T_{2-2}}{2}$$

Korreksjon av trykk grunnet høydeforskjell mellom målepunkt og trykksensor:

$$p'_{1-1} = p_{1-1} + \rho \cdot g \cdot \Delta z$$

Hastighet:

$$c_1 = \frac{Q_{pumpe}}{A_1}$$

$$c_{1-1} = \frac{Q_1}{A_{probe}}$$

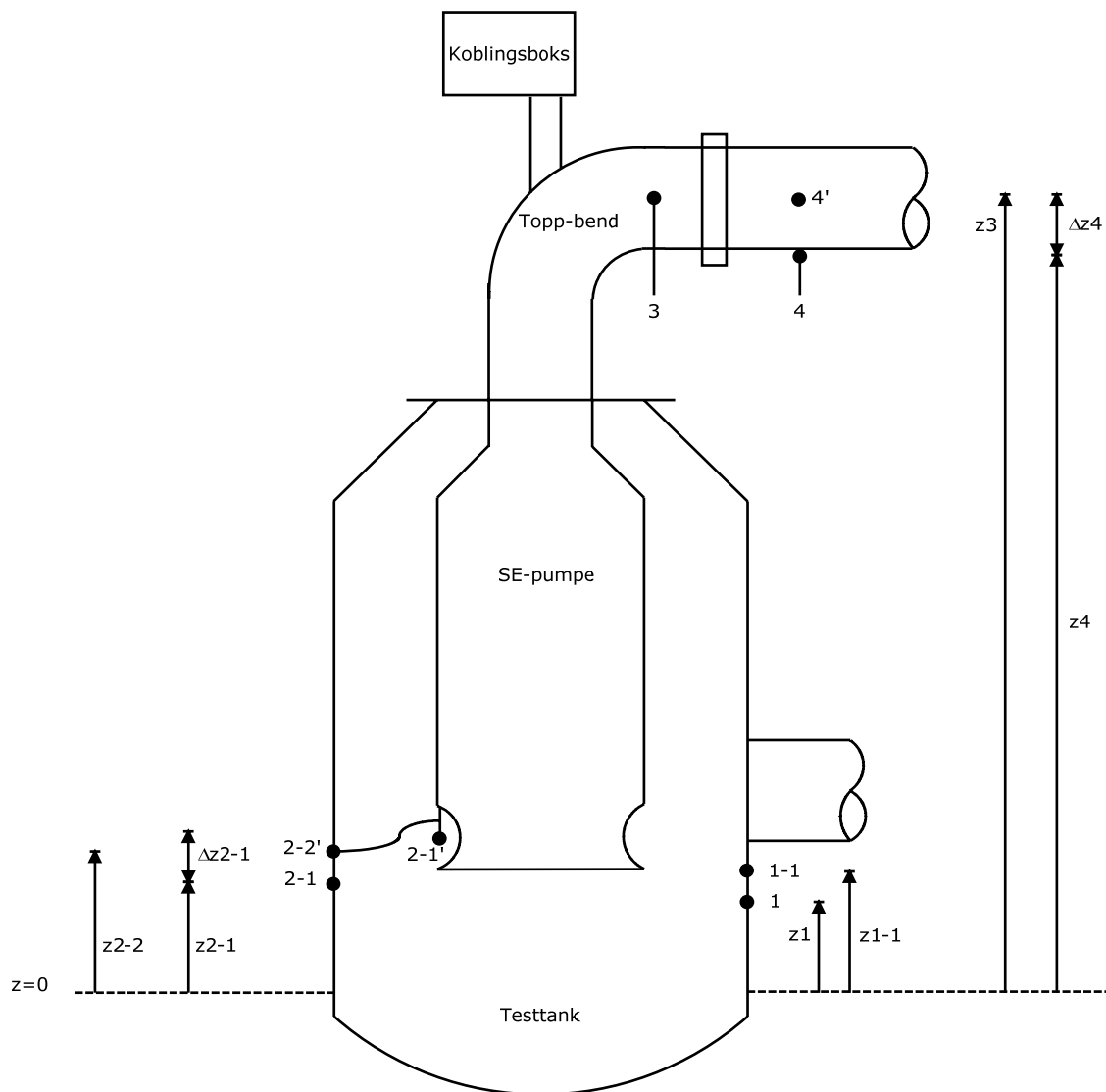
Virkningsgrad:

$$\eta = \frac{E_h}{E_m} = \frac{\frac{1}{\rho}(p_4 - p_1) + \frac{1}{2}(c_4^2 - c_1^2) + g(z_4 - z_1)}{\bar{a}(p_{2-2} - p_{1-1}) + \bar{C}_p(T_{2-2} - T_{1-1}) + \frac{1}{2}(c_{2-2}^2 - c_{1-1}^2) + g(z_{2-2} - z_{1-1})}$$



