

# ROV-basert multi-sensor verktøy for inspeksjon og overvåking av undervanns rørledning

**Christer Moe**

Undervannsteknologi

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Sigbjørn Sangesland, IPT

Medveileder: Øystein Baltzersen, Sensorlink AS

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for petroleumsteknologi og anvendt geofysikk



**MASTER THESIS**  
**Spring 2014**  
**for stud. techn. Christer Mo**

**ROV based multi-sensor tool for inspection and monitoring of subsea pipelines**  
**(ROV-basert multi-sensor verktøy for inspeksjon og overvåking av undervanns rørledning)**

**Background:**

Pipes and pipelines are vital parts of the infrastructure in oil and gas production fields. Failures in these components have a direct impact on operating performance, and operators therefore implement comprehensive maintenance programmes to ensure that the systems are operated within safe limits.

For subsea pipelines, the degradation mechanisms of main concern are damage from mechanical impact, and wall loss caused by corrosion/erosion phenomena.

The most commonly used methods to address these issues are visual external inspection by video or high frequency sonar, and internal inspection by using inline inspection tools. These methods are well described in the open literature. Emerging technologies and standardization within the fields of computer communication and graphics has prepared the ground for the concepts within the petroleum industry which is commonly referred to as 'Integrated Operations'. These concepts are now commonly implemented, and the evolution goes on. Within the field of inspection and monitoring, the availability of inexpensive communication and sensing technologies have prepared the ground for new concepts where monitoring can be used more often than before. Within the petroleum industry, one expects that this availability of cost efficient sensing and communication technologies will lead to a shift where more resources will be spent on monitoring, and less on inspection. This drive is motivated by the need to operate fields more cost effectively as automated monitoring concepts in most cases can be implemented with less personnel involved compared to inspection campaigns for similar purposes.

**Tasks:**

Practical design/development:

- 1) Evaluate different concepts for monitoring of wall thickness in subsea pipelines. The system to be installed using ROV. The water depth is maximum 3000 m and the pipe line size ranges from 3 to 12 inches.

Calculations/simulations:

- 1) Impact of 3000m water depth on all components used in the concept

- 2) Design of one (or more) pressure canisters, design optimization, preferably by using finite element tools
- 3) Temperature cycling scenarios, (from steady state production, through shut down, and starting up again). Calculations preferably using finite element tools
- 4) Materials, long term effects (polymers)

Lab experiments:

- 1) Select some relevant polymer materials for lab tests (Immersion in water or silicone oil, measure absorption versus time). This work depends on availability of lab resources as access to autoclave is probably required.
- 2) Carry out one corrosion experiment in the lab with ultrasound monitoring

Sensorlink A/S will provide additional design requirements and samples for testing and lab set-up for corrosion testing.

The assignment solution must be based on any standards and practical guidelines that already exist and are recommended. This should be done in close cooperation with supervisors and any other responsibilities involved in the assignment. In addition it has to be an active interaction between all parties.

Within three weeks after the date of the task handout, a pre-study report shall be prepared. The report shall cover the following:

- An analysis of the work task's content with specific emphasis of the areas where new knowledge has to be gained.
- A description of the work packages that shall be performed. This description shall lead to a clear definition of the scope and extent of the total task to be performed.
- A time schedule for the project. The plan shall comprise a Gantt diagram with specification of the individual work packages, their scheduled start and end dates and a specification of project milestones.

The pre-study report is a part of the total task reporting. It shall be included in the final report. Progress reports made during the project period shall also be included in the final report.

The report should be edited as a research report with a summary, table of contents, conclusion, list of reference, list of literature etc. The text should be clear and concise, and include the necessary references to figures, tables, and diagrams. It is also important that exact references are given to any external source used in the text.

Equipment and software developed during the project is a part of the fulfilment of the task. Unless outside parties have exclusive property rights or the equipment is physically non-moveable, it should be handed in along with the final report. Suitable documentation for the correct use of such material is also required as part of the final report.

The candidate shall follow the work regulations at the company's plant. The candidate may not intervene in the production process in any way. All orders for specific intervention of this kind should be channelled through company's plant management.

If the candidate encounters unforeseen difficulties in the work, and if these difficulties warrant a reformation of the task, these problems should immediately be addressed to the Department.

**The assignment text shall be enclosed and be placed immediately after the title page.**

Deadline: 10 June 2014.

Two bound copies of the final report and one electronic (pdf-format) version are required according to the routines given in DAIM. Please see <http://www.ntnu.edu/ivt/master-s-thesis-regulations> regarding master thesis regulations and practical information, inclusive how to use DAIM.

Responsible supervisor:

Olav Egeland

E-mail: [olav.egeland@ntnu.no](mailto:olav.egeland@ntnu.no)

Supervisor at NTNU:

Sigbjørn Sangesland

E-mail: [sigbjorn.sangesland@ntnu.no](mailto:sigbjorn.sangesland@ntnu.no)

Telephone: 91897308

Co-Supervisor at the Sensorlink AS:

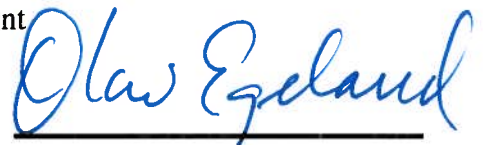
Øystein Baltzersen

**DEPARTMENT OF PRODUCTION  
AND QUALITY ENGINEERING**



Per Schjølberg

Associate Professor/Head of Department



Olav Egeland  
Responsible Supervisor

# Summary

The offshore industry uses substantial resources to ensure the integrity of subsea pipelines. Error Mechanisms such as a leakage for instance, will have a direct impact on the operation. Implementations of extensive maintenance strategies are thus needed to operate under safe conditions. It is a requirement that preventive and proactive maintenance strategy is to be used, e.g. installation of corrosion monitoring equipment.

The main goal of this thesis was to design a corrosion monitoring equipment based on ultrasonic technology for pipelines between 3" and 12" (in diameter). Sensorlink (partner) demanded a number of conditions that should be met; making sure that the transducer is not exposed to tangential or axial movement, the system should be installed by an ROV, designed for corrosive environments and withstand stresses at 3000 m depth. It is used Autodesk Inventor software and ANSYS to develop a conceptual design that meets the given requirements.

Through experimental work showed that Sensorlink's ultrasound system works. The water absorption rate of various plastic materials was tested. PEEK (Polyetheretherketone) was the material which absorbed the least water. PUR (Polyurethane) absorbed most, while POM (polyoxyethylene-methylene) lay somewhere in between.

Further work can address the absorption test of plastics over a longer period of time to confirm the saturation point. The pressure vessel, where the electrical system is located, should be pressure tested before it is used.

## Sammendrag

Offshore industrien bruker store ressurser på å sikre integriteten til undervannsrørledninger. Feilmekanisme i form av lekkasje vil ha direkte innvirkning på driften. Det iverksettes derfor omfattende vedlikeholdsstrategier for å kunne operere under trygge forhold. Det stilles krav til at preventiv og proaktiv vedlikeholdsstrategi skal benyttes, som for eksempel installasjon av korrosjonsmonitoreringsutstyr.

Hovedmålet med denne oppgaven var å designe et korrosjonsmonitoreringsutstyr basert på ultralydteknologi for rørledninger mellom 3" og 12" (i diameter). Sensorlink (samarbeidspartner) stilte en rekke krav som skulle tilfredsstilles, blant annet å sørge for at transducerene ikke utsettes for tangentiell eller aksiell bevegelse, systemet skal kunne installeres av en ROV, designes for korrosivt miljø og tåle påkjenninger ved 3000 meters dybde. Det er brukt Autodesk Inventor og ANSYS til å utarbeide et konseptuelt design som innfrir de gitte betingelsene.

Gjennom eksperimentelt arbeid ble det påvist at Sensorlinks ultralydssystem fungerer. Det ble testet vannabsorpsjon av ulike plastmaterialer. PEEK (Polyetheretherketone) var det materialet som absorberte minst vann. PUR (Polyuretan) absorberte mest, mens POM (Polyoksy-metylen) lå et sted i mellom.

Videre arbeid kan ta for seg å teste absorpsjon av plastmaterialer over en lengre periode for å få bekreftet metningspunktet. Trykkbeholderen, hvor det elektriske systemet befinner seg, bør trykktestes før det tas i bruk.

## Forord

Første del av rapporten er utarbeidet i felleskap med medstudent Daniel Berg. Vi har lik studieretning, samme veileder og tilnærmet lik problemstilling. Teoridelen av oppgaven samt eksperimentelt arbeid er utført i felleskap, mens design av det ROV-installerbare korrosjonsmonitoreringssystemet er utført individuelt. Jeg tok for meg løsning for rørdimensjoner fra 3” til 12”, mens Daniel så på løsninger for rørdimensjoner fra 12” til 30”.

Dataverktøy som Snagit, HYSYS, Quizix PumpWorks, Autodesk Inventor og ANSYS er benyttet i denne masteroppgaven. 3D DAK-modeller, 2D tegninger, Excel-ark og data fra simuleringer er lagt på egen CD.

Denne oppgaven hadde ikke vært mulig å gjennomføre uten hjelp av flere enkeltpersoner. Vi vil først og fremst takke vår veileder Sigbjørn Sangesland for hans positive og motiverende holdning. Vil også rette en stor takk til representant fra Sensorlink AS, Øystein Baltzersen. Til tross for hans stramme tidsplan tok han seg tid til å stille opp på møter samt veilede og besvare de spørsmål vi hadde vedrørende oppgaven.

Vi vil også takke alle som har vært involvert i forbindelse med labarbeidet. Først og fremst ønsker vi å takke labansvarlig Roger Overå. Han var meget behjelpelig i prosessen med laboppsett og veiledet oss i bruk av labutstyret. Vi ønsker også å takke Håkon og Terje på mekanisk verksted på IPT for hjelp til maskinering og konstruksjon av nødvendig lab-utstyr. En takk rettes også til Trond Schjelderup fra Bredero Shaw for anbefaling av testparameter i absorpsjonslaben.

Vi retter også en stor takk til Jan Kåre Bredal i Oceaneering for hans veiledning og kunnskap om typiske ROV-operasjoner.

Det stilles krav til at leseren har grunnleggende kjennskap til bruk av 3D-modelleringsprogramm.

Forsidebilde er et rendret bilde av monitoreringssystemet utviklet i denne masteroppgaven.

Trondheim 10/06-2014

Daniel Berg og Christer Moe



## Definisjoner/Nomenklatur

Blast cleaning - Blåserensing

NDFT - Nominal dry film thickness

PEEK - Polyetheretherketon

POM - Polyoksy-metyl

PUR - Polyuretan

RCU - Remote Control Unit

Rod shaped specimens - Testobjekter som har stavfasong

ROV - Remotely operated vehicle

SCE - Saturated calomel electrode

TMS - Tether Management System

# Innholdsfortegnelse

|   |     |
|---|-----|
| Summary .....   | i   |
| Sammendrag .....  | ii  |
| Forord .....  | iii |
| Definisjoner/Nomenklatur .....                                      | iv  |
| 1 Introduksjon .....  | 1   |
| 1.1 Bakgrunn .....  | 1   |
| 1.2 Målsetting .....  | 2   |
| 1.3 Begrensninger/avvik fra oppgaven .....                          | 3   |
| 1.4 Metodikk .....  | 4   |
| 2 Teoretisk bakgrunn .....  | 6   |
| 2.1 ROV - Oppbygning og egenskaper .....                            | 6   |
| 2.2 Ultralyd .....  | 9   |
| 2.2.1 Piezoelektriske transducere .....                             | 9   |
| 2.2.2 Ultralydmåling etter Pulse Echo prinsippet .....              | 9   |
| 2.3 Temperaturveksling i rørledning .....                           | 11  |
| 2.3.1 Introduksjon: .....   | 11  |
| 2.3.2 Bakgrunn .....  | 12  |
| 2.3.3 Mekanisme .....   | 13  |
| 2.3.4 Bevis for isentalpisk prosess: .....                          | 14  |
| 2.3.5 Joule-Thomson koeffisienten for ideell gass .....             | 15  |
| 2.3.6 Endring i temperatur: .....                                   | 16  |
| 2.3.7 Joule-Thomson koeffisienten .....                             | 17  |
| 2.3.8 Beregning av Joule-Thomson koeffisienten ved simulering ..... | 18  |
| 2.3.9 Konklusjon .....  | 21  |
| 2.4 Organic coating .....   | 24  |
| 2.4.1 Hvordan velge et godt beskyttelsessystem .....                | 24  |
| 2.4.2 <i>Cathodic disbonding</i> .....                              | 25  |
| 2.5 Galvanisk korrosjon .....                                       | 25  |
| 2.5.1 Katodisk beskyttelse .....                                    | 25  |
| CP-beskyttelse ved bruk av anoder .....                             | 28  |
| 2.5.2 Designbasis .....   | 28  |
| 2.6 Beregning av anodemasse: .....                                  | 30  |
| 2.6.1 Beleggnedbrytingsfaktor: .....                                | 30  |
| 2.6.2 Anodeareal: .....   | 31  |
| 2.6.3 Drivende spenning: .....                                      | 32  |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2.6.4 | Anodemotstand: .....                                | 32 |
| 2.6.5 | Anodestrøm: .....                                   | 33 |
| 2.6.6 | Strømbehov med <i>coating</i> :.....                | 33 |
| 2.6.7 | Antall anoder:.....                                 | 34 |
| 3     | Eksperimentelt arbeid/forsøk .....                  | 36 |
| 3.1   | Absorpsjon.....                                     | 36 |
| 3.1.1 | Sammendrag .....                                    | 36 |
| 3.1.2 | Introduksjon.....                                   | 36 |
| 3.1.3 | Teori .....   | 37 |
| 3.1.4 | Oppsett og prosedyre.....                           | 37 |
| 3.1.5 | Resultat .....                                      | 41 |
| 3.1.6 | Diskusjon .....                                     | 51 |
| 3.1.7 | Feilkilder.....                                     | 51 |
| 3.1.8 | Konklusjon.....                                     | 52 |
| 3.2   | Korrosjon .....                                     | 53 |
| 3.2.1 | Sammendrag .....                                    | 53 |
| 3.2.2 | Introduksjon.....                                   | 53 |
| 3.2.3 | Teori .....   | 53 |
| 3.2.4 | Oppsett og prosedyre.....                           | 53 |
| 3.2.5 | Resultat .....                                      | 56 |
| 3.2.6 | Diskusjon .....                                     | 58 |
| 3.2.7 | Konklusjon.....                                     | 59 |
| 4     | Utforming og design.....                            | 60 |
| 4.1   | Design Basis .....                                  | 60 |
| 4.2   | Presentasjon av korrosjonsmonitoreringssystem ..... | 60 |
| 4.3   | Installasjon.....                                   | 63 |
| 4.3.1 | Installasjon - steg 1.....                          | 63 |
| 4.3.2 | Installasjon - steg 2.....                          | 64 |
| 4.3.3 | Installasjon - steg 3.....                          | 66 |
| 4.4   | Låsemekanisme .....                                 | 67 |
| 4.4.1 | Låsemekanisme .....                                 | 67 |
| 4.4.2 | Fjærbasert innfestning .....                        | 69 |
| 4.4.3 | Hydraulisk sylinder .....                           | 70 |
| 4.4.4 | Momentbalanse .....                                 | 72 |
| 4.5   | Canister.....                                       | 74 |
| 4.5.1 | Design.....   | 74 |
| 4.5.2 | FEM analyse .....                                   | 74 |

|     |                      |    |
|-----|----------------------|----|
| 4.6 | Materialvalg .....   | 75 |
| 4.7 | Valg av coating..... | 76 |
| 4.8 | Anoder .....         | 76 |
| 5   | Diskusjon .....      | 78 |
| 6   | Konklusjon .....     | 80 |
| 6.1 | Videre arbeid: ..... | 81 |
| 7   | Referanser .....     | 82 |
|     | Vedlegg .....        | 84 |
|     | Vedlegg A.....       | 84 |
|     | Vedlegg B.....       | 84 |
|     | Vedlegg C.....       | 84 |
|     | Vedlegg D.....       | 84 |
|     | Vedlegg E .....      | 84 |
|     | Vedlegg F .....      | 84 |
|     | Vedlegg G.....       | 85 |
|     | Vedlegg H.....       | 85 |

# 1 Introduksjon

## 1.1 Bakgrunn

Rør og rørledninger er viktige komponenter til infrastrukturen til olje- og gassproduksjonsfelt. Svikt i disse komponentene vil ha en direkte innvirkning på driften. Operatørene må derfor iverksette omfattende vedlikeholdsprogram for å sikre at systemene er operert innenfor trykkgrensene. En korrektiv vedlikeholdsstrategi er ikke akseptabelt siden dette vil ha en direkte innvirkning på både miljø og kostnader. Dessuten vil også produksjonsstans vil føre til uønskede kostnader. Det er derfor krav om en preventiv og proaktiv vedlikeholdsstrategi. Fordelen med en slik tilnærming er at problem kan avdekkes/avsløres før en eventuell feilmekanisme oppstår.

Hovedproblemet for rørledninger er nedbrytningsmekanismer i form av mekaniske påkjenninger i tillegg til korrosjon og erosjon. Det forskes i stor grad på materialvalg og hvordan korrosjons- og erosjonsproblematikken skal håndteres på en økonomisk forsvarlig måte.

I fagområdet som omfatter inspeksjon og overvåking har rimelige kommunikasjon- og sensorteknologier lagt grunnlaget for nye konsept, hvor overvåking kan bli hyppigere brukt enn før. Innenfor petroleumsindustrien forventes det at denne tilgjengeligheten på rimelige kommunikasjon- og sensorteknologi vil føre til en forandring hvor flere ressurser vil bli brukt på observasjon, og mindre på inspeksjon. Drivkraften er i stor grad påvirket av motivasjonen til å drive olje- og gassfeltene mer kostnadseffektivt. I de fleste tilfeller vil automatisert overvåking kreve mindre personell sammenlignet med inspeksjonsoppdrag for like formål, og vil på den måten redusere kostnadene.

Definisjonen av et korrosjonsmonitoreringssystem:

*”Enhver metode som gir grunnlag for å fastslå korrosjonsrate eller korrosjonsstatus for en faktisk konstruksjon.”* (Johnsen, 2005)

Hovedvekten av denne oppgaven går ut på å designe et ROV-installerbart korrosjonsmonitoreringssystem for undervanns rørledninger basert på ultralydteknologi. Et slikt system vil kunne registrere veggtykkelse på rørledningen og dermed bestemme en korrosjonsrate. Denne informasjonen er verdifull og kan benyttes til blant annet:

- Avgjøre når rørledning må skiftes ut
- Verifisering av inhibitor kontroll
- Forlengelse av rørledningens levetid ved å regulere driftstrykk i henhold til resterende godstykkelse

Andre fordeler med et monitoreringssystem basert på ultralyd er at måleteknikken kan kategoriseres som en NDT-metode, integriteten til rørledningen blir derfor upåvirket. I tillegg vil systemet kunne generere automatiserte målinger med fleksibelt avlesningsintervall. (Sensorlink, u.d.)

Oppgaven er utarbeidet i samarbeid med Sensorlink AS som blant annet er leverandør av løsninger for korrosjonsmonitorering basert på ultralyd. For å fremstå som en attraktiv leverandør i et konkurransepreget marked er de alltid ute etter nye innovative løsninger. Innovativitet handler mest av alt om å redefinere et problem, se det med nye øyne. Et virkemiddel for å fremme innovasjon kan derfor være å benytte ekstern arbeidskraft. I den forbindelse ønsket de å designe en modulær ROV-installerbar løsning for korrosjonsovervåking basert på rørklammer med ultralyd. Tanken er at dette skal øke fleksibiliteten da standardiserte moduler kan settes sammen ved tilpasning for ulike rørdimensjoner. Ved å lage standardiserte moduler kan forhåpentligvis kostnadene reduseres, dette vil i så måte være attraktivt for kundemassen og selskapets avanse.

## 1.2 Målsetting

Hovedmålet i denne prosjektoppgaven er/var å utvikle et korrosjonsmonitoreringssystem basert på ultralydteknologi for installasjon med ROV ned til 3000m havdyp. Alle komponenter må dimensjoneres for å kunne håndtere belastning som følge av trykk på 3000m dyp. Følgende designkrav/rammebetingelser må oppfylles:

- Systemet skal kunne installeres av en ROV.
- Ingen tangentiell eller aksiell bevegelse på transducere tillates.
- Tiltak mot marin begroing på transducere bør implementeres.
- Innsamling av data enten ved bruk av akustisk modem eller opphenting av canister ved hjelp av ROV.
- Systemet skal designes for bruk i korrosivt miljø, en kombinasjon av materialvalg, katodisk beskyttelse og maling må vurderes.

- I den grad det er lønnsomt skal systemet modulariseres med formål om tilpasning til ulike rørdimensjoner.

I forbindelse med materialvalg må det også tas hensyn til forventet driftstemperatur. Effekten av trykkfall grunnet nedstengning av rørledning bør derfor vurderes og kvantifiseres. På denne måten kan det defineres et temperaurvindu hvor materialene forventes å operere. Følgende temperaturer forventes for sjøvann og fluidet som strømmer i rørledningen:

- Sjøvannstemperatur fra  $-3\text{C}^{\circ}$  til  $30\text{C}^{\circ}$ .
- Maks fluidtemperatur i rør:  $100\text{C}^{\circ}$ .

Det skal utføres et labforsøk hvor aktuelle plastmaterialer nedsenkes i vann under ulike trykk og temperaturer. Formålet med dette er å avgjøre absorpsjonsrate, metningspunkt og hvordan trykk og temperatur påvirker disse parameterne. Valg av material for plastkomponenter i monitoreringssystemet bør vurderes i henhold til resultatene av absorpsjonsforsøket.

I tillegg skal det utføres korrosjonseksperiment ved bruk av ultralydmonitorering. Målet er å bekrefte at Sensorlinks ultralydteknologi er i stand til å detektere endring i godstykkelse som funksjon av tid slik at korrosjonsrate kan bestemmes.

### 1.3 Begrensninger/avvik fra oppgaven

Designprosessen av canisterflasken var en iterativ prosess for å optimalisere designet. Canisteren anses som den eneste komponenten i monitoreringssystemet som er utsatt for et differentielltrykk på 300 bar. Det er derfor kun brukt *Finite Element Method* canisterflasken med tilhørende lokk. Oppgaveteksten tar for seg et spekter av rørdimensjoner. Under utforming er det presentert et klammer med bestemt rørdimensjon. Tanken er da at deler av klammeret kan brukes for andre rørdimensjoner selv om hele klammeret ikke kan modulariseres. På den måten kan noen deler være standardiserte, mens andre deler må tilpasses til spesifikke caser.

Nedstengninger av rørledninger forekommer og en av oppgavene tar for seg hvordan effekten av temperaturvekslinger (transient tilstand) påvirker rørledningen og ultralydklammeret. Det er fokusert mest på hva som skjer fra normal drift til nedstengning. I oppgaven er det foreslått å bruke FEM-analyse til å simulere en nedstengning. Kalkulasjonene er derimot gjort i HYSYS for å simulere en typisk nedstengning av en rørledning.

Klammeret blir brukt i sjøvann og derfor viktig å beskytte det mot korrosjon. I den anledning er det foreslått et typisk *coatingsystem* i kombinasjon med offeranoder. Det er gjort rede for hvor mange offeranoder som er nødvendig for å beskytte klammeret mot korrosjon, men de er ikke tegnet inn i 3D-dak modellen.

Det er ikke benyttet standarder til å dimensjonere delene i konstruksjonen da klammeret er på konseptnivå. Det er heller ikke laget 2D-tegninger for alle deler. Det ville blitt en alt for tidkrevende prosess å generere 2D-tegninger for alle deler siden klammeret består av veldig mange små deler.

## 1.4 Metodikk

For å sikre god prosjektstyring startet prosjektet med et forstudie der oppgaven ble analysert og brutt ned i mindre deloppgaver. WBS og Gantt diagram ble benyttet som hjelpemidler i prosjektstyringen. I Gantt diagrammet ble det også lagt inn milepæler for å sikre at tidsskjemaet ble overholdt. WBS og Gantt har blitt revidert iterativt i prosjektperioden. Programverktøyene Microsoft Onedrive, Dropbox og Skype har vært hyppig benyttet for å forenkle samarbeidet. Onedrive ble hovedsakelig brukt for å kunne opprette interaktive tekstdokumenter (Word online) hvor begge deltakerne hadde mulighet til å arbeide parallelt.

Strategien for prosjektmetodikken var å holde møter over Skype hvor problemstillinger ble brutt ned i mindre arbeidsoppgaver og delegert. En tabell med oversikt over alle oppgavene og tidsfrister ble opprettet i et interaktivt dokument, her var det også mulig å legge inn kommentarer til hverandres arbeid. Påfølgende møte startet alltid med revidering av det individuelle arbeidet utført i tiden fra forrige møte. Videre fortsatte prosessen med å igjen delegere nye arbeidsoppgaver.

I starten av prosjektet ble det utført et grundig litteratursøk for å innhente nødvendig informasjon slik at oppgaven kunne utføres på en tilfredsstillende måte.

Designarbeidet tok utgangspunkt i det dykkerinstallerbare konseptet utviklet i forprosjektet (til Daniel Berg). For å videreutvikle dette konseptet til et ROV-installerbart system ble det nyttig å søke ekstern veiledning hos ROV og ROV-verktøy produsenter i tillegg til Sensorlink. Hensikten med dette er å innhente kunnskap og informasjon om typiske prosedyrer ved ROV-installasjon, utfordringer rundt installasjonen og hvilke verktøy som finnes som hyllevarer. Rapportskrivningen foregikk parallelt med øvrig arbeid. På grunn av at



designarbeidet krevde tett samarbeid med Sensorlink var det naturlig å ha annet arbeid i påvente av møter, informasjon etc., for å sikre en stabil fremdrift i prosjektarbeidet.

## 2 Teoretisk bakgrunn

Første delen av dette kapittelet vil dekke grunnleggende teori rundt ROV-operasjoner og ultralydteknologi. Deretter vil det bli belyst hvilke konsekvenser som er knyttet til temperaturvekslinger i rørledninger og hvilken betydning *organic coating* og offeranoder har for en konstruksjon.

### 2.1 ROV - Oppbygning og egenskaper



Figur 1 - ROV Millennium Plus (Oceaneering, 2013)

#### Oppbygning

I denne oppgaven utvikles som nevnt innledningsvis et korrosjonsmonitoreringsystem basert på ultralydteknologi. Et av kravene til systemet er at det skal kunne installeres ved hjelp av ROV. Operasjonen krever bruk av manipulatorer og spesialverktøy for å kunne utføre de nødvendige oppgavene. En ROV med slikt utstyr kalles for en arbeids-ROV. (Lindaas, 2002)

#### Delsystemer

ROV-systemet er bygd opp av flere delsystemer:

- ROV
- Kabelsystem med eller uten TMS.
- System for sjøsetting av ROV
- Kontainer med kontroll- og styresystem

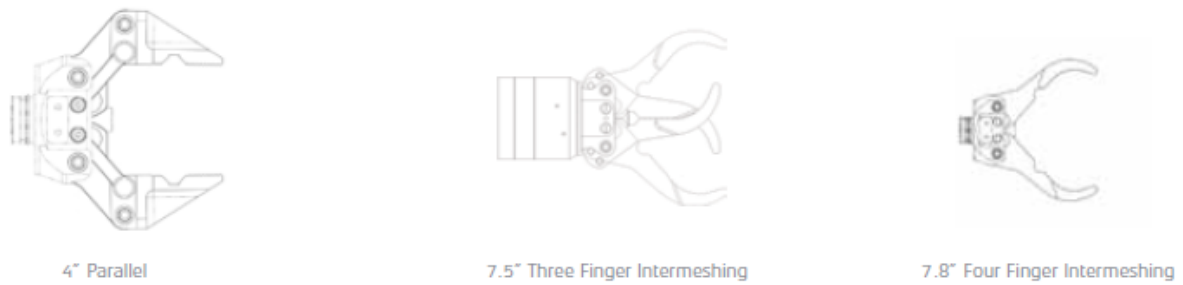
TMS installeres sammen med ROV'en til det aktuelle havdypet (3000 meter i dette tilfellet). Når ROV (med TMS) har nådd det aktuelle vandypet, frigjøres ROV'en fra TMS'en og drar med seg en kabel («Tether»). Denne kabelen er nøytral i vann. TMS'en har negativ oppdrift i vann slik at den kan ta opp tyngde- og dragkrefter. Tether-kabelen spoles ut av en winch fra TMS'en slik at det er mulig å oppnå «slakk» i kabelen. Farkosten vil da kunne arbeide i relativt rolige omgivelser og uten store påkjenningskrefter. (Lindaas, 2002)

### Egenskaper

Figur 1 er et bilde av Oceaneerings mest brukte ROV, Millennium. Denne farkosten bruker normalt to manipulatorarmer. Den markedsledende 7-funksjons manipulatorarmen vist på Figur 2 er montert på høyre side (sett bakfra) og er den armen som vanligvis brukes til å utføre operasjoner. På venstre side (sett bakfra) er det montert en annen manipulatorarm, denne armen benyttes hovedsakelig som gripeklo. På norsk sektor er det tre-finger klo som er mest utbredt. Parallellklo er også mye brukt, spesielt internasjonalt, og Figur 3 viser begge klotypene samt en fire-finger klo. Alle har sine fordeler og ulemper, og bruken har sammenheng med hvilken klo de forskjellige ROV-selskapene har standardisert. (Bredal, 2014)



**Figur 2 - TITAN 4 manipulator (Vedlegg C2)**



**Figur 3 - Fra venstre: Parallellklo, Tre-finger klo og Fire-fingerklo (Vedlegg C2)**

### Interface/grensesnitt mellom tool og ROV

I operasjoner der det benyttes hydraulikk fra ROV blir det ofte brukt en *stab* til *receptacle*-forbindelse. Illustrasjoner av *receptacles* er vist i Figur 5. *Receptacle* blir montert på selve *toilet*, mens hydrauliske *hot stab* blir montert på ROV(Figur 4). Mellom ROV'ens RCU og *hot stabs* er det montert hydrauliske trykkslanger. I RCU'en er det proporsjonalventiler for å kunne kontrollere *flow* og trykk via ROV'ens kontrollsystem. TITAN 4 manipularearmen har et dreiemoment på 170Nm og kan løfte maks 50kg i vann (se Vedlegg C2). (Bredal, 2014)



**Figur 4 - Fra venstre: Single-, dual- og quad port hydrauliske stabs (Vedlegg C3)**



**Figur 5 - Fra venstre: Single-, dual- og quad port receptacles (Vedlegg C4)**

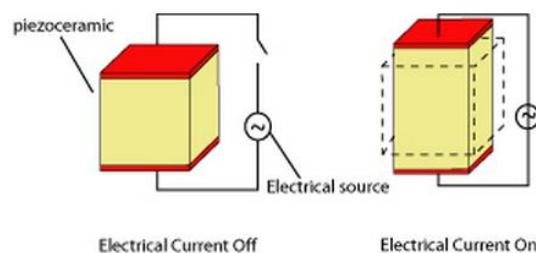
## 2.2 Ultralyd

Det finnes en rekke applikasjoner for ultralydteknologi. I denne oppgaven fokuseres det kun på *Pulse Echo* metoden med piezoelektriske transducere. Slik type teknologi benyttes av Sensorlink og er derfor mest aktuell for denne oppgaven.