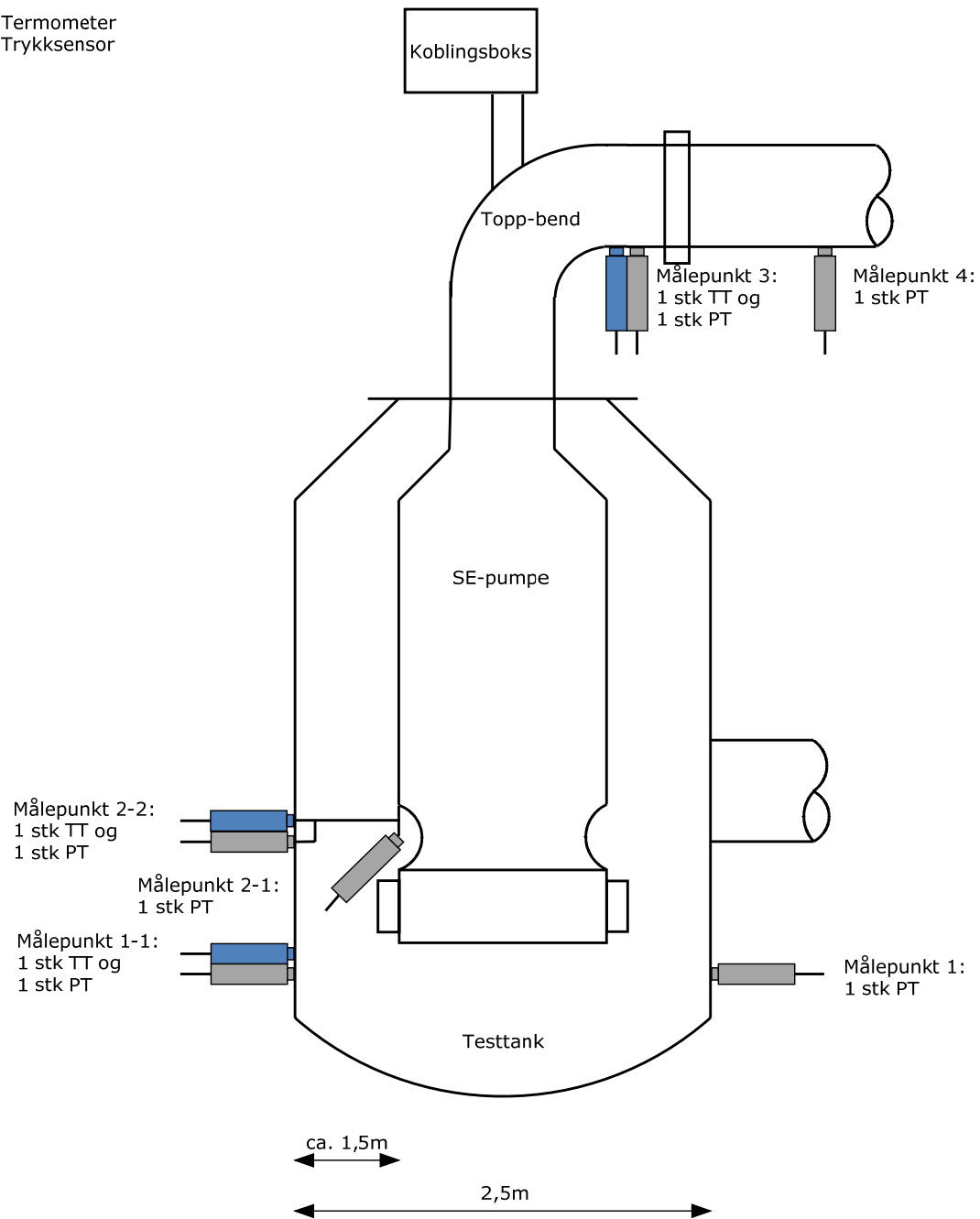
## 5 Skisse av testoppsett

Figur 1 viser hvor målepunktene er og hvor kotehøydene defineres. Figur 2 hvilke instrumenter som er plassert i målepunktene.



Figur 1 Målepunkter

TT = Termometer  
PT = Trykksensor



**Figur 2 Instrumenter i målepunktene**

## 6 Loggeskjema

Loggeskjema for måling av virkningsgrad ved bruk av termodynamisk metode

Dato:	
Prosjekt:	
Ordrenummer:	
Pumpetype:	
Serienummer:	
<b>Design parametre:</b>	
Volumstrøm, Q [m <sup>3</sup> /h]	
Løftehøyde, H [m]	
Omløpstall, n [o/min]	
Utløpsdiameter impeller, d2 [mm]	
Utvendig diameter stator [mm]	
Innvendig diameter pumpehud [mm]	
<b>Start betingelser:</b>	
Atmosfære trykk, patm [bar]	
Vannets tetthet, ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	
Tyngdeakselerasjon, g [m/s <sup>2</sup> ]	
Diameter testtank [m]	
Diameter leveringsrør [m]	
Innvendig diameter måleprobe [mm]	
Kotehøyde, z1 [m]	
Kotehøyde, z1-1 [m]	
Kotehøyde, z2-1 [m]	
Kotehøyde, z2-2 [m]	
Kotehøyde, z3 [m]	
Kotehøyde, z4 [m]	
Høydediff. senter måleprobe - trykksensor, Δz [m]	
Høydediff. målepunkt pumpe - trykksensor, Δz2-1 [m]	
Høydediff. senterlinje leveringsrør - trykksensor, Δz4 [m]	

Utført av: \_\_\_\_\_

Signatur: \_\_\_\_\_

**Logging av temperatur**

Dato \_\_\_\_\_

Måleserie \_\_\_\_\_

Navn på loggefil: temp\_måleserie\_testpkt

Eks: temp\_01\_1

Testpkt.	Q [%]	Q [m <sup>3</sup> /h]	Tidspunkt		Navn loggefil temperatur
			Start	Stopp	
1	0				
2	25				
3	50				
4	75				
5	80				
6	90				
7	100				
8	100				
9	110				
10	120				