### 2.2.1 Piezoelektriske transducere

Piezoelektrisitet er et fenomen der krystallinske materialer genererer elektriske ladninger ved påføring av mekanisk trykk. Det samme skjer dersom materialet utsettes for strekk, men da med resulterende motsatt spenning. Denne effekten er også reversibel slik at dersom elektrisk spenning påføres materialet vil det endre form. Det eksisterer et proporsjonalt forhold mellom generert spenning og trykkintensitet. (Piezo\_Institute, 2013) Den piezoelektriske effekten er illustrert i Figur 6. Konvertering av elektrisk puls til mekaniske vibrasjoner og tilbakekonvertering av reflekterte mekaniske vibrasjoner til elektrisk pulse kan sies å være grunnprinsippet for ultralydtesting med piezoelektriske transducere. (NDT-ResourceCenter, 2013)

Piezoelektriske transducere kan designes for direkte kontakt med testobjekt, typiske for håndholdte apparater. De kan også designes for bruk med væske som koblingsmedium, altså er det ikke direkte kontakt mellom transducer og testobjekt. (NDT-ResourceCenter, 2013) Sistnevnte løsning vil benyttes i designforslaget presentert i denne oppgaven.

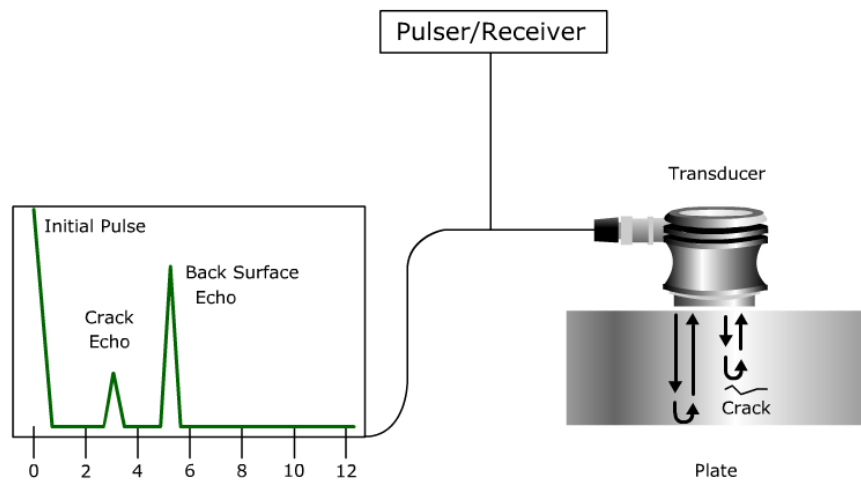


Figur 6 - Piezoelektrisk materiale (NDT-ResourceCenter, 2013)

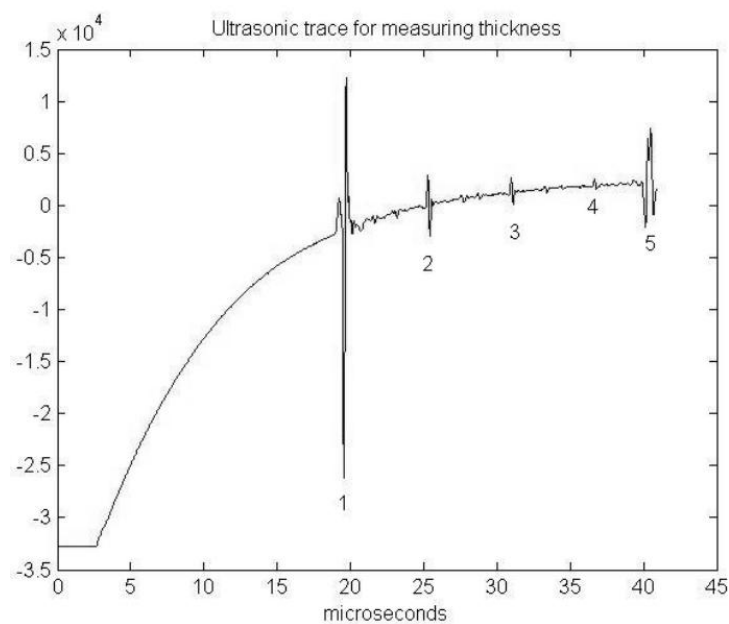
### 2.2.2 Ultralydmåling etter Pulse Echo prinsippet

Figur 7 illustrer virkemåten for ultralydmåling etter *Pulse Echo* metoden. Ultralydkortet (*Pulser/Receiver*) driver transduceren ved å generere høyspente elektriske pulser. Dette fører til at transduceren genererer høyfrekvent ultralydenergi. Denne energien forplanter seg gjennom materialet (*Plate*) som lydbølger. En del av energien reflekteres dersom lydbølgene møter på en diskontinuitet (*Crack*) eller baksiden av platen. De reflekterte lydbølgene

omformes til et elektrisk signal når de igjen returnerer til transduceren. Plottet i Figur 7 viser styrke av reflektert signal som funksjon av tid. (NDT-ResourceCenter, 2013)



**Figur 7 - Illustrasjon av *pulse echo* metoden (NDT-ResourceCenter, 2013)**



**Figur 8 - Ultralydmåling (Tarjei Rommetveit & Øystein Baltzersen, 2008)**

Figur 8 viser måledata fra en ultralydmåling utført etter *Pulse Echo* prinsippet. Punkt 1 på figuren er førsterefleksjonen fra ytterveggen. Punkt 2,3 og 4 kommer fra refleksjonen fra innerveggen hvor lydbølgen har propagert først en, to og tre ganger mellom yttervegg og innervegg for så å returnere til transduceren. Tidsintervallet "t" mellom punkt 1 og 2 er tiden det tar for den akustiske pulsen å forflytte seg fra yttervegg til innervegg og fra innervegg til

yttervegg. Når lyd hastigheten i testobjektet "c" er kjent kan tykkelsen av testobjektet beregnes etter følgende formel:

$$T(t) = c \cdot \frac{t}{2} \quad (2.1)$$

(Tarjei Rommetveit & Øystein Baltzersen, 2008)

For å oppnå pålitelige tykkelsesmålinger er det viktig at transduceren står normalt på testobjektet. En annen ting som er verdt å bemerke er at lyd hastigheten i testobjektet endres som funksjon av temperatur. I tillegg vil temperaturendring medføre termisk ekspansjon eller kontraksjon av materialet. Ved å implementere en temperatursensor som måler temperaturen i testobjektet kan disse effektene kompenseres for ved å introdusere korreksjonsledd i (2.1). Dette drøftes og vises i kapittel 3.2.6. (Tarjei Rommetveit & Øystein Baltzersen, 2008)

**Fordeler:** Bare ensidig tilgang kreves. Kan brukes på testobjekter med høy materialtykkelse. Rask responstid. Kan detektere sprekker. *Non intrusive NTD*-metode, måleutstyr kan monteres eksempelvis på utsiden av en rørledning uten at skader påføres. Direkte målemetode.

**Ulemper:** Vanskelig å bruke på materialer med uregelmessig geometri. Vanskelig å bruke på inhomogene materialer. Krever normalt et koblingsmedium(eksempelvis vann). Defekter lokalisert parallelt med lydbølgen kan gå ubemerket.(NDT-ResourceCenter, 2013) Som en digresjon kan det nevnes at ved inspeksjon av eksempelvis sveiseskjøter på rørledninger kan transducere orienteres i en vinkel mot testobjektet, på denne måten kan slike defekter avsløres. (Heier, 2013)

## 2.3 Temperaturveksling i rørledning

### 2.3.1 Introduksjon:

I forbindelse med nedstengning av rørledning kan trykkfall resultere i en temperaturendring av fluidet gitt at det består av gass eller en blanding av gass og væske.(Støvneng, 2014) Denne mekanismen er kjent som Joule-Thomson effekten. Dette i kombinasjon med konveksjonstap, som ikke drøftes i denne oppgaven, kan resultere i store temperaturfall. Rapporten tar i dette delkapitlet for seg hvorfor denne effekten oppstår, hvordan temperaturendring kan kalkuleres og hvorfor effekten ikke eksisterer for reell gass.

### 2.3.2 Bakgrunn

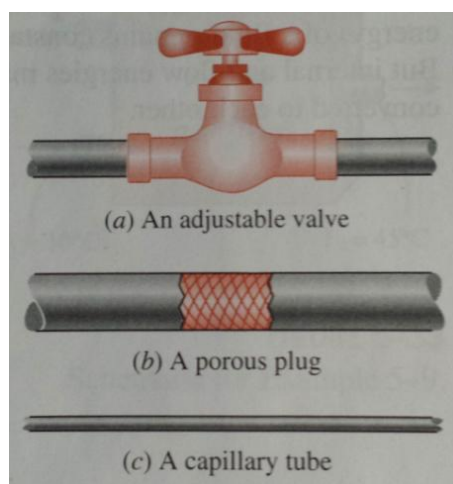
Joule-Thomson effekten er en beskrivelse av et fysisk fenomen hvor temperaturen til en reell gass enten øker eller avtar ved fri ekspansjon ved konstant entalpi. Fenomenet ble først oppdaget av James Prescott Joule og William Thomson (Kelvin) i 1852.

En prosess der entalpien holdes konstant kalles en isentalpisk prosess. En slik prosess krever per definisjon at ingen varme overføres mellom gassen og omgivelsene og at gassen ikke utfører arbeid. Videre kalles en prosess uten varmeoverføring for en adiabatisk prosess.

En adiabatisk ekspansjon kan enten være reversibel eller irreversibel. I en reversibel adiabatisk ekspansjon er gassen til enhver tid i termodynamisk likevekt. Gassen utfører positivt arbeid på omgivelsene og temperaturen synker. Her er forøvrig entropien konstant, prosessen kalles derfor en isentropisk ekspansjon.

Til forskjell utfører ikke gassen arbeid på omgivelsene i en irreversibel adiabatisk ekspansjon. Dette er altså en isentalpisk prosess. Temperaturen for en reell gass vil i en slik prosess holde seg konstant mens temperaturen til en reell gass enten vil øke eller avta, denne temperaturendringen er kjent som Joule-Thomson effekten. (Credence Gas Services, 2014)

I praksis opptrer Joule-Thomson effekten der strømmingen strupes. Typiske eksempler på innretninger som kan forårsake dette er, som vist i Figur 9, ventiler, kapillarrør og porøse plugger. I motsetning til eksempelvis turbiner kan disse forårsake trykkfall uten at arbeid utføres. Varmeoverføring mellom disse innretningene og fluidet kan ofte neglisjeres da det normalt sett ikke er tilstrekkelig areal eller tid for at en effektiv varmeoverføring skal finne sted.



**Figur 9 - Nedstrupning av strømning (Cengel & Boles, 2011)**



Joule-Thomson effekten benyttes til praktiske formål som for eksempel kjøleskap, og varmepumper. I tillegg kan effekten benyttes til eksempelvis å kjøle ned en gass til flytende fase, dette kan i noen tilfeller være hensiktsmessig i forbindelse med transport. (Cengel & Boles, 2011)

### 2.3.3 Mekanisme

To mekanismer, den dominerende av dem bestemmer om gassen får en temperaturøkning eller en temperaturreduksjon.

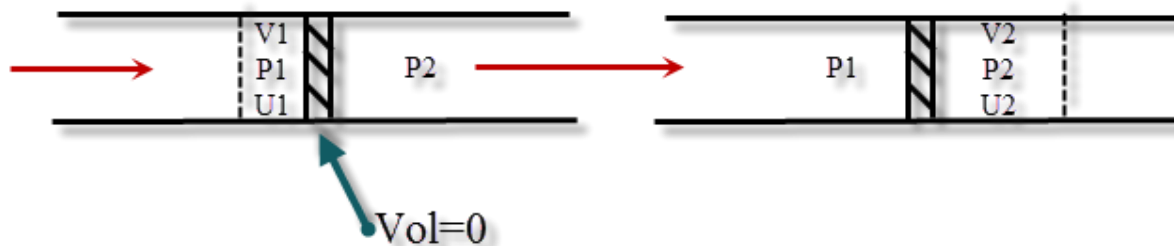
Ettersom gassen ekspanderer øker gjennomsnittlig avstand mellom molekylene. På grunn av intermolekylære tiltrekningskrefter (Van der Waal krefter) øker dermed gassens potensielle energi. I en irreversibel adiabatisk ekspansjon utveksler ikke gassen varme med omgivelsene, den utfører heller ikke arbeid. Gassens energi vil derfor være konstant. Etter prinsippet om konservering av energi vil økning i potensiell energi implisere en reduksjon i kinetisk energi og dermed temperatur.

Parallelt med overnevnte fenomen forgår en annen mekanisme med motsatt effekt.

Kollisjoner mellom gassmolekylene fører til at kinetisk energi midlertidig overføres til potensiell energi. Ettersom den gjennomsnittlige intermolekylære avstanden øker vil raten av antall kollisjoner mellom gassmolekylene avta. Dette vil igjen føre til en reduksjon i gjennomsnittlig potensiell energi. Denne gang vil prinsippet om konservering av energi bety en økning av den kinetiske energien. Denne mekanismen vil med andre ord føre til en økning av gassens temperatur. Hvilke av mekanismene som dominerer bestemmes av gassens inversjonstemperatur. (Credence Gas Services, 2014)

*”Inversjonstemperatur, den høyeste temperatur hvor en gass blir avkjølt hvis den får utvide seg fritt. Hvis gassens temperatur er høyere enn inversjonstemperaturen, blir den i stedet oppvarmet ved utvidelsen.”* (SNL, 2005-2007)

### 2.3.4 Bevis for isentalpisk prosess:



**Figur 10** Teoretisk skisse av en irreversibel adiabatisk ekspansjon

Ser på et fluid med volum  $V_1$  som ekspanderes til  $V_2$ . Fluidmengden ( $V_1$ ) har et trykk ( $P_1$ ) og en indre energi ( $U_1$ ). Fluidet presses gjennom fra venstre mot høyre i en kontinuerlig prosess. Tenker at fluidet dyttes sammen fra  $V_1$  til 0 og kommer ut på andre siden med et lavere trykk  $P_2$  og utvider seg fra 0 til et endelig volum  $V_2$  som er større enn  $V_1$ . Denne prosessen er illustrert i Figur 10. Antar fri ekspansjon, altså en irreversibel adiabatisk ekspansjon. Ser på energibevarelse og starter med arbeidet ( $W$ ):

$$W = \int_{V_1}^0 P_1 \cdot dV + \int_0^{V_2} P_2 \cdot dV = -P_1 \cdot V_1 + P_2 \cdot V_2 \quad (2.2)$$

Endringen i indre energi ( $\Delta U$ ) blir:

$$\Delta U = U_2 - U_1 \quad (2.3)$$

I en adiabatisk prosess er varmetap  $Q = 0$ , neglisjerer altså konveksjon. Netto tilført varme ( $Q$ ) er:

$$Q = 0, \text{ og } Q = \Delta U + W = U_2 - U_1 + P_2 \cdot V_2 - P_1 \cdot V_1 \quad (2.4)$$

Entalpien ( $H$ ) kan uttrykkes:

$$H = U + P \cdot V \quad (2.5)$$

Ved å omorganisere ligning (2.4) blir uttrykket:

$$U_1 + P_1 \cdot V_1 = U_2 + P_2 \cdot V_2 \quad (2.6)$$

Ved å kombinere (2.5) og (2.6) blir:

$$H_1 = H_2 \quad (2.7)$$

Fra (2.7) er det vist at nedstrupningsprosessen er isentalpisk.

(Støvneng, 2014)

### 2.3.5 Joule-Thomson koeffisienten for ideell gass

Også i dette eksempelet beskrives entalpien som en funksjon av trykk og temperatur.

Entalpiendringen ( $dH$ ) kan uttrykkes på følgende måte:

$$dH = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_P \cdot dT + \left( \frac{\partial H}{\partial P} \right)_T dP \quad (2.8)$$

Varmekapasitet for gass ved konstant trykk ( $C_p$ ) er:

$$C_p = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_P \quad (2.9)$$

Ved å introdusere venstre siden av (2.9) i (2.8) kan entalpiendringen skrives på følgende måte:

$$dH = C_p \cdot dT + \left( \frac{\partial H}{\partial P} \right)_T dP \quad (2.10)$$

Ifølge *Maxwell relation* nr. 4 er:

$$\left( \frac{\partial H}{\partial P} \right)_T = V - T \cdot \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \quad (2.11)$$

Videre introduseres høyresiden av (2.11) i (2.10):

$$dH = C_p \cdot dT + \left[ V - T \cdot \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \right] dP \quad (2.12)$$

Som tidligere nevnt er Joule-Thomson prosessen en isentalpisk prosess, med andre ord er  $dH = 0$ . Ved å samtidig omorganisere på (2.12) kan Joule-Thomson koeffisienten, vist i (2.20), uttrykkes:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H = \mu_{JT} = -\frac{1}{C_p} \cdot \left[ V - T \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \right] \quad (2.13)$$

Volumet,  $V$ , kan uttrykkes ved hjelp av ideell gasslov:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \Rightarrow V = \frac{n \cdot R \cdot T}{P} \quad (2.14)$$

Ved å se på ett mol gass blir:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = \frac{R}{P} \quad (2.15)$$

Videre introduseres høyre side av (2.15) i (2.13):

$$\mu_{JT} = -\frac{1}{C_p} \cdot \left[ V - T \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \right] = -\frac{1}{C_p} \cdot \left[ V - \frac{T \cdot R}{P} \right] = -\frac{1}{C_p} \cdot (V - V) = 0 \quad (2.16)$$

(Cengel & Boles, 2011)

Når  $\mu_{JT} = 0$  vil ikke gassen endre temperatur i nedstrupningsprosessen. Fra kapittel 2.3.3 ovenfor er dette naturlig da ideell gasslov ikke tar hensyn til tiltrekningskrefter mellom gassmolekylene.

### 2.3.6 Endring i temperatur:

Lar entalpien være en funksjon av trykk og temperatur, og temperaturen en funksjon av trykk og entalpi. Vist i (2.17).

$$H = H(T, P) \text{ og } T = T(P, H) \quad (2.17)$$

Temperaturrendringen kan uttrykkes på følgende måte:

$$dT = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H \cdot dP + \left(\frac{\partial T}{\partial H}\right)_P \cdot dH \quad (2.18)$$

I en isentalpisk prosess er entalpien konstant, endringen(  $dH$  ) er derfor lik null slik at det siste leddet forsvinner. Det betyr at:

$$dT = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_H \cdot dP \quad (2.19)$$

Joule-Thomson koeffisienten er definert på følgende måte:

$$\mu_{JT} = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_H \quad (2.20)$$

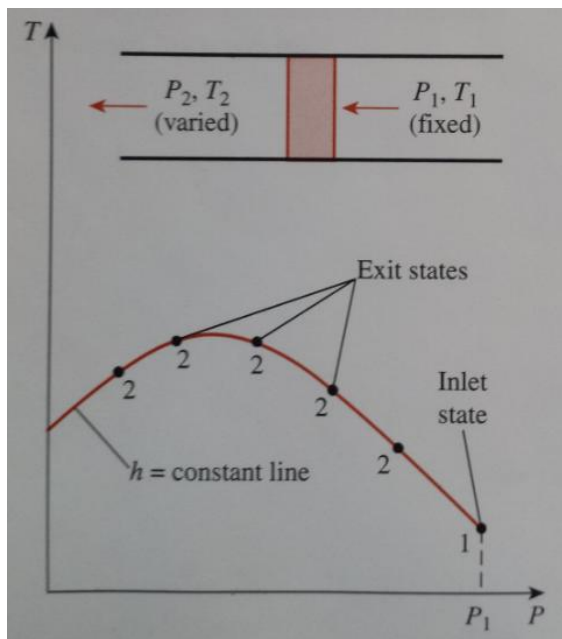
Temperaturrendring kan derfor skrives:

$$dT = \mu_{JT} \cdot dP \quad (2.21)$$

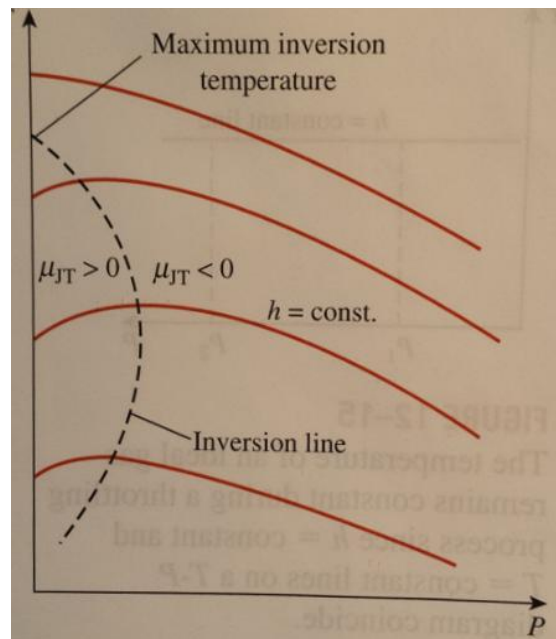
I en ekspansjon reduseres trykket, altså er  $dP < 0$ . Fra (2.21) ser vi at avkjøling forekommer når  $\mu_{JT} > 0$  og oppvarming når  $\mu_{JT} < 0$ . (Støvneng, 2014)

### 2.3.7 Joule-Thomson koeffisienten

Øverst i Figur 11 illustreres et rør med en porøs plugg. Hensikten er å fremprovosere et trykkfall over pluggen. Innløpstrykk og -temperatur(høyre side, punkt en i plottet) holdes konstant (isentalpisk prosess), mens utløpstrykk og -temperatur leses av på andre siden av pluggen. Videre utføres testen ved bruk av forskjellige porøse plugger som gir ulike trykkfall og dermed ulike temperaturer(punkter markert som 2 i plottet). Innsamlede målepunkter benyttes til å plotte et TP-diagram og en konstant entalpilinje trekkes mellom punktene. Tilsvarende prosedyre kan repeteres for ulike trykk og temperaturer på innløpssiden. Disse datasettene kan dermed benyttes for å konstruere konstant entalpilinjer for fluidet under ulike oppstartsforhold. Dette er illustrert i Figur 12. (Cengel & Boles, 2011)



**Figur 11 - Konstant entalpilinje og skisse av eksperimentelt oppsett (CENGEL & BOLES, 2011)**



**Figur 12 - Konstant entalpilinjier for ulike innløpstrykk og temperaturer (CENGEL & BOLES, 2011)**

Fra (2.20) var Joule-Thomson koeffisienten definert som  $\mu_{JT} = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_H$ . Denne koeffisienten

kan altså uttrykkes som stigningstallet til konstant-entalpilinjen i TP-diagrammet.

Inversjonstemperaturen leses av på y-aksen i diagrammet der stigningstallet til konstant entalpilinjen er lik null. Med andre ord, i toppunktet. På venstre side av

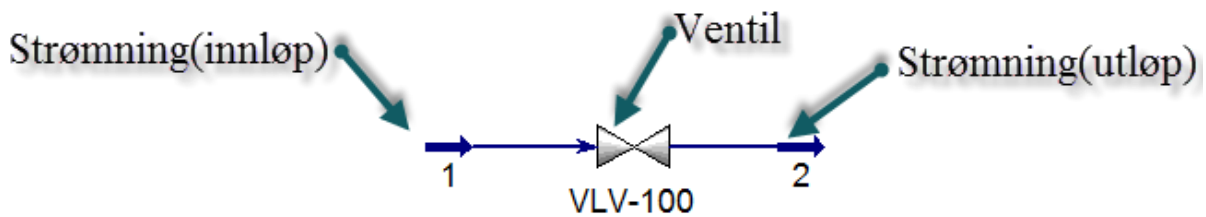
inversjonstemperaturen vil fluidet avkjøles. Motsatt effekt oppstår på høyre side, her vil fluidet oppvarmes. Det betyr at for positive verdier av Joule-Thomson koeffisienten vil fluidet avkjøles og for negative verdier vil det oppvarmes. Dette ble også vist i (2.21).

### 2.3.8 Beregning av Joule-Thomson koeffisienten ved simulering

Dette delkapitlet tar for seg en case hvor naturgass strupes gjennom en ventil under isentalpiske forhold. Metodikken benyttet for å konstruere konstant entalpilinjer er som beskrevet i 2.3.7, men resultatene er innsamlet fra simulering med Aspen HYSYS og ikke ved praktiske forsøk.

Flytdiagrammet for HYSYS-modellen er illustrert i Figur 13. Modellen er av det enklere slaget og består av en ventil med et innløp og et utløp. I denne casen var målet kun å se på Joule-Thomson effekten, det er derfor ikke lagt til rørledninger i modellen da konveksjonstap ikke var av interesse. Systemet er satt opp slik at det ikke er noe varmetap til omgivelsene,

nedstrupningsprosessen blir derfor isentalpisk. Dette er også kontrollert og vist i Vedlegg D, Figur 2 og 3.



**Figur 13 Flyttdiagram HYSYS-modell**

Som nevnt innledningsvis i delkapitlet er det benyttet naturgass i simuleringen, komposisjonen av denne er vist i Vedlegg D, Tabell 1. Som termodynamisk beregningsmetode er Peng Robinson tilstandsligningen benyttet. Størrelsen på strømningsrate har ingen innvirkning på resultatet da rørledning som nevnt ikke er definert. Simuleringen er utført for ulike innløpstrykk og innløpstemperaturer, disse er spesifisert i Tabell 1. Dette gir et totalt antall på 20 simuleringer.

**Tabell 1 Oversikt over innløpstrykk og innløpstemperatur benyttet for simulering**

| Trykk, $P_1$ [Bar] | Temperatur, $T_1$ [Celsius] |    |    |     |
|--------------------|-----------------------------|----|----|-----|
| 800                | 25                          | 50 | 75 | 100 |
| 200                | 25                          | 50 | 75 | 100 |
| 150                | 25                          | 50 | 75 | 100 |
| 100                | 25                          | 50 | 75 | 100 |
| 50                 | 25                          | 50 | 75 | 100 |

Innløpstemperatur( $T_1$ ) og innløpstrykk( $P_1$ ) ble holdt konstant for hvert datasett, mens differensialtrykket( $dP$ ) over ventilen ble endret i steg på 1bar. På utløpssiden ble utløpstemperaturen( $T_2$ ) registrert. For å effektivisere prosessen med/ved å innhente resultater ble det opprettet et *Case-study* i HYSYS(Vedlegg D, Figur 4). Fordelen med dette var at det da var mulig å programmere HYSYS til å kjøre en sekvens der differensialtrykket over ventilen stegvis ble endret med ønsket intervallstørrelse. I dette tilfelle med  $dP = -1bar$  for alle målepunkter/steg(se Vedlegg D, Figur 4). Simuleringene i HYSYS ga måledata for temperatur og trykkendring kumulativt relativt til initialverdiene på innløpssiden. Denne informasjonen ble importert til Excel for videre behandling. Av interesse var kalkulasjon av

Joule-Thomson koeffisienten for hvert målepunkt/steg og bestemmelse av gassens inversjonstemperatur for ulike initialforhold.

Som vist i Vedlegg D, Figur 2 og 3 var entalpien konstant og fra ligning (2.20) var Joule-Thomson koeffisienten definert som:

$$\mu_{JT} = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_H \quad (2.22)$$

For å kalkulere Joule-Thomson koeffisienten for hvert målepunkt/steg ble trykk og temperaturendring for hvert målepunkt/steg kalkulert på følgende måte:

$$dP_1 = (P_2 - P_1), dP_2 = (P_3 - P_2), \dots, dP_n = (P_n - P_{n-1}) = -1 \text{ bar} \quad (2.23)$$

$$dT_1 = (T_2 - T_1), dT_2 = (T_3 - T_2), \dots, dT_n = (T_n - T_{n-1}) \quad (2.24)$$

Slik at Joule-Thomson koeffisienten for hvert steg dermed uttrykkes:

$$\mu_{JT_1} = \left( \frac{dT_1}{dP_1} \right)_H, \mu_{JT_n} = \left( \frac{dT_n}{dP_n} \right)_H, \dots, \mu_{JT_n} = \left( \frac{dT_n}{dP_n} \right)_H \quad (2.25)$$

For valgt intervallstørrelse ga eksempelvis simuleringene for 800bar 799målepunkter/steg for hver temperatur. Av praktiske årsaker er derfor måledata, kalkulasjoner og plot vedlagt som et Excel-ark i Vedlegg A1.

For å avdekke gassens inversjonstemperatur var det nødvendig med et relativt høyt initialtrykk. Figur 14 viser konstant entalpilinjler generert fra datasett med initialtrykk på 800bar. Her vises også gassens inversjonstemperatur for de ulike initialtemperaturene. Verdiene benyttet for å plote inversjonstemperaturlinjen er vist i Tabell 2.

**Tabell 2 Innløp og utløpsverdier ved  $\mu_{JT} = 0$**

| c   | $T_1 [^{\circ}C]$ | $P_2 [Bar]$ | $T_2 [^{\circ}C]$ | $\mu_{JT} [^{\circ}C / bar]$ |
|-----|-------------------|-------------|-------------------|------------------------------|
| 800 | 25                | 464         | 31,5              | 0                            |
| 800 | 50                | 503         | 55                | 0                            |
| 800 | 75                | 535         | 78,8              | 0                            |
| 800 | 100               | 559         | 103               | 0                            |



For at Joule-Thomson koeffisienten skal ha positiv verdi må trykket opp i rundt  $500\text{bar}$  for initialtemperaturene benyttet i denne analysen. Undervannsrørledninger opererer normalt på lavere trykk enn dette. En nedstrupningsprosess vil for denne gassen utelukkende resultere i avkjøling. (Sangesland, 2014).