Utført av: \_\_\_\_\_

Signatur: \_\_\_\_\_

**Logging av trykk**

Dato \_\_\_\_\_

Måleserie \_\_\_\_\_

Navn på loggefil: trykk\_måleserie\_testpkt

Eks: trykk\_01\_1

Testpkt.	Q [%]	Q [m <sup>3</sup> /h]	Tidspunkt		Navn loggefil trykk
			Start	Stopp	
1	0				
2	25				
3	50				
4	75				
5	80				
6	90				
7	100				
8	100				
9	110				
10	120				

Utført av: \_\_\_\_\_

Signatur: \_\_\_\_\_

**Lekkasjestrøm i temperaturmålepunktene**

Dato \_\_\_\_\_

Måleserie \_\_\_\_\_

Testpkt.	Q [%]	Q [m <sup>3</sup> /h]	Qlek. [l/s]		
			Målepkt. 1	Målepkt. 2	Målepkt. 3
1	0				
2	25				
3	50				
4	75				
5	80				
6	90				
7	100				
8	100				
9	110				
10	120				

Utført av: \_\_\_\_\_

Signatur: \_\_\_\_\_

## 7 Referanseliste

1. ISO, *Sentrifugalpumper. Hydrauliske godkjenningssprøver av ytelse. Klasse 1 og 2. (ISO 9906:1999)*. 2000, Genève: ISO.
2. ISO, *Sentrifugalpumper, halvaksial- og aksialpumper, Regler for hydrauliske ytelsesprøving. Nøyaktighetsklasse. (ISO 5198:1987)*. 1987, Genève: ISO.
3. IEC, *Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines. IEC publication 41*. 1991, Genève: IEC.
4. Framo, *Performance test procedure for Framo submerged electric pumps*. 2004, Frank Mohn Flatøy AS: Flatøy.
5. Sea-bird Electronics, I., *Seaterm*. 2009, Sea-bird Electronics. Inc.





## **Vedlegg H.**

### **Målte verdier og utregninger termodynamisk metode**



## Grunnlagsdata

Prosjekt:		
Ordrenummer:	623421 / 652927 Framo Services	
Pumpetype:	SE500G	
Serienummer:	200319	
<b>Design parametre:</b>		
Volumstrøm, Q [m <sup>3</sup> /h]	3410.00	
Løftehøyde, H [m]	113.40	
Omløpstall, n [o/min]	1780.00	
Utløpsdiameter impeller, d2 [mm]	580.00	
Innvendig diameter pumpehud [mm]	796	
Utvendig diameter nedre motorhus [mm]	686	
Ytterdiameter motor [mm]	640	
<b>Start betingelser:</b>		
Atmosfære trykk, patm [bar]	1.019	
Vannets tetthet, ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	1020	
Tyngdeakselerasjon, g [m/s <sup>2</sup> ]	9.81	
Diameter testtank [m]	2.5	
Diameter utløpsrør top-bend [m]	0.435	
Kotehøyde, z1 [m]	0.54	Høydemålingene er gjort på utsiden av testtanken fra risten
Kotehøyde, z1-1 [m]	0.48	
Kotehøyde, z2-1 [m]	0.72	
Kotehøyde, z2-2 [m]	0.46	
Kotehøyde, z3 [m]	3	
Kotehøyde, z4 [m]	3	
Høydediff temp.probe og trykksensor på måleprobe for temperatur, Δz [m]	0.08	
Diff høyde inntak-instrument, z2-1 [m]	0.25	
Høydediff mellom PT4 og senterlinje på leveringsrør, Δz4 [m]	0.2375	(Dleveringsrør/2+2cm for nippel)
Areal testtank, A1 [m <sup>2</sup> ]	4.908739	
Areal leveringsrør, A4 [m <sup>2</sup> ]	0.148617	
Areal mellom motor og pumpehud [m <sup>2</sup> ]	0.128036	
Innvendig diameter måleprobe temp.måling [mm]	14	
Areal måleprobe [m <sup>2</sup> ]	0.000154	
Måleprobe inn i rør innvendig diameter[mm]	10.7	(5 hull a 4mm mot strømningsretningen)
Størrelse på bøtten til å måle volumstrøm gjennom temp. probene [l]	10	