Konstant entalpilinjer for initialtrykk på  $150\text{bar}$  er vist i Figur 15. Her er store deler av konstant entalpilinjene tilnærmet lineære. Dette gjør at Joule-Thomson koeffisienten kan kalkuleres for  $dP \gg 1$ . For å illustrere dette kan eksempelvis temperaturendring for  $dP = -70\text{bar}$  kalkuleres for initialtrykk på  $150\text{bar}$  og initialtemperatur på  $50^\circ\text{C}$ . Joule-Thomson koeffisienten vil i dette tilfellet være stigningstallet av den lineære trendlinjen som går fra  $P_1 = 150\text{bar}$  til  $P_2 = 80\text{bar}$ . Formel for trendlinjen er oppgitt i figuren og ved å derivere denne blir:

$$\mu_{JT} = 0,2588 \left[ ^\circ\text{C} / \text{bar} \right] \quad (2.26)$$

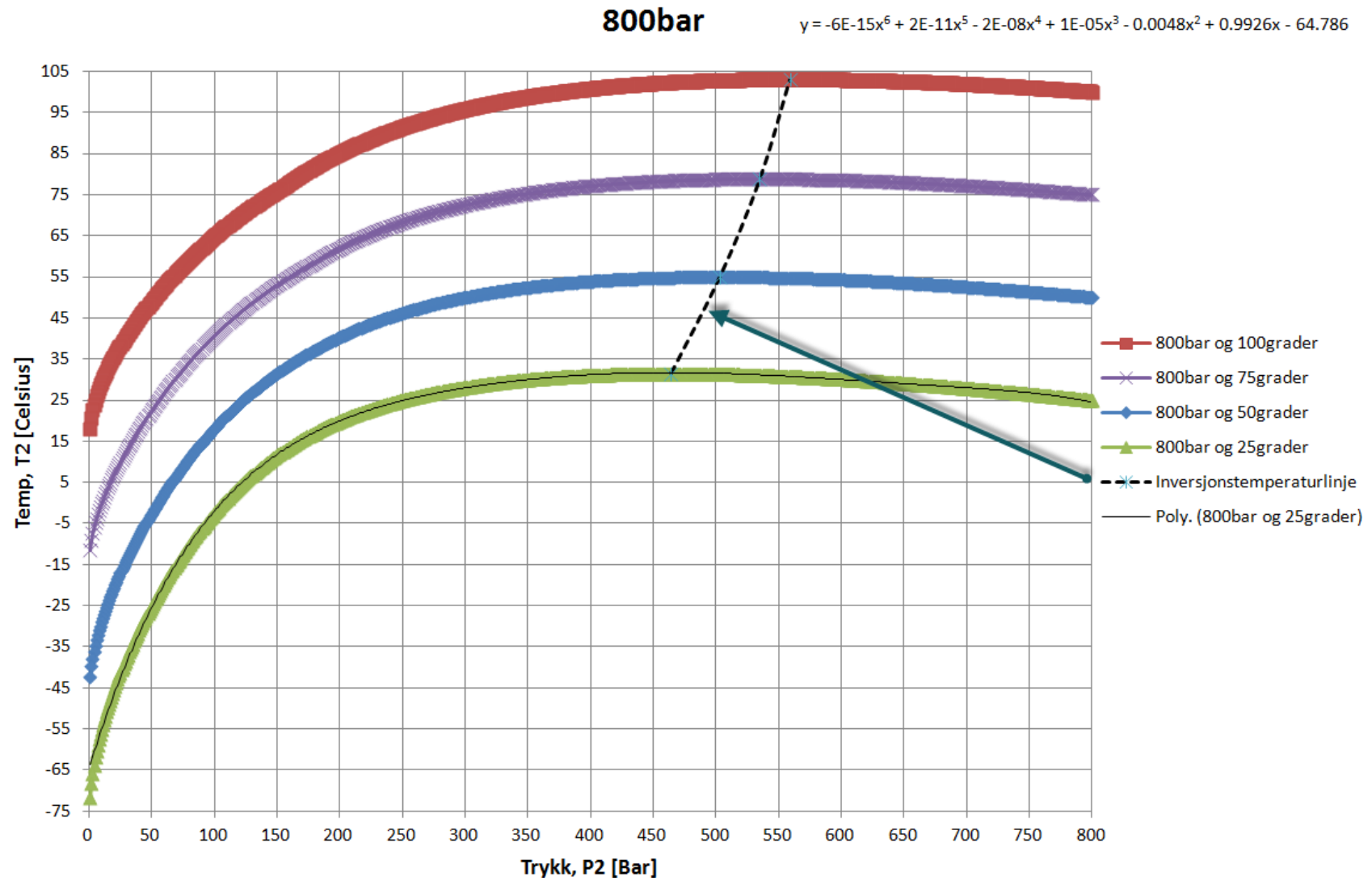
Fra ligning (2.21) blir altså temperaturendringen:

$$dT = \mu_{JT} \cdot dP = 0,2588 \cdot (-70) \approx -18^\circ\text{C} \quad (2.27)$$

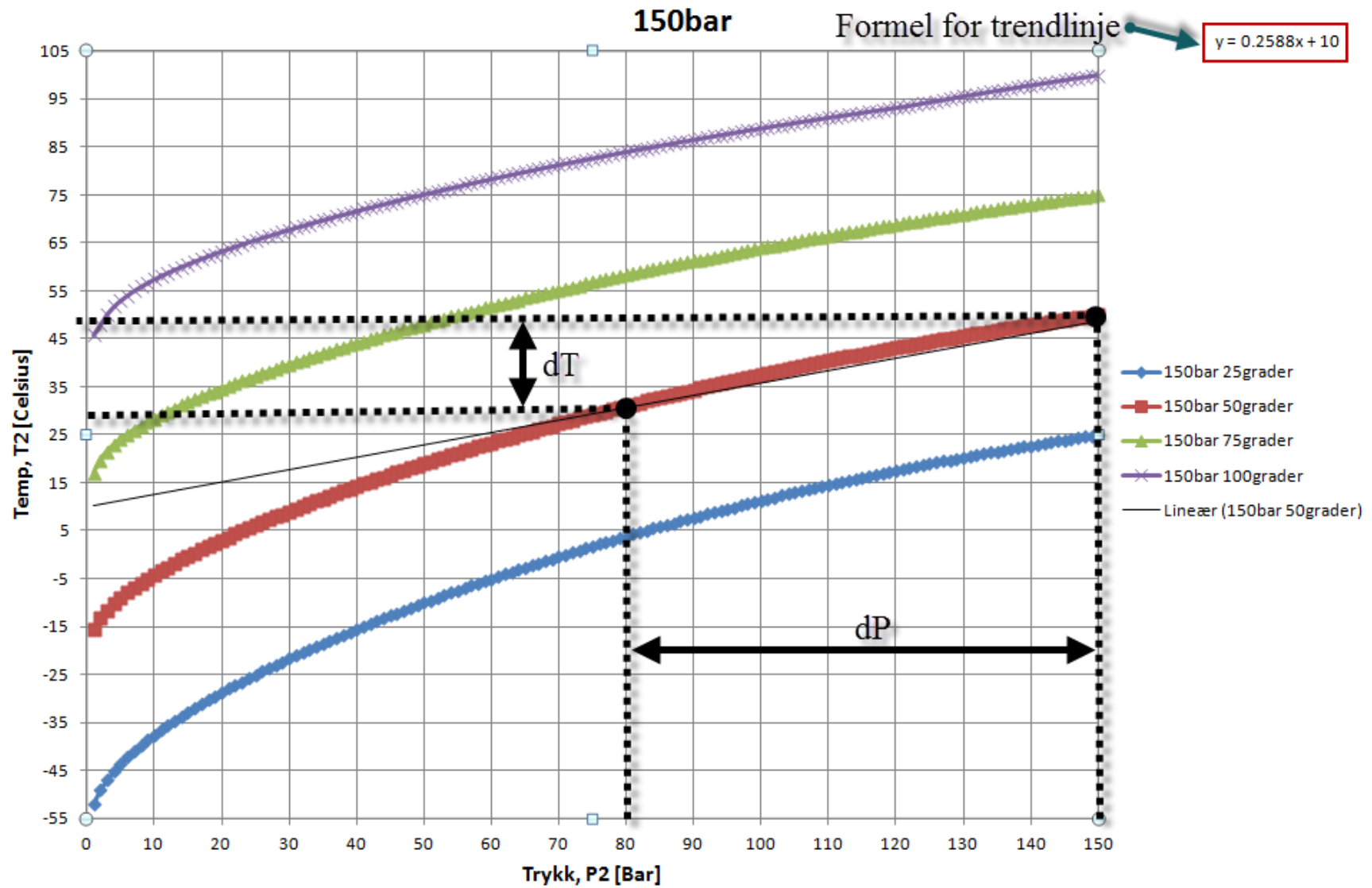
Fra tabelldata hvor Joule-Thomson koeffisienten er kalkulert med intervallstørrelse  $dP = -1\text{bar}$  (Vedlegg A1) gir  $dP = -70\text{bar}$  en temperaturreduksjon på  $-19,03^\circ\text{C}$  for  $P_1 = 150\text{bar}$  og  $T_1 = 50^\circ\text{C}$ .

### 2.3.9 Konklusjon

Joule-Thomson effekten kan føre til store temperaturendringer i rørledningen. Fluidet i rørledningen kan nå temperaturer godt under sjøvannstemperaturen. På grunn av konveksjon vil dermed sjøvannstemperaturen varme rørledningen igjen, og ikke motsatt. Det kan få konsekvenser for korrosjonsmonitoreringssystemet som skal installeres på toppen av rørledningen. Det stilles nemlig høye krav til posisjoneringen til transducerkasettene (se kapittel 4). De må stå omtrent  $90$  grader på rørledningen for å oppnå best mulig målesignal. Stålet utvider seg ved høye temperaturer og ved lave temperaturer vil rørledningen krympe.



Figur 14 Konstant entalpinjer ved  $P_1=800\text{bar}$



Figur 15 Konstant entalpilinjer ved P1=150bar

## 2.4 Organic coating

Det er hovedsakelig tre grunner til at *organic coating* blir brukt:

1. Dekorasjon. (Gi konstruksjonen farge)
2. For funksjonelle formål. Beskyttelse mot brann, varmeisolasjon, øke/reducere friksjon på gulv etc.
3. For å beskytte metallet mot korrosjon

Karbonstål er et metall som er veldig mye brukt. Det er billig, men er utsatt for korrosjon når stålet er i et oksygenrikt- og fuktig miljø. Det er derfor viktig å benytte *organic coating* for å beskytte stålet mot korrosjon. *Organic coating* reduserer korrosjonsrate på tre måter:

1. Malingen fungerer som en barriere og reduserer tilgangen til vann, oksygen og ionetransport til overflaten av metallet.
2. Ved å fungere som et reservoar for antikorrosive pigmenter (eksempelvis ved å inneholde metalliske sink-partikler som tilbyr katodisk beskyttelse til metallet).
3. Skape et miljø hvor elektrokjemiske reaksjoner er trege.

### 2.4.1 Hvordan velge et godt beskyttelsessystem

Det kan være vanskelig å velge et perfekt beskyttelsessystem da det er mange faktorer involvert i prosedyren. Med dette menes at *coatingen* skal vare ut levetiden. Dersom *coatingen* krever vedlikehold etter at konstruksjonen er installert kan høye kostnader påløpe. Eksempelvis koster det 500 kr/m<sup>2</sup> å male en konstruksjon på verftet, mens offshore er prisen seksdoblet (3000kr/m<sup>2</sup>). Levetiden til beskyttelsessystemet er derfor en viktig faktor.

Industrien har utviklet standarder og retningslinjer for å gjøre det lettere å velge et beskyttelsessystem. Eksempler på dette er:

- ISO 12944
- NORSOK M-501

For å velge *coating* må først følgende fire punkter kartlegges:

- Bestemme hvilket material som skal bli brukt (form og størrelse)
- Klassifisere miljøet (korrosivitetsnivå)
- Holdbarhet/levetid (målt i antall år)
- Valg av forbehandling (*pre-treatment*)

Videre kan retningslinjer beskrevet i en av de to standardene listet ovenfor benyttes til å avgjøre hvilken type coating som passer best for en gitt konstruksjon i et gitt tilfelle. (Knudsen, 2010)

### 2.4.2 Cathodic disbonding

*Cathodic disbonding* er en prosess hvor *coatingen* begynner å få svekket vedheft i katodisk beskyttede områder, f.eks. for karbonstål i sjøvann som er beskyttet med en kombinasjon av *organic coating* og offeranoder. Grunnen til at vedheftet svekkes er på grunn av det oppstår høy pH mellom stålet og *coatingen*. Høy pH skyldes at stålet er beskyttet av en katode. Oksygenreduksjonen vil frigi  $\text{OH}^-$ -ioner som vil øke pH-verdien i sjøvannet. (Knudsen, 2010)

## 2.5 Galvanisk korrosjon

Galvanisk korrosjon vil foregå når to ulike material (som har ulikt elektrisk potensial) er koblet sammen. Det minst edle metallet vil fungere som anode og derfor korrodere.

Elektrolytisk kontakt er en forutsetning for at dette skal skje. (Bardal, 2001) Den galvaniske serien er gitt i Vedlegg F, Figur 3 hvor det edleste metallet ligger øverst, og det minst edle metallet ligger i bunn.

### 2.5.1 Katodisk beskyttelse

Materialer som karbonstål og aluminium kan beskyttes mot korrosjon i sjøvann ved å tilføre en ytre strøm. Materialenes elektropotensial blir dermed tvunget ned i det immune området som anvist i Pourbaix diagram i Vedlegg F, Figur 4. Dette kalles katodisk beskyttelse og kan bli gjort på to måter:

- 1) Offeranoder
- 2) Påtrykt spenning

(Johnsen, 2011)

Katodisk beskyttelse med offeranoder er basert på prinsippet om galvanisk korrosjon. I praksis betyr det at et mindre edelt material blir koblet sammen med strukturen som skal beskyttes mot korrosjon. For å velge material for en konstruksjon er det viktig å ta hensyn til den galvaniske spenningsrekken, denne benyttes også i valget av anoder. Spenningsrekken er angitt i Vedlegg F, Figur 3. Strukturer på havbunnen kjører ofte en kombinasjon av katodisk

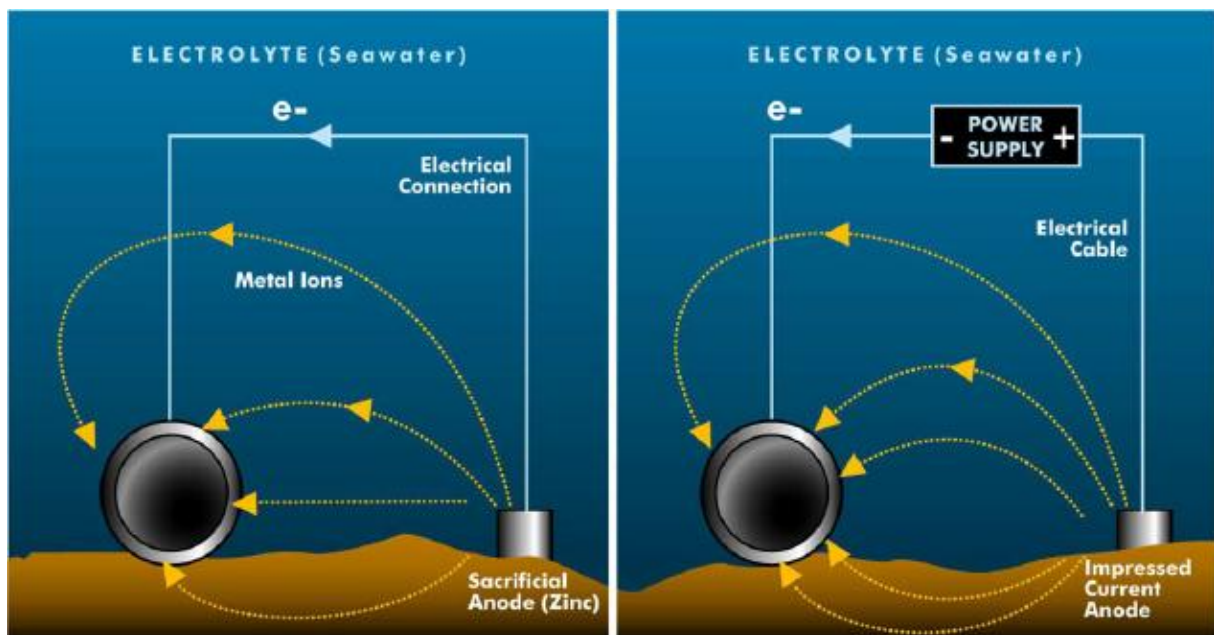
beskyttelse og *coating*. Uten katodisk beskyttelse og et *coatingsystem* vil følgende reaksjoner oppstå:

Anodisk reaksjon:  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$  (Oppløsning av jern)

Katodisk reaksjoner:  $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$  (Oksygenreduksjon)

$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g})$  (Hydrogenutvikling)

Hydrogenutvikling og oksygenreduksjon er de mest vanlige reduksjonsreaksjonene. (Johnsen, 2011)



**Figur 16 - En skjematisk prinsipp av katodisk beskyttelse a) Offeranoder og b) Påtrykt spenning (Johnsen, 2011)**

I Pourbaix diagrammet i Vedlegg F, Figur 4, vises forholdet mellom elektropotensial og pH for stål. Punkt 1 og 2 illustrerer hvor i Pourbaix-diagrammet potensialet befinner seg når stålet er nedsenket i vann for henholdsvis uten og med katodisk beskyttelse. pH i sjøvann er ligger på rundt 8,0 og stål har et elektropotensial fra -550 til -600 mV vs. SCE i sjøvann. Ved bruk av katodisk beskyttelse vil elektropotensialet til metallet reduseres og dermed tvinges ned i det immune området som henvist på figuren. Prinsippet kan også forklares via et Evans diagram som viser forholdet mellom elektropotensial (E) og strøm (I). I Vedlegg F, Figur 1 er stålet satt i sjøvann uten noen form for katodisk beskyttelse. Punkt A er skjæringspunktet mellom korrosjonspotensialet  $E_{corr}$  og korrosjonsstrømmen  $I_{corr}$  og beskriver korrosjonssituasjonen for stål nedsenket i sjøvann uten katodisk beskyttelse. Vedlegg F, Figur

2 viser situasjonen når stålet er nedsenket i vann og med katodisk beskyttelse. Forskjellen ligger i at det er tilsatt en katodisk strøm  $I_p$  som reduserer potensialet til stålet. Stålet vil nå være katodisk beskyttet og dermed vil korrosjonsreaksjonen avta. (Johnsen, 2011)

Et godt eksempel på galvanisk korrosjon ble observert under forsøket som presenteres i kapittel 3.1. Hensikten med forsøket var å observere diffusjon av vann i plastmaterialer, men det ble samtidig observert et tilfelle av galvanisk korrosjon på skrueforbindelsene i gitterstrukturen, som vist i Figur 17. Gitterstrukturen er edlere enn skrueforbindelsen som holder gitteret på plass. *Mixed potential theory* fastslår:

1. At den totale korrosjonsreaksjonen kan deles inn i to eller flere oksidasjons- og reduksjonsreaksjoner.
2. Den totale netto akkumulasjon av elektriske ladninger under en korrosjonsreaksjon er lik null. Dvs. at den totale oksidasjonsraten er lik den totale reduksjonsreaksjonen som vist i (2.28):

$$I_{korr} = \sum I_{oks} = \sum |I_{red}|, \text{ hvor } I = i \cdot A \quad (2.28)$$

Videre tituleres gitterstrukturen *metall M*, og skrueforbindelsen *metall N*. Følgende formel tar for seg korrosjonsraten for metallet som er minst edelt, i dette tilfellet skrueforbindelsen eller metall *N*:

$$i_{korr(M-N)} \cdot A_N = |i_{red}|_M \cdot A_M + |i_{red}|_N \cdot A_N \quad (2.29)$$

Ved å dividere (2.29) på  $A_N$  blir korrosjonsraten:

$$i_{korr(M-N)} = \frac{A_M}{A_N} \cdot |i_{red}|_M + |i_{red}|_N \quad (2.30)$$

Det kommer helt klart frem i ligning (2.30) at metall *N* er i stor fare for å gjennomgå korrosjon ved høy rate hvis overflatearealet til det edle metallet (metall *M*) er stort relativt til det uedle metallet (metall *N*). (Nisancioglu, 2012)



Figur 17 - Plastprøver nedsenket i vann

## CP-beskyttelse ved bruk av anoder

For å beskytte strukturen mot korrosjon ut levetiden anses det som en nødvendighet å benytte offeranoder i tillegg til et *coatingsystem*. Det finnes ulike standardiserte metoder for å kalkulere nødvendig anodemengde for en konstruksjon, i denne oppgaven er det tatt utgangspunkt i DNV RP-B401. En hensiktsmessig måte å starte denne prosessen er å sette opp en designbasis. Tabell 3 nedenfor er eksempel på hvordan en slik tabell kan se ut.

### 2.5.2 Designbasis

Tabell 3 Designbasis, aktuelle parametere

| Parameter  |  |
|--|--|
| Strømtetthet: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Start</li> <li>• Middel</li> <li>• Slutt</li> </ul> | Anoderesistans, $R_a$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• Start</li> <li>• Slutt</li> </ul> |
| Type <i>coating</i>  | Anodematerial  |
| Beleggnedbrytning <ul style="list-style-type: none"> <li>• Slutt</li> <li>• Middel</li> </ul>              | Anode type   |
| Beskyttelsespotensial  | Anodepotensial   |
| Sjøvannstemperatur   | Utnyttelsesfaktor, $U$   |
| Restivitet sjøvann   | Anodekapasitet, $C$  |
| Havdybde   | Anodevekt  |
| Saltinnhold ( <i>salinity</i> )  | Levetid  |

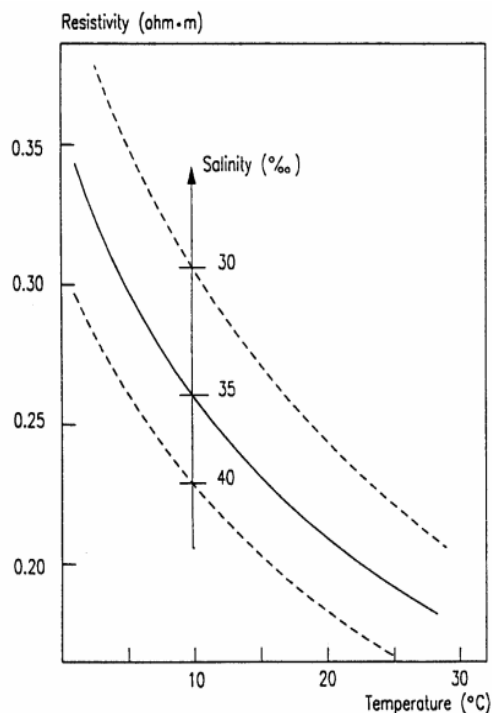


Ved å definere sjøvannstemperatur og havdybde kan strømtettheten hentes ut fra Table 10-1, Annex A(DNV RP-B401). I kapittel 2.4 ble det vist hvordan *Coatingsystem* velges. I DNV RP-B401 differensieres *coatingsystem* i tre grupper, kategori for systemet føres inn i designbasisen. Type *Coatingsystem* bestemmer logisk nok hvilke parametere som benyttes i kalkulasjonen av beleggedbrytningsfaktorene. Restiviteten i sjøvann som funksjon av temperatur og saltinnhold (*salinity*) leses av i Figur 19(DNV RP-B401). Anbefalt beskyttelsespotensial for karbonstål og lavlegert stål er oppgitt i kapittel 5.4.1. (DNV RP-B401). Når anodematerial og elektrolytt er kjent kan anodekapasitet, anodepotensial og utnyttelsesfaktor plukkes ut fra Table 10-6 og 10-8, Annex A(DNV RP-B401). Leverandør av anoder vil selvsagt også kunne oppgi denne informasjonen, verdien fra DNV anses for å være konservative. Som beskrevet i 2.5 må valgt anodematerial være mindre edelt enn materialet til konstruksjonen som skal beskyttes.



**Figur 18 Anodetyper, *Stand off*, *Flush mounted* og *bracelet* (Johnsen, 2011)**

For å kalkulere anoderesistans må det først velges anodetype, tre ulike anodetyper er illustrert i Figur 18. Hver anodetype har anbefalte beregningsmetoder, disse finnes i Table 10-7 (DNV RP-B401).



**Figur 19 Restivitet som funksjon av temperatur og saltinnhold (figur 10-1, annex A(DNV RP-B401))**

## 2.6 Beregning av anodemasse:

Etter designbasis er definert kan nødvendig anodemasse for konstruksjonen beregnes. I dette delkapittelet vil ligninger og korte forklaringer til de ulike parameterne presenteres.

Kalkulasjon utføres i ved hjelp av Vedlegg A5 og presenteres i kapittel 4.8 etter at aktuell konstruksjon er presentert.

### 2.6.1 Beleggnedbrytningsfaktor:

**Tabell 4 Parametere for kalkulasjon av beleggnedbrytningsfaktor**

| Parameter | Benevning | Beskrivelse  |
|-----------|-----------|--|
| $F_{cbI}$ | [%]       | Beleggnedbrytningsfaktor, Start                    |
| $F_{cbA}$ | [%]       | Beleggnedbrytningsfaktor, Middel                   |
| $F_{cbF}$ | [%]       | Beleggnedbrytningsfaktor, Slutt                    |
| $a$       | [–]       | Konstant, funksjon av dybde og type <i>coating</i> |
| $b$       | [–]       | Konstant, funksjon av dybde og type <i>coating</i> |
| $t_I$     | [år]      | Tid, Start   |

|       |      |             |
|-------|------|-------------|
| $t_A$ | [år] | Tid, Middel |
| $t_F$ | [år] | Tid, Slutt  |

Beleggnedbrytningsfaktoren beskriver en antatt reduksjon av katodisk strømtetthet som følge av det elektrisk isolerende malingsbelegget reduseres med tiden. Hvis  $F_c = 0$  er altså *coatingen* 100% elektrisk isolerende, i et slikt tilfelle ville katodisk strømtetthet også være lik null. Dersom  $F_c = 1$  har *coatingen* ingen funksjon, altså stiller den på lik linje med ikke *coatede* overflater. Parametere involvert i kalkulasjonen er beskrevet i Tabell 4 og kalkulasjonen av beleggnedbrytningsfaktoren utføres på følgende måte:

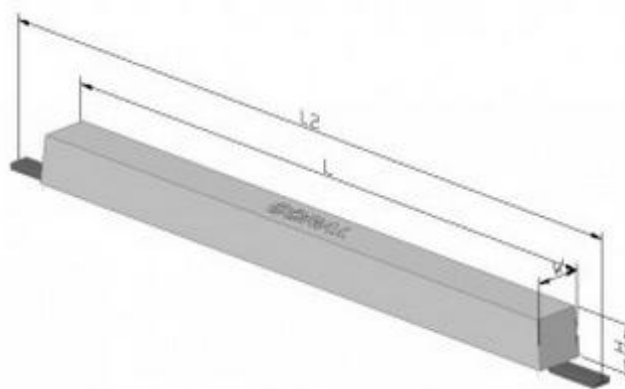
$$F_{cbI} = a + b \cdot t_I \quad (2.31)$$

$$F_{cbA} = a + b \cdot t_A \quad (2.32)$$

$$F_{cbF} = a + b \cdot t_F \quad (2.33)$$

### 2.6.2 Anodeareal:

For å kalkulere anodemotstanden må anodearealet være kjent. Det er kun arealet som er eksponert mot elektrolytt som er av interesse. Antar at festeørene, illustrert i Figur 20, sørger for klaring mellom anoden og konstruksjonen slik at også arealet på undersiden medregnes.



Figur 20 - Skisse av anode (Skarpenord, 2014)

Arealet av anoden som er i kontakt med elektrolytten blir derfor:

$$A = 2 \cdot H \cdot W + 2 \cdot H \cdot L + 2 \cdot W \cdot L, [\text{m}^2] \quad (2.34)$$

**Hvor:**

$H$ ,  $W$  og  $L$  er vist i Figur 20.

**2.6.3 Drivende spenning:****Tabell 5 Parametere for kalkulasjon av drivende spenning**

| Parameter | Benevning | Beskrivelse           |
|-----------|-----------|-----------------------|
| $U_d$     | [V]       | Drivende spenning     |
| $E_p$     | [mV]      | Beskyttelsespotensial |
| $E_a$     | [mV]      | Anodepotensial        |

For å kalkulere anodestrømmen må drivende spenning være kjent, den drivende spenningen er ganske så enkelt differansen mellom beskyttelsespotensialet og anodepotensialet. Beskrivelse av parametere benyttet i (2.35) er oppgitt i Tabell 5.

$$U_d = \frac{E_p - E_a}{1000} \quad (2.35)$$

**2.6.4 Anodemotstand:****Tabell 6 Parametere for kalkulasjon av anodemotstand**

| Parameter | Benevning            | Beskrivelse                       |
|-----------|----------------------|-----------------------------------|
| $R_{aI}$  | [ $\Omega$ ]         | Anodemotstand, Start              |
| $R_{aF}$  | [ $\Omega$ ]         | Anodemotstand, slutt              |
| $\rho$    | [ $\Omega \cdot m$ ] | Restivitet i elektrolytt(sjøvann) |

For å beregne anoderesistansen må, som tidligere nevnt, anodetype først bestemmes. I dette eksempelet anses det som mest praktisk å benytte *Short flush mounted* anoder da det er denne anodetypen som benyttes i konstruksjonen som presenteres senere i rapporten. Beskrivelse av parametere benyttet i kalkulasjonen er oppgitt i Tabell 6 og anoderesistansen kalkuleres på følgende måte:

$$R_{aI} = \frac{0,315 \cdot \rho}{\sqrt{A}} \quad (2.36)$$

$$R_{aF} = R_{aI} \cdot 1,5 \quad (2.37)$$

### 2.6.5 Anodestrøm:

Tabell 7 Parametere for kalkulasjon av anodestrøm

| Parameter | Benevning | Beskrivelse       |
|-----------|-----------|-------------------|
| $I_{al}$  | [A]       | Anodestrøm, Start |
| $I_{aF}$  | [A]       | Anodestrøm, Slutt |

Når anoderesistans og drivende spenning er kjent kan anodestrømmen enkelt kalkuleres ved hjelp av ohms lov. Beskrivelse av parametere benyttet i kalkulasjonen er oppgitt i Tabell 7 og anodestrømmen kalkuleres på følgende måte:

$$I_{al} = \frac{U_d}{R_{al}} \quad (2.38)$$

$$I_{aF} = \frac{U_d}{R_{aF}} \quad (2.39)$$

### 2.6.6 Strømbehov med coating:

Tabell 8 Parametere for kalkulasjon av Strømbehov

| Parameter | Benevning           | Beskrivelse  |
|-----------|---------------------|--|
| $I_{TI}$  | [A]                 | Strømbehov, Oppstart                                       |
| $I_{TA}$  | [A]                 | Strømbehov, Middel   |
| $I_{TF}$  | [A]                 | Strømbehov, Slutt  |
| $i_I$     | [A/m <sup>2</sup> ] | Strømtetthet, Start  |
| $i_A$     | [A/m <sup>2</sup> ] | Strømtetthet, Middel                                       |
| $i_F$     | [A/m <sup>2</sup> ] | Strømtetthet, Slutt  |
| $A_k$     | [m <sup>2</sup> ]   | Arealet av konstruksjon som er eksponert for elektrolytten |

For å sørge for at konstruksjonen er katodisk beskyttet gjennom levetiden må strømbehovet kalkuleres. Beskrivelse av parametere benyttet i kalkulasjonen er oppgitt i Tabell 8 og strømbehovet kalkuleres på følgende måte:

$$I_{TI} = A_k \cdot i_I \cdot F_{cbI} \quad (2.40)$$

$$I_{TA} = A_k \cdot i_A \cdot F_{cbA} \quad (2.41)$$

$$I_{TF} = A_k \cdot i_F \cdot F_{cbF} \quad (2.42)$$

For å beregne strømbehov uten *coating* benyttes samme ligningene, men leddet med beleggndbrytningsfaktor fjernes, eller settes til  $F_c = 1$ .

### 2.6.7 Antall anoder:

Tabell 9 Parametere for kalkulasjon av antall anoder

| Parameter | Benevning    | Beskrivelse                               |
|-----------|--------------|---|
| $N_I$     | [–]          | Antall anoder basert på startbetingelser  |
| $N_F$     | [–]          | Antall anoder basert på sluttbetingelser  |
| $N_T$     | [–]          | Antall anoder basert på middelbetingelser |
| $M_{TA}$  | [kg]         | Anodemasse                                |
| $t$       | [år]         | Design levetid                            |
| $U$       | [%]          | Utnyttelsesfaktor                         |
| $C$       | [Ah/kg]      | Anodekapasitet                            |
| $m_a$     | [kg / anode] | Anodevekt                                 |

Tilslutt er det endelig tid for å kalkulere antall anoder konstruksjonen trenger for å være katodisk beskyttet gjennom levetiden. Nødvendig antall anoder kalkuleres for startbetingelser, sluttbetingelser og middelbetingelser. Antall anoder velges ut ifra hvilken av disse tre kalkulasjonene som gir høyest antall anoder, som vist i (2.43). Beskrivelse av parametere benyttet i kalkulasjonene er oppgitt i Tabell 9 og anodekalkulasjonene utføres på følgende måte:

$$N = \text{Max}(N_I, N_F, N_T) \quad (2.43)$$

$$N_I = \frac{I_{TI}}{I_{al}} \quad (2.44)$$

$$N_F = \frac{I_{TF}}{I_{aF}} \quad (2.45)$$

For å beregne nødvendig antall anoder basert på middelbetingelser må først anodemassen  $M_{TA}$  beregnes. Denne baseres på middel strømbehov,  $I_{TA}$ .

$$M_{TA} = \frac{I_{TA} \cdot t \cdot 8760}{U \cdot C} \quad (2.46)$$

Når anodemassen er kjent kan nødvendig antall anoder basert på middelbetingelser kalkuleres:

$$N_T = \frac{M_{TA}}{m_a} \quad (2.47)$$

## 3 Eksperimentelt arbeid/forsøk

### 3.1 Absorpsjon

Før forsøket kunne starte måtte det redegjøres for mulige konsekvenser og sannsynligheten for de inntreffer. Denne risikovurderingen ble gjort sammen med labansvarlig Roger Overå. Det ble konkludert at en vannfylt container som tåler 200 bar ikke har noen nevneverdige konsekvenser. Det ble benyttet nødvendig verneutstyr gjennom heller forsøket.

Risikovurderingen ligger i Vedlegg H.

#### 3.1.1 Sammendrag

I samarbeid med Sensorlink ble det bestemt å teste følgende material for å bestemme vannabsorpsjon: PEEK (Polyetheretherketone), PUR (Polyuretan) og POM (Polyoksy-metylen). Det ble brukt en trykkbeholder for å simulere 200 bar og et varmeskap som kunne holde konstant temperatur. Det var ønskelig å teste hvilke effekter temperatur og trykk hadde på de ulike materialene. Det ble tester med totalt fire ulike testparametere (se oppsett og prosedyre).

PEEK (Polyetheretherketone) var det materialet som absorberte minst vann. PUR (Polyuretan) absorberte mest, mens POM (Polyoksy-metylen) lå et sted i mellom. Effekten av temperaturendringer (fra 28 grader til 80 grader) økte diffusjonsraten betraktelig for alle material. Trykkforskjellen hadde derimot veldig lite å si. Høyt trykk gav høyere diffusjonsrate, men effekten var ikke i nærheten sammenlignet med temperaturen.

#### 3.1.2 Introduksjon

Samarbeidspartner Sensorlink AS ytret interesse for å studere diffusjon av vann i ulike plast/polymermaterialer. Årsaken til dette er at de ønsker å støpe inn elektroniske komponenter i plasten, disse vil kunne ta skade av vann. Plastmaterialet beregnes for bruk i havdyp opp til 3000m og utsettes derfor for høyt trykk. I tillegg kan konveksjon fra undervannsrørledning resultere i høye temperaturer. Motivasjonen for forsøket er derfor å studere hvordan trykk og temperaturforskjeller påvirker diffusjonsraten og metningspunktet for ulike plastmaterialer.



### 3.1.3 Teori

I dette forsøket er det brukt retningslinjer fra ISO 62:2008 - Bestemmelse av vannabsorpsjon.

Det er flere metoder presentert i standarden:

- Metode 1: Bestemmelse av mengde vann absorbert ved nedsenkning i vann som holder 23 grader celsius
- Metode 2: Bestemmelse av mengde vann absorbert ved nedsenkning i kokende vann
- Metode 3: Bestemmelse av vannløselig materie som går tapt ved nedsenkning i vann
- Metode 4: Bestemmelse av mengde vann absorbert ved eksponering av 50% relativ fuktighet

I samtaler med Trond Schjelderup i Bredero Shaw var det fordelaktig å ta utgangspunkt i metode 1. Metode 1 stemmer også best overens med forholdene nede på havbunnen. Derfor er også trykk tatt hensyn til i forsøket. For å sjekke om trykket og temperaturen hadde en direkte innvirkning på resultatet ble det også eksperimentert med høyere trykk og temperatur også.

### 3.1.4 Oppsett og prosedyre

#### Oppsett

Forsøket tar for seg vanninntrenging i noen plastmaterialer. I samarbeid med Sensorlink AS er det valgt Polyoxymethylen (POM), Polyetheretherketone (PEEK) og Polyuretan (PUR) (Vedlegg G). Ifølge ISO 62:2008 skal testobjektene ("Rod shaped specimens") ha en diameter som er mindre enn 26mm samt en lengde på 25mm (+/- 1mm). Det stilles krav til maskineringen av disse prøvelegemene, overflateruhet etc. Dette er presisert i ISO 2818:1994 (Plast - Tillaging av prøvelegemer ved maskinering). Astrup leverer materialene som støpte staver, det var derfor ikke behov for maskinering.

Som nevnt i kapittel 3.1.3 ble det eksperimentert med både høyt og lavt trykk samt høy og lav temperatur. Testene hadde følgende parameter:

- **Test 1:** Trykk: 200 bar, temperatur: 28 grader celsius
- **Test 2:** Trykk: atmosfærisk trykk, temperatur: 28 grader celsius
- **Test 3:** Trykk: 200 bar, temperatur: 80 grader celsius
- **Test 4:** Trykk: atmosfærisk trykk, temperatur: 80 grader celsius

Test 1 og 3 (200 bar) er utført med en trykkbeholder (container), mens test 2 og 4 i et beger med vann. Samtlige tester vil foregå i varmeskap for å kunne opprettholde konstant temperatur igjennom hele forsøket. Figur 29 viser en enkel skisse over laboppsettet.

### **Utstyr som er brukt til dette forsøket**

- Fermacks varmeskap med luftventilering (se Figur 21).
- Ruska trykkbeholder med kapasitet på 16000 psi (se Figur 23 og Figur 30) med tilhørende lokk med bolter (Figur 24)
- Quizix pumpe (Figur 22)
- Vekt med milligrams nøyaktighet (Figur 25)
- 12 stk. testobjektene av hvert material (POM, PEEK og PUR)

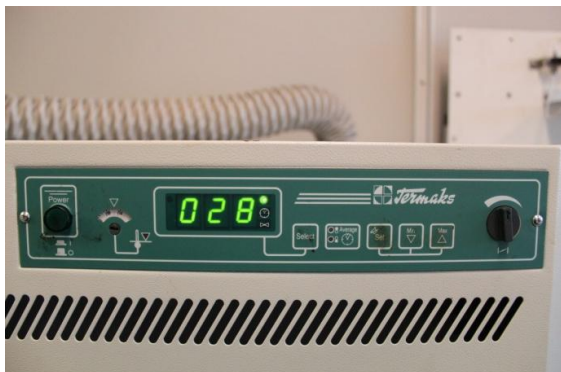
Stavene ble kuttet opp i lengder på 25mm hver (Figur 27). To av polyuretan-bitene er vist i Figur 26. Håkon og Terje på verkstedet ordnet oppkutting i tillegg til å reparere trykkbeholderen som ikke var tett. Prøveobjektene ble plassert på en gitterstruktur for å skille prøvene da det var presisert i ISO 62:2008 at prøveobjektene ikke skulle være i kontakt med hverandre (se Figur 28 og Figur 31). Alle testobjektene ble vasket for å fjerne synlige urenheter før oppstart av forsøket.

### **Prosedyre som beskrevet i standard utføres i fire steg:**

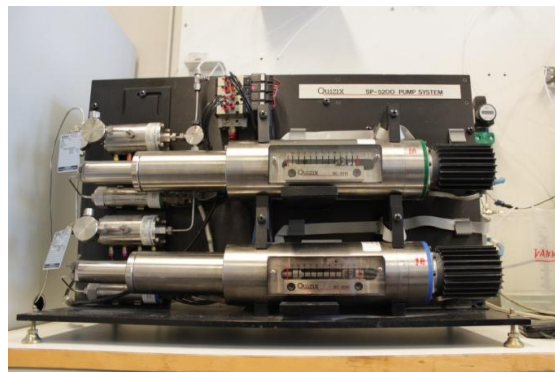
#### **Metode1: Nedsenkning i vann som holder 23 grader celsius**

1. For å sikre at testobjektene er helt tørre før forsøket starter, skal de plasseres i et varmeskap som holder en temperatur på 50 grader celsius (+-2 grader) i 24 timer. Deretter skal objektene kjøles ned til romtemperatur. Objektene veies til nærmeste 0,1 mg.
2. Objektene plasseres i en container (trykkbeholder) fylt med vann som holder 23 grader celsius (+- 1 grad), eller en annen temperatur interessentene har blitt enige om.
3. Etter de første 24 timene tas testobjektene ut av beholderen og veies til nærmeste 0,1 mg. Vanlig tidsskala mellom hver innveing (som også er brukt i forsøket): 24 t, 48 t, 96 t. Testobjektene skal tas ut fra vannet, veies, og plasseres tilbake i vannet i løpet av ett minutt.
4. Testobjektene settes tilbake i vannet.

Siden varmeskapet ikke hadde kapasitet til å holde en jevn temperatur lavere enn 28 grader celsius, har dette forsøket brukt nettopp 28 grader som laveste temperatur. For å sjekke effekten av høy temperatur har det også testobjektene blitt testet med 80 grader celsius.



**Figur 21 - Varmeskap**



**Figur 22 - Quizix SP-5200 pump system**



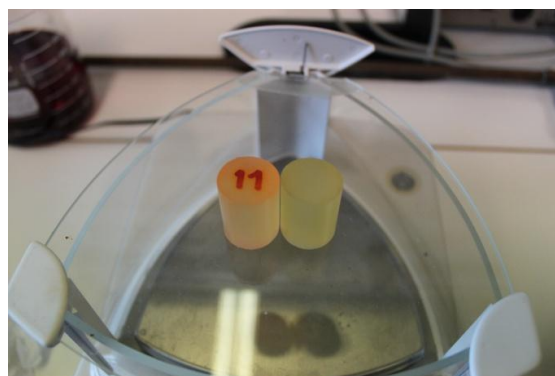
**Figur 23 - Trykkbeholder med bolteforbindelse**



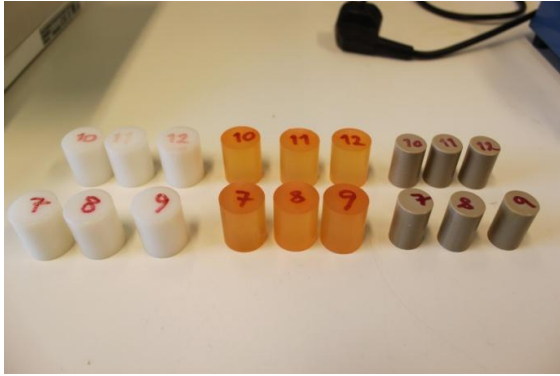
**Figur 24 - Fra innsiden av lokket til trykkbeholderen**



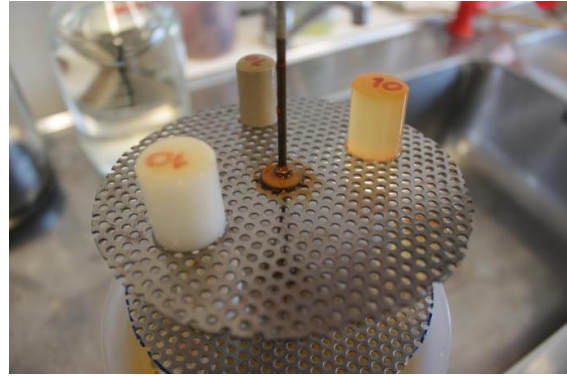
**Figur 25 - Veiing av polyuretan**



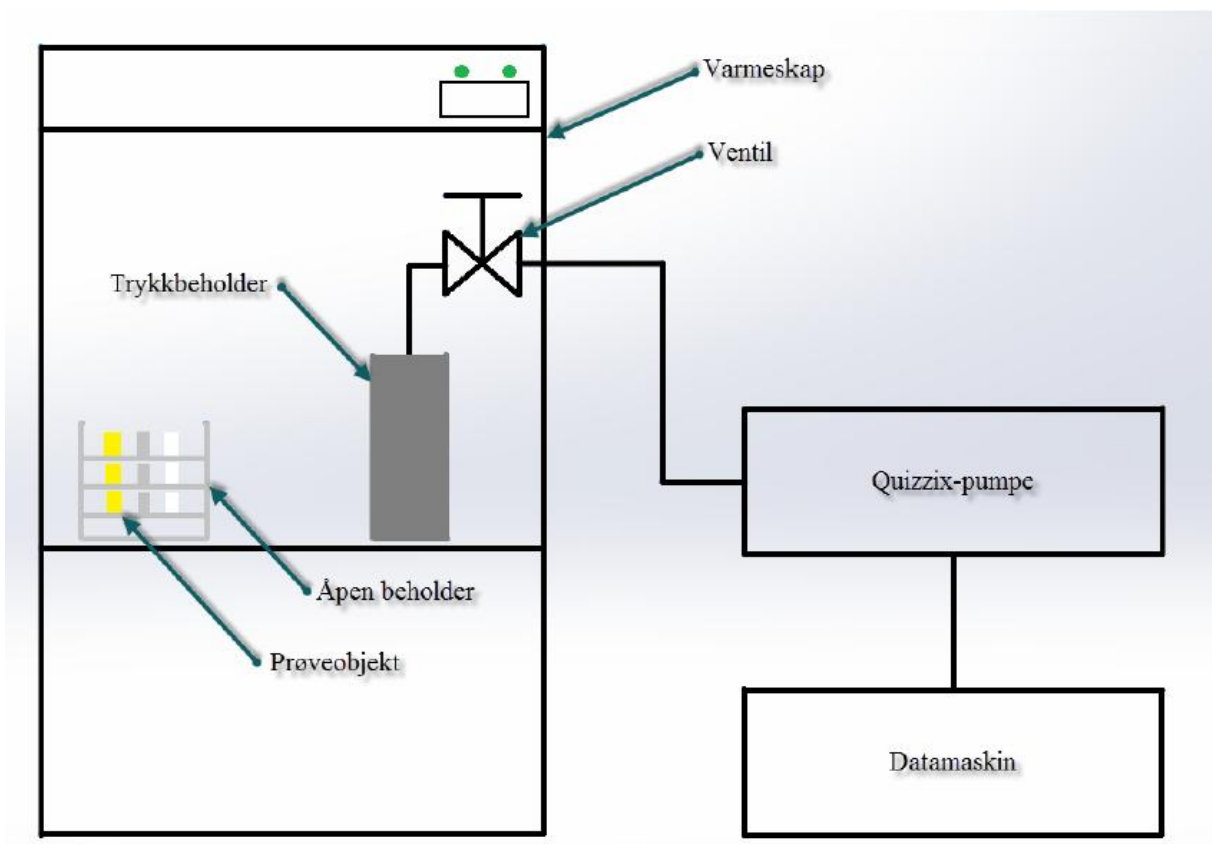
**Figur 26 - To biter av polyuretan**



Figur 27 - Testobjektene som var utsatt for romtemperatur (28 grader celsius)