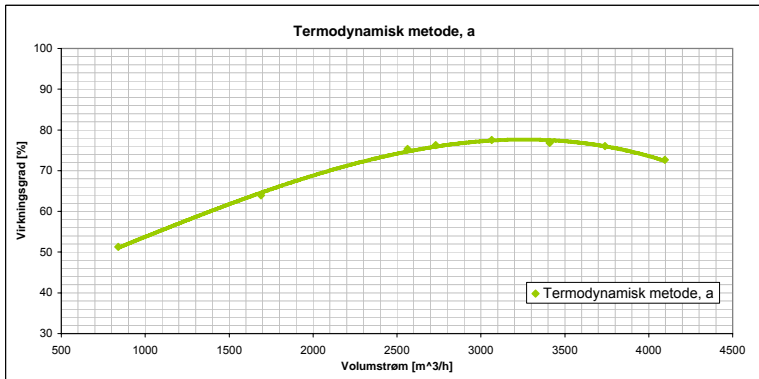
**Termodynamisk metode, a**

**Målte verdier**

			2	3	4	5	6	7	8	9	10
% av volumstrøm ved BEP			25	50	75	80	90	100	100	110	120
Temperatur ved innløp til sugedeksel	T1-1	° C	11.26586	11.8467	12.38079	12.6614	13.02071	13.2487	13.31976	13.41976	13.54242
Temperatur etter utløp på impeller	T2-2	° C	11.71825	12.1565	12.59929	12.87166	13.21428	13.43372	13.50436	13.59123	13.70954
Temperaturdifferanse	(T2-2-T1-1)	° C	0.45239	0.309796	0.2185	0.210261	0.193569	0.18502	0.184598	0.171466	0.167122
Trykk i testtank	P1	bara	3.176731	3.224606	3.098069	3.155221	3.078389	3.113733	3.10978	3.013661	3.012628
Trykk ved tempmåling innløp sugedeksel	P1-1	bara	3.133575	3.188307	2.964617	2.999907	2.87902	2.861545	2.844319	2.665667	2.59056
Trykk ved tempmåling etter utløp impeller	P2-2	bara	12.65519	11.91077	11.30886	11.15511	10.82943	10.38299	10.43782	9.854554	9.320085
Trykk leveringsrør pumpe	P4	bara	17.68148	16.92175	15.992	15.78167	15.1686	14.47654	14.46981	13.48908	12.48313
Volumstrøm gjennom temp. målesonde sugedeksel	Q1	l/min	3.5								
Volumstrøm gjennom temp. målesonde etter utløp impeller	Q2	l/min	10						8		

**Beregnete verdier**

Diff. høyde senter målesonde - trykksensor	Δz	m	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08
Diff. høyde mellom temp.målesonde T2-T1	z2-2,1-1	m	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02
Diff. høyde mellom trykksensorene ved levering og testtank	z4,1	m	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46
Diff. høyde mellom trykksensor og senterlinje leveringsrør	Δz4	m	-0.2375	-0.2375	-0.2375	-0.2375	-0.2375	-0.2375	-0.2375	-0.2375	-0.2375
Trykk korrigeret med diff. høyde senter målesonde - trykksensor	P1-1'	bara	3.12557	3.180303	2.956612	2.991903	2.871015	2.85354	2.836314	2.657662	2.582555
Trykk korrigeret med diff. høyde senter målesonde - trykksensor	P2-2'	bara	12.64718	11.91077	11.30085	11.1471	10.82943	10.38299	10.43782	9.854554	9.320085
Trykk korrigeret med diff. høyde senterlinje leveringsrør og trykksensor	P4'	bara	17.65771	16.89798	15.96824	15.7579	15.14483	14.45277	14.44604	13.46532	12.45937
Gravitasjonskonstant	g	m/s <sup>2</sup>	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81
Tetthet sjøvann	ρ	kg/m <sup>3</sup>	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020
Isotermal faktor for vann	a(PT1-1, T1)	10 <sup>-3</sup> ·m <sup>3</sup> /kg	0.97026	0.968061	0.966125	0.965105	0.963818	0.963004	0.962751	0.962412	0.961987
Isotermal faktor for vann	a(PT2-2, T2-2)	10 <sup>-3</sup> ·m <sup>3</sup> /kg	0.967551	0.966014	0.964447	0.963459	0.962267	0.961544	0.961291	0.961046	0.960688
Isotermal faktor for vann	a(1-1,2-2) snitt	10 <sup>-3</sup> ·m <sup>3</sup> /kg	0.968906	0.967037	0.965286	0.964282	0.963043	0.962274	0.962021	0.961729	0.961334
Spesifikk varmekapasitet	Cp(PT1-1, T1-1)	J/kgK	4193.789	4193.184	4192.452	4191.938	4191.356	4191.133	4191.068	4191.028	4190.93
Spesifikk varmekapasitet	Cp(PT2-2, T2-2)	J/kgK	4189.488	4189.24	4188.932	4188.684	4188.454	4188.413	4188.321	4188.457	4188.517
Spesifikk varmekapasitet	Cp(1-1,2-2) snitt	J/kgK	4191.639	4191.212	4190.692	4190.311	4189.905	4189.773	4189.694	4189.742	4189.724
Tilført effekt til motor	P tilført	kW	989	1122	1284	1319	1367	1415	1413	1446	1459
Motorvirkningsgrad	ηmotor		0.875	0.885	0.898	0.9	0.904	0.905	0.905	0.906	0.906
Effekt overført til pumpeaksling	Psh	kW	865.375	992.97	1153.032	1187.1	1235.768	1280.575	1278.765	1310.076	1321.854
Volumstrøm gjennom temp. målesonde sugedeksel	Q1-1	m <sup>3</sup> /h	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
Volumstrøm gjennom temp. målesonde etter utløp impeller	Q2-2	m <sup>3</sup> /h	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Volumstrøm	Q	m <sup>3</sup> /h	840	1689	2562	2730	3064	3412	3410	3739	4096
Hastighet i testtank	c1	m/s	0.047534	0.095578	0.14498	0.154486	0.173387	0.19308	0.192967	0.211584	0.231786
Hastighet ved levering	c4	m/s	1.570032	3.156885	4.788596	5.102603	5.726877	6.377319	6.373581	6.98851	7.655773
Hastighet ved temp.målesonde sugedeksel	c1-1	m/s	0.37894	0.37894	0.37894	0.37894	0.37894	0.37894	0.37894	0.37894	0.37894
Hastighet ved temp.målesonde utløp impeller	c2-2	m/s	1.082687	1.082687	1.082687	1.082687	1.082687	1.082687	1.082687	1.082687	1.082687
Spesifikk mekanisk trykkenergi	Em trykk	J/kg	922.5545	844.2689	805.4581	786.3914	766.4294	724.5394	731.2814	692.1461	647.7016
Spesifikk mekanisk kinetisk energi	Em kinetisk	J/kg	0.514307	0.514307	0.514307	0.514307	0.514307	0.514307	0.514307	0.514307	0.514307
Spesifikk mekanisk potensiell energi	Em potensiell	J/kg	-0.1962	-0.1962	-0.1962	-0.1962	-0.1962	-0.1962	-0.1962	-0.1962	-0.1962
Spesifikk mekanisk termisk energi	Em termisk	J/kg	1896.257	1298.422	915.6662	881.0591	811.0346	775.1902	773.4092	718.3988	700.1948
Sum spesifikk mekanisk energi	Em	J/kg	2819.129	2143.009	1721.442	1667.769	1577.782	1500.048	1505.009	1410.863	1348.214
Spesifikk hydraulisk trykkenergi	Eh trykk	J/kg	1419.704	1340.527	1261.781	1235.557	1182.985	1111.67	1111.398	1024.672	926.1508
Spesifikk hydraulisk kinetisk energi	Eh kinetisk	J/kg	1.23137	4.978394	11.45482	13.00634	16.38353	20.31646	20.29265	24.39725	29.27857
Spesifikk hydraulisk potensiell energi	Eh potensiell	J/kg	24.1326	24.1326	24.1326	24.1326	24.1326	24.1326	24.1326	24.1326	24.1326
Sum spesifikk hydraulisk energi	Eh	J/kg	1445.068	1369.638	1297.369	1272.696	1223.501	1156.12	1155.823	1073.202	979.562
Virkningsgrad	η		0.512594	0.639119	0.753652	0.763113	0.775456	0.770722	0.767984	0.760671	0.726562
Virkningsgrad	η	%	51.25938	63.91191	75.36522	76.31129	77.5456	77.07218	76.79844	76.06708	72.65624



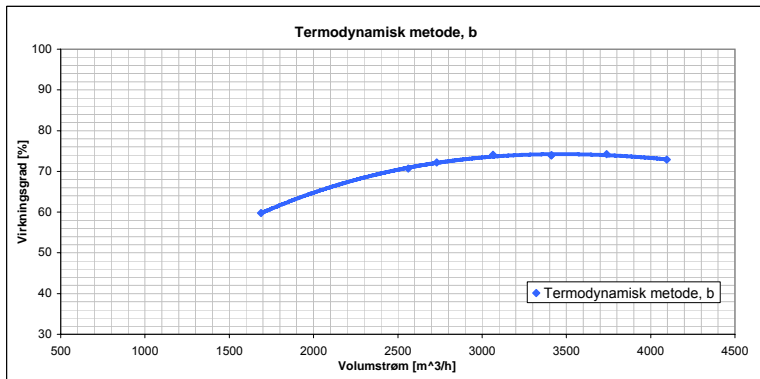
**Termodynamisk metode, b**

**Målte verdier**

Testpunkt			2	3	4	5	6	7	8	9	10
% av volumstrøm ved BEP			25	50	75	80	90	100	100	110	120
Temperatur ved innløp til sugedeksel	T1-1	° C	11.26586	11.8467	12.38079	12.6614	13.02071	13.2487	13.31976	13.41976	13.54242
Temperatur etter utløp på impeller	T2-2	° C	11.71825	12.1565	12.59929	12.87166	13.21428	13.43372	13.50436	13.59123	13.70954
Temperaturdifferanse	(T2-2-T1-1)	° C	0.45239	0.309796	0.2185	0.210261	0.193569	0.18502	0.184598	0.171466	0.167122
Trykk i testtank	P1	bara	3.176731	3.224606	3.098069	3.155221	3.078389	3.113733	3.10978	3.013661	3.012628
Trykk ved tempmåling innløp sugedeksel	P1-1	bara	3.133575	3.188307	2.964617	2.999907	2.87902	2.861545	2.844319	2.665667	2.59056
Trykk utløp impeller	P2-1	bara		16.2185	15.3563	15.25205	14.77217	14.15314	14.18019	13.36019	12.63757
Trykk ved tempmåling etter utløp impeller	P2-2	bara	12.65519	11.91878	11.30886	11.15511	10.83744	10.391	10.44583	9.862559	9.32809
Volumstrøm gjennom temp. målesonde sugedeksel	Q1-1	l/min	3.5								
Volumstrøm gjennom temp. målesonde etter utløp impeller	Q2-2	l/min	10						8		

**Beregnete verdier**

Diff. høyde senter målesonde - trykksensor	Δz	m	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
Diff. høyde mellom temp.målesonde T2-T1	z2-2,1-1	m	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02
Diff. høyde mellom trykksensor og utløp impeller	Δz2-1	m	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Diff. høyde mellom trykksensor ved utløp impeller og sugedeksel	z2-1,1-1	m	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Trykk korrigeret med diff. høyde senter målesonde - trykksensor	P1-1'	bara	3.12557	3.180303	2.956612	2.991903	2.871015	2.85354	2.836314	2.657662	2.582555
Trykk korrigeret med diff. høyde utløp impeller - trykksensor	P2-1'	bara		16.19348	15.33129	15.22703	14.74715	14.12812	14.15517	13.33517	12.61255
Trykk korrigeret med diff. høyde senter målesonde - trykksensor	P2-2'	bara	12.64718	11.91077	11.30085	11.1471	10.82943	10.38299	10.43782	9.854554	9.320085
Gravitasjonskonstant	g	m/s <sup>2</sup>	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81
Tetthet sjøvann	ρ	kg/m <sup>3</sup>	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020
Isotermal faktor for vann	a(PT1-1,T1)	10 <sup>-3</sup> ·m <sup>3</sup> /kg	0.97026	0.968061	0.966125	0.965105	0.963887	0.963004	0.962751	0.962412	0.961981
Isotermal faktor for vann	a(PT2-2,T2-2)	10 <sup>-3</sup> ·m <sup>3</sup> /kg	0.967551	0.966014	0.964447	0.963459	0.962267	0.961544	0.961291	0.961046	0.960687
Isotermal faktor for vann	a(1-1,2-2) snitt	10 <sup>-3</sup> ·m <sup>3</sup> /kg	0.968906	0.967037	0.965286	0.964282	0.963043	0.962274	0.962021	0.961729	0.961334
Spesifikk varmekapasitet	Cp(PT1-1,T1-1)	J/kgK	4193.789	4193.184	4192.452	4191.938	4191.356	4191.133	4191.068	4191.028	4190.93
Spesifikk varmekapasitet	Cp(PT2-2,T2-2)	J/kgK	4189.488	4189.24	4188.932	4188.684	4188.454	4188.413	4188.321	4188.457	4188.517
Spesifikk varmekapasitet	Cp(1-1,2-2) snitt	J/kgK	4191.639	4191.212	4190.692	4190.311	4189.905	4189.773	4189.694	4189.742	4189.724
Tilført effekt til motor	P tilført	kW	989	1122	1284	1319	1367	1415	1413	1446	1459
Motorvirkningsgrad	ηmotor		0.875	0.885	0.898	0.9	0.904	0.905	0.905	0.906	0.906
Effekt overført til pumpeaksling	Psh	kW	865.375	992.97	1153.032	1187.1	1235.768	1280.575	1278.765	1310.076	1321.854
Volumstrøm gjennom temp. målesonde sugedeksel	Q1	m <sup>3</sup> /h	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
Volumstrøm gjennom temp. målesonde etter utløp impeller	Q2	m <sup>3</sup> /h	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Volumstrøm	Q	m <sup>3</sup> /h	840	1689	2562	2730	3064	3412	3410	3739	4096
Hastighet i testtank	c1	m/s	0.047534	0.095578	0.14498	0.154486	0.173387	0.19308	0.192967	0.211584	0.231786
Hastighet ved utløp impeller	c2	m/s	1.82241	3.664345	5.55835	5.922831	6.647456	7.402455	7.398116	8.111893	8.886417
Hastighet ved temp.målesonde sugedeksel	c1-1	m/s	0.37894	0.37894	0.37894	0.37894	0.37894	0.37894	0.37894	0.37894	0.37894
Hastighet ved temp.målesonde utløp impeller	c2-2	m/s	1.082687	1.082687	1.082687	1.082687	1.082687	1.082687	1.082687	1.082687	1.082687
Spesifikk mekanisk trykkenergi	Em trykk	J/kg	922.5545	844.2689	805.4581	786.3914	766.4294	724.5394	731.2814	692.1461	647.7016
Spesifikk mekanisk kinetisk energi	Em kinetisk	J/kg	0.514307	0.514307	0.514307	0.514307	0.514307	0.514307	0.514307	0.514307	0.514307
Spesifikk mekanisk potensiell energi	Em potensiell	J/kg	-0.1962	-0.1962	-0.1962	-0.1962	-0.1962	-0.1962	-0.1962	-0.1962	-0.1962
Spesifikk mekanisk termisk energi	Em termisk	J/kg	1896.257	1298.422	915.6662	881.0591	811.0346	775.1902	773.4092	718.3988	700.1948
Sum spesifikk mekanisk energi	Em	J/kg	2819.129	2143.009	1721.442	1667.769	1577.782	1500.048	1505.009	1410.863	1348.214
Spesifikk hydraulisk trykkenergi	Eh trykk	J/kg	1271.459	1199.335	1183.511	1143.996	1079.842	1082.881	1011.913	941.1689	
Spesifikk hydraulisk kinetisk energi	Eh kinetisk	J/kg	6.709145	15.43712	17.52803	22.07931	27.37953	27.34744	32.87902	39.45734	
Spesifikk hydraulisk potensiell energi	Eh potensiell	J/kg	2.4525	2.4525	2.4525	2.4525	2.4525	2.4525	2.4525	2.4525	2.4525
Sum spesifikk hydraulisk energi	Eh	J/kg	1280.62	1217.225	1203.491	1168.528	1109.674	1112.681	1047.244	983.0787	
Virkningsgrad	η		0.59758	0.707096	0.721618	0.740614	0.739759	0.739319	0.742272	0.729171	
Virkningsgrad	η	%	59.75804	70.70959	72.16178	74.06143	73.97592	73.93189	74.22721	72.91709	



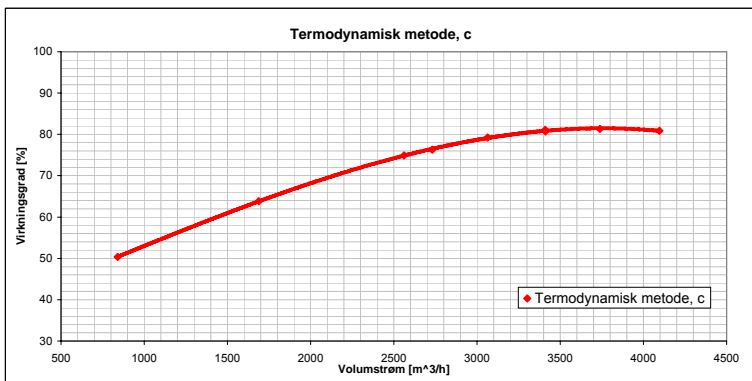
**Termodynamisk metode, c**

**Målte verdier**

			2	3	4	5	6	7	8	9	10
% av volumstrøm ved BEP			25	50	75	80	90	100	100	110	120
Temperatur ved innløp til sugedeksel	T1-1	° C	11.26586	11.8467	12.38079	12.6614	13.02071	13.2487	13.31976	13.41976	13.54242
Temperatur etter utløp pumpe	T3	° C	11.6226	12.04974	12.501	12.77177	13.1126	13.32874	13.39806	13.49002	13.60717
Temperaturdifferanse	(T3-T1-1)	° C	0.356745	0.203035	0.120211	0.110375	0.091898	0.080041	0.078324	0.070259	0.064756
Trykk i testtank	P1	bara	3.176731	3.224606	3.098069	3.155221	3.078389	3.113733	3.10978	3.013661	3.012628
Trykk ved tempmåling innløp sugedeksel	P1-1	bara	3.133575	3.188307	2.964617	2.999907	2.87902	2.861545	2.844319	2.665667	2.590556
Trykk ved tempmåling utløp pumpe	P3	bara	17.05467	16.31511	15.43197	15.23181	14.65334	13.99544	13.98796	13.05761	12.10515
Trykk leveringsrør pumpe	P4	bara	17.68148	16.92175	15.992	15.78167	15.1686	14.47654	14.46981	13.48908	12.48313
Volumstrøm gjennom temp. målesonde sugedeksel	Q1	l/min	3.5								
Volumstrøm gjennom temp. målesonde etter utløp pumpe	Q3	l/min	10								

**Beregnete verdier**

Diff. høyde senter målesonde - trykksensor	Δz	m	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
Diff. høyde mellom temp.målesonde T3-T1	z3-1-1	m	2.52	2.52	2.52	2.52	2.52	2.52	2.52	2.52	2.52
Diff. høyde mellom trykksensorene ved levering og testtank	z4-1	m	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46
Diff. høyde mellom trykksensor og senterlinje leveringsrør	Δz4	m	-0.2375	-0.2375	-0.2375	-0.2375	-0.2375	-0.2375	-0.2375	-0.2375	-0.2375
Trykk korrigeret med diff. høyde senter målesonde - trykksensor	P1-1'	bara	3.12557	3.180303	2.956612	2.991903	2.871015	2.85354	2.836314	2.657662	2.582555
Trykk korrigeret med diff. høyde senter målesonde - trykksensor	P3'	bara	17.0467	16.3071	15.42397	15.22381	14.64534	13.98543	13.97996	13.0496	12.09715
Trykk korrigeret med diff. høyde senterlinje leveringsrør og trykksensor	P4'	bara	17.65771	16.89798	15.96824	15.7579	15.14483	14.45277	14.44604	13.46532	12.45937
Gravitasjonskonstant	g	m/s <sup>2</sup>	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81
Tetthet sjøvann	ρ	kg/m <sup>3</sup>	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020
Isotermal faktor for vann	a(PT1-1,T1-1)	10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /kg	0.97026	0.968061	0.966125	0.965105	0.963818	0.963004	0.962751	0.962412	0.961981
Isotermal faktor for vann	a(PT3,T3)	10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /kg	0.967421	0.965925	0.964377	0.96341	0.962241	0.961551	0.961309	0.96108	0.960765
Isotermal faktor for vann	a(1-1,3) snitt	10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /kg	0.966841	0.966993	0.965251	0.964258	0.96303	0.962277	0.96203	0.961746	0.961373
Spesifikk varmekapasitet	Cp(PT1-1,T1-1)	J/kgK	4193.789	4193.184	4192.452	4191.938	4191.356	4191.133	4191.068	4191.028	4190.93
Spesifikk varmekapasitet	Cp(PT3,T3)	J/kgK	4188.263	4188.027	4187.6	4187.258	4187.029	4187.077	4187.01	4187.29	4187.554
Spesifikk varmekapasitet	Cp(1-1,3) snitt	J/kgK	4191.026	4190.606	4190.026	4189.598	4189.192	4189.105	4189.039	4189.159	4189.242
Tilført effekt til motor	P tilført	kW	989	1122	1284	1319	1367	1415	1413	1446	1459
Motorvirkningsgrad	ηmotor		0.875	0.885	0.898	0.9	0.904	0.905	0.905	0.906	0.906
Effekt overført til pumpeaksling	Psh	kW	865.375	992.97	1153.032	1187.1	1235.768	1280.575	1278.765	1310.076	1321.854
Volumstrøm gjennom temp. målesonde sugedeksel	Q1-1	m <sup>3</sup> /h	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
Volumstrøm gjennom temp. målesonde utløp pumpe	Q3	m <sup>3</sup> /h	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Volumstrøm	Q	m <sup>3</sup> /h	840	1689	2562	2730	3064	3412	3410	3739	4096
Hastighet i testtank	c1	m/s	0.047534	0.095578	0.14498	0.154486	0.173387	0.19308	0.192967	0.211584	0.231786
Hastighet ved utløp pumpe	c4	m/s	1.570032	3.156885	4.788596	5.102603	5.726877	6.377319	6.373581	6.98851	7.655773
Hastighet ved temp.målesonde sugedeksel	c1-1	m/s	0.37894	0.37894	0.37894	0.37894	0.37894	0.37894	0.37894	0.37894	0.37894
Hastighet ved temp.målesonde utløp pumpe	c3	m/s	1.082687	1.082687	1.082687	1.082687	1.082687	1.082687	1.082687	1.082687	1.082687
Spesifikk mekanisk trykkenergi	Em trykk	J/kg	1348.736	1269.352	1203.413	1179.471	1133.902	1071.197	1072.052	999.4411	914.7074
Spesifikk mekanisk kinetisk energi	Em kinetisk	J/kg	0.514307	0.514307	0.514307	0.514307	0.514307	0.514307	0.514307	0.514307	0.514307
Spesifikk mekanisk potensiell energi	Em potensiell	J/kg	24.7212	24.7212	24.7212	24.7212	24.7212	24.7212	24.7212	24.7212	24.7212
Spesifikk mekanisk termisk energi	Em termisk	J/kg	1495.128	850.8404	503.6892	462.4251	384.9781	335.3009	327.9812	294.3275	271.279
Sum spesifikk mekanisk energi	Em	J/kg	2869.1	2145.428	1732.338	1667.131	1544.116	1431.733	1425.269	1319.004	1211.222
Spesifikk hydraulisk trykkenergi	Eh trykk	J/kg	1419.704	1340.527	1261.781	1235.557	1182.985	1111.67	1111.398	1024.672	926.1508
Spesifikk hydraulisk kinetisk energi	Eh kinetisk	J/kg	1.23137	4.978394	11.45482	13.00634	16.38353	20.31646	20.29265	24.39725	29.27857
Spesifikk hydraulisk potensiell energi	Eh potensiell	J/kg	24.1326	24.1326	24.1326	24.1326	24.1326	24.1326	24.1326	24.1326	24.1326
Sum spesifikk hydraulisk energi	Eh	J/kg	1445.068	1369.638	1297.369	1272.696	1223.501	1156.12	1155.823	1073.202	979.562
Virkningsgrad	η		0.503666	0.638398	0.748912	0.763405	0.792363	0.807497	0.810951	0.813646	0.808739
Virkningsgrad	η	%	50.36661	63.83984	74.89122	76.34046	79.23634	80.74965	81.09511	81.36459	80.87387



## **Vedlegg I.**

### **Målte verdier og utregninger konvensjonell metode**





Målte verdier									
Q [%]	25	50	75	80	90	100	100	110	120
Q [m <sup>3</sup> /h]	840	1689	2562	2730	3064	3412	3410	3739	4096
p2 [barg]	16.77	16	15.07	14.83	14.26	13.57	13.59	12.6	11.59
p1 [barg]	2.06	2.11	1.99	2.02	1.96	1.99	2.02	1.87	1.89
El power [kW]	989	1122	1284	1319	1367	1415	1413	1446	1459
f [Hz]	60.74	60.66	60.68	60.61	60.66	60.7	60.65	60.59	60.52
η <sub>motor</sub>	0.875	0.885	0.898	0.9	0.904	0.905	0.905	0.906	0.906
Beregnet									
ΔH [mic]	146.8467	139.0498	131.6308	129.0959	124.3533	117.5728	117.4706	109.5106	99.73475
P <sub>m</sub> [kW]	865.375	992.97	1153.032	1187.1	1235.768	1280.575	1278.765	1310.076	1321.854
η <sub>h</sub>	0.396969	0.65869	0.814541	0.826809	0.858671	0.872425	0.872389	0.870428	0.860677
v1	0.047534	0.095578	0.14498	0.154486	0.173387	0.19308	0.192967	0.211584	0.231786
v2	1.570032	3.156885	4.788596	5.102603	5.726877	6.377319	6.373581	6.98851	7.655773
Hv1	0.000115	0.000466	0.001071	0.001216	0.001532	0.0019	0.001898	0.002282	0.002738
Hv2	0.125637	0.507947	1.168739	1.327041	1.671617	2.072895	2.070465	2.489259	2.987302