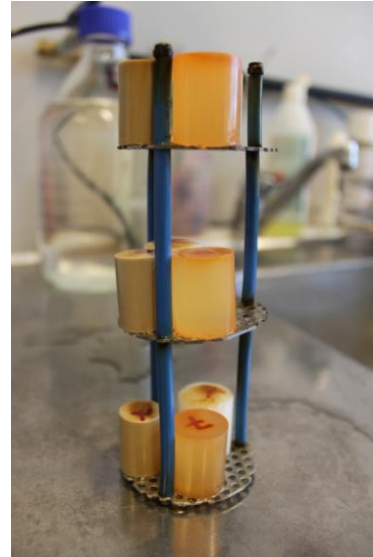
Figur 28 - Gitterstrukturen med prøveobjektene



Figur 29 - Skisse av absorpsjonsforsøket



**Figur 30 - Trykkbeholder lagt i varmeskapet**



**Figur 31 - Gitterstrukturen med tilhørende prøveobjekt som ble satt i trykkbeholdere**

### 3.1.5 Resultat

Absorpsjonsforsøket startet torsdag 24/4 og ble avsluttet onsdag 4/6. For hver gang ble testobjektene veid til nærmeste milligram og satt tilbake i beholderen igjen. Det ble samtidig notert ned hvor lenge prøvene hadde stått i vann og dermed også generert en tidsskala (som nevnt i kapittel 3.1.4). Dataene fra veiingen ble brukt til å kalkulere en prosentvis vektøkning for å kompensere for initial vektforskjell mellom testobjektene. Det er i utgangspunktet prosentvis endring i masse relativt til opprinnelig masse ved bruk av følgende formel:

$$c = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

hvor:

$c$  er prosentvis endring i masse

$m_1$  er opprinnelig masse til testobjekt

$m_2$  er masse av testobjekt etter nedsenkning i vann

Plottene tar for seg prosentvis vektøkning på y-aksen og tidsskalaen på x-aksen. Prosentvis vektøkning for POM, PEEK og PUR er vist i henholdsvis Figur 32, Figur 33 og Figur 34. Dataene fra Excel-arket, Vedlegg A3, har gitt en tydelig indikasjon på at det er polyuretan som absorberer mest vann. PEEK absorberer helt klart minst vann, mens POM ligger et sted i mellom de to andre materialene. Som forklart i kapittel 3.1.2 var det ønskelig å sjekke

effekten av trykk- og temperaturendringer. Ifølge resultatene påvirket ikke trykket forsøkene i noen stor grad. Temperaturen derimot hadde en betydelig innvirkning på resultatene.

### **Polyoxymethylen (POM)**

Figur 32 tar for seg prosentvis vektøkning som funksjon av tid for POM. Det kommer helt tydelig frem i grafen at temperaturen har en betydelig effekt på vektøkningen. I løpet av en periode på 19 dager (456 timer) har POM fått en prosentvis vektøkning på litt over 0,25% ved 28 grader (for både 200 bar og 1 atm). Til sammenligning for 80 grader celsius, har POM økt med 1,35 og 1,41 for henholdsvis 1 atm og 200 bar. Med andre ord over 1,1% prosentvis vektøkning kun som følge av snaut 50 graders temperaturøkning. POM med testparameterne 1 atm og 28 grader ble testet videre i totalt 41 dager. Da hadde den prosentvise vektøkningen nådd en verdi på 0,36%. Prosentvis vektøkning for POM er vist i Tabell 10.

**Tabell 10 Prosentvis vektøkning POM**

| <b>Prosentvis vektøkning Polyoxymethylen (POM)</b> |                   |                   |
|--|-------------------|-------------------|
| <b>Testforhold:</b>                                | <b>19 (dager)</b> | <b>41 (dager)</b> |
| 1 atm, 28 grader Celsius:                          | 0,257 %           | 0,364 %           |
| 200 bar, 28 grader Celsius:                        | 0,252 %           | N/A               |
| 1atm, 80 grader Celsius:                           | 1,346 %           | N/A               |
| 200 bar, 80 grader Celsius:                        | 1,410 %           | N/A               |

### **Polyether ether ketone (PEEK)**

Figur 33 viser prosentvis vektøkning som funksjon av tid for PEEK. I

Tabell 11 er det listet opp sluttverdien for testene som er gjort i forbindelse med forsøket. PEEK er det materialet som absorberer minst vann. I løpet av 41 dager (for 1 atm, 28 grader) har PEEK kun økt med en gjennomsnittlig prosentvis økning på 0,128%. I likhet med POM får også PEEK en kraftig vektøkning på grunn av høyere temperatur.

Tabell 11 Prosentvis vektøkning PEEK

| <b>Prosentvis vektøkning Polyether ether ketane(PEEK)</b> |                   |                   |
|---|-------------------|-------------------|
| <b>Testforhold:</b>                                       | <b>19 (dager)</b> | <b>41 (dager)</b> |
| 1 atm, 28 grader Celsius:                                 | 0,085 %           | 0,128 %           |
| 200 bar, 28 grader Celsius:                               | 0,095 %           | N/A               |
| 1 atm, 80 grader Celsius:                                 | 0,308 %           | N/A               |
| 200 bar, 80 grader Celsius:                               | 0,346 %           | N/A               |

### Polyurethane (PUR)

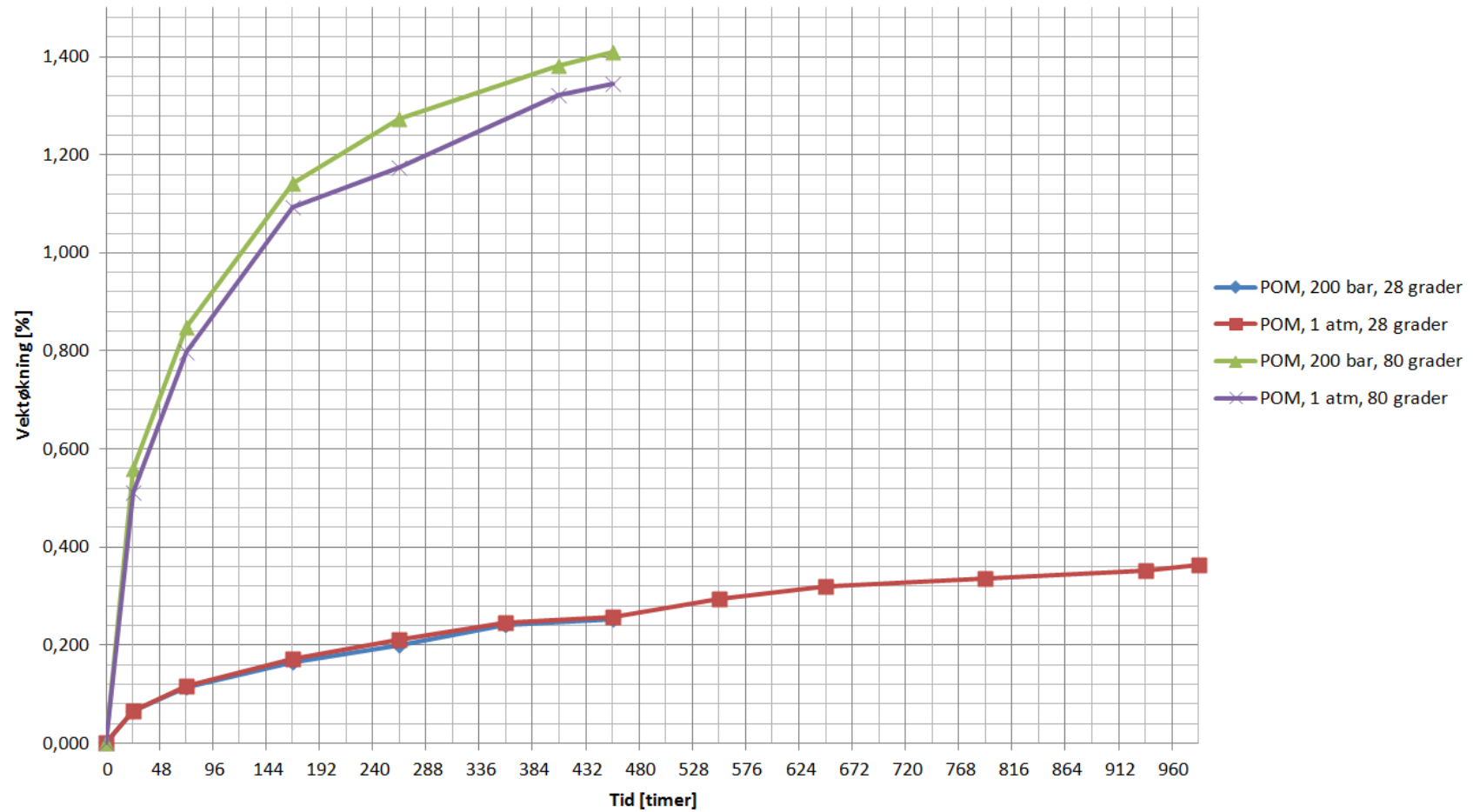
Figur 34 tar for seg prosentvis vektøkning som funksjon av tid for PUR. Grafen indikerer en bratt kurve i starten sammenlignet med de andre materialene. Også for PUR hadde temperaturen en stor effekt for vektøkningen. Sluttverdien mellom de ulike testene ble dog ikke veldig ulike siden PUR utsatt for høy temperatur ble mettet relativt fort. Metningspunktet (toppunktet) ble nådd etter bare noen få dager for testene som kjørte 80 grader celsius. Etter at metningspunktet var nådd, viser grafen en klar trend på vektreduksjon. For testen som tok for seg 28 grader celsius og en atmosfærisk trykk, tyder det på at metningspunktet ble nådd et sted mellom dag 38 og 41 på grunn av prosentvis vektreduksjon. Prosentvis vektøkning viser sluttverdiene for PUR.

Tabell 12 Prosentvis vektøkning PUR

| <b>Prosentvis vektøkning Polyurethane(PUR)</b> |                   |                   |
|--|-------------------|-------------------|
| <b>Testforhold:</b>                            | <b>19 (dager)</b> | <b>41 (dager)</b> |
| 1 atm, 28 grader Celsius:                      | 1,458 %           | 1,530 %           |
| 200 bar, 28 grader Celsius:                    | 1,510 %           | N/A               |
| 1 atm, 80 grader Celsius:                      | 1,767 %           | N/A               |
| 200 bar, 80 grader Celsius:                    | 2,081 %           | N/A               |

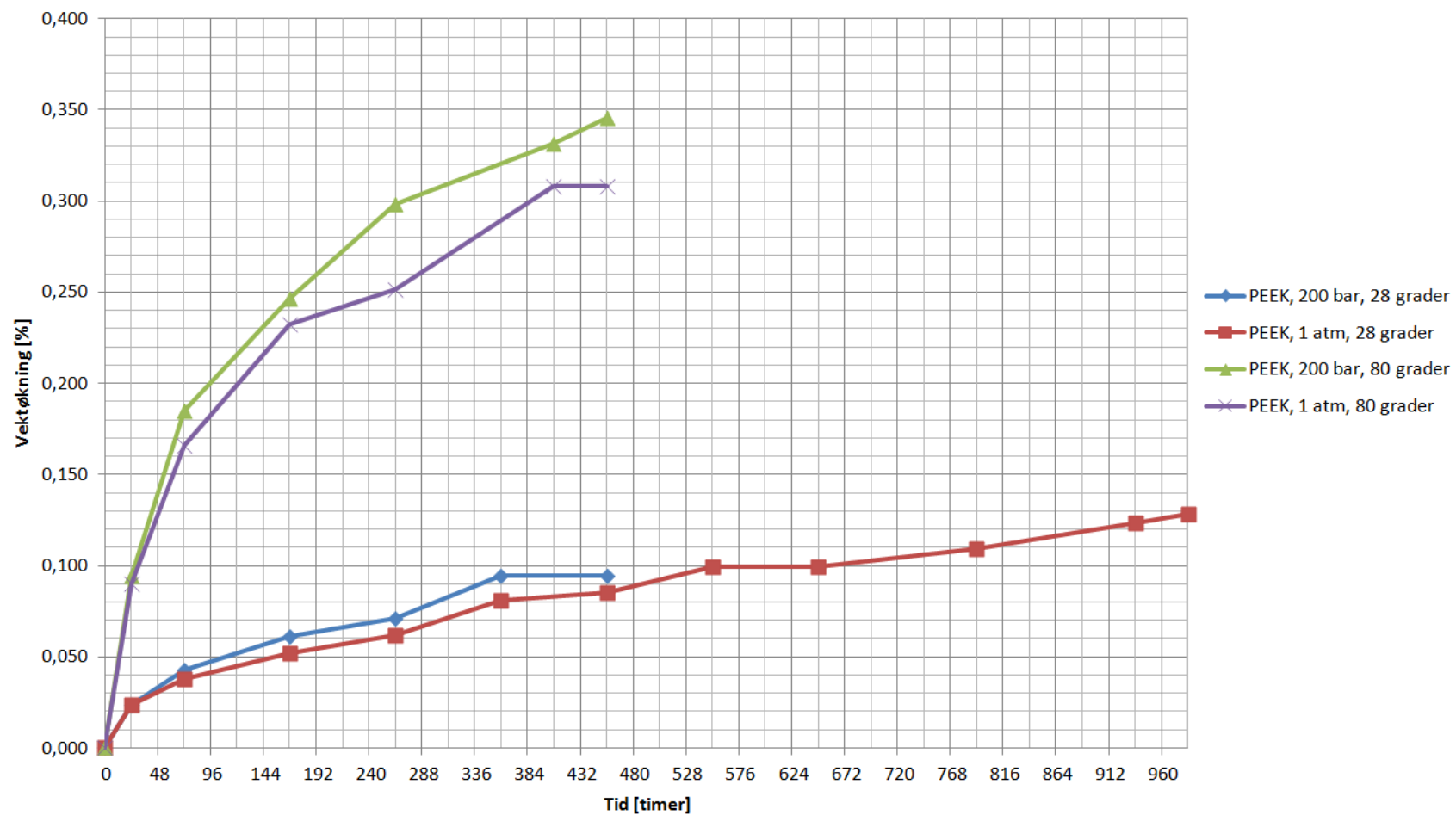


## Prosentvis vektøkning, POM



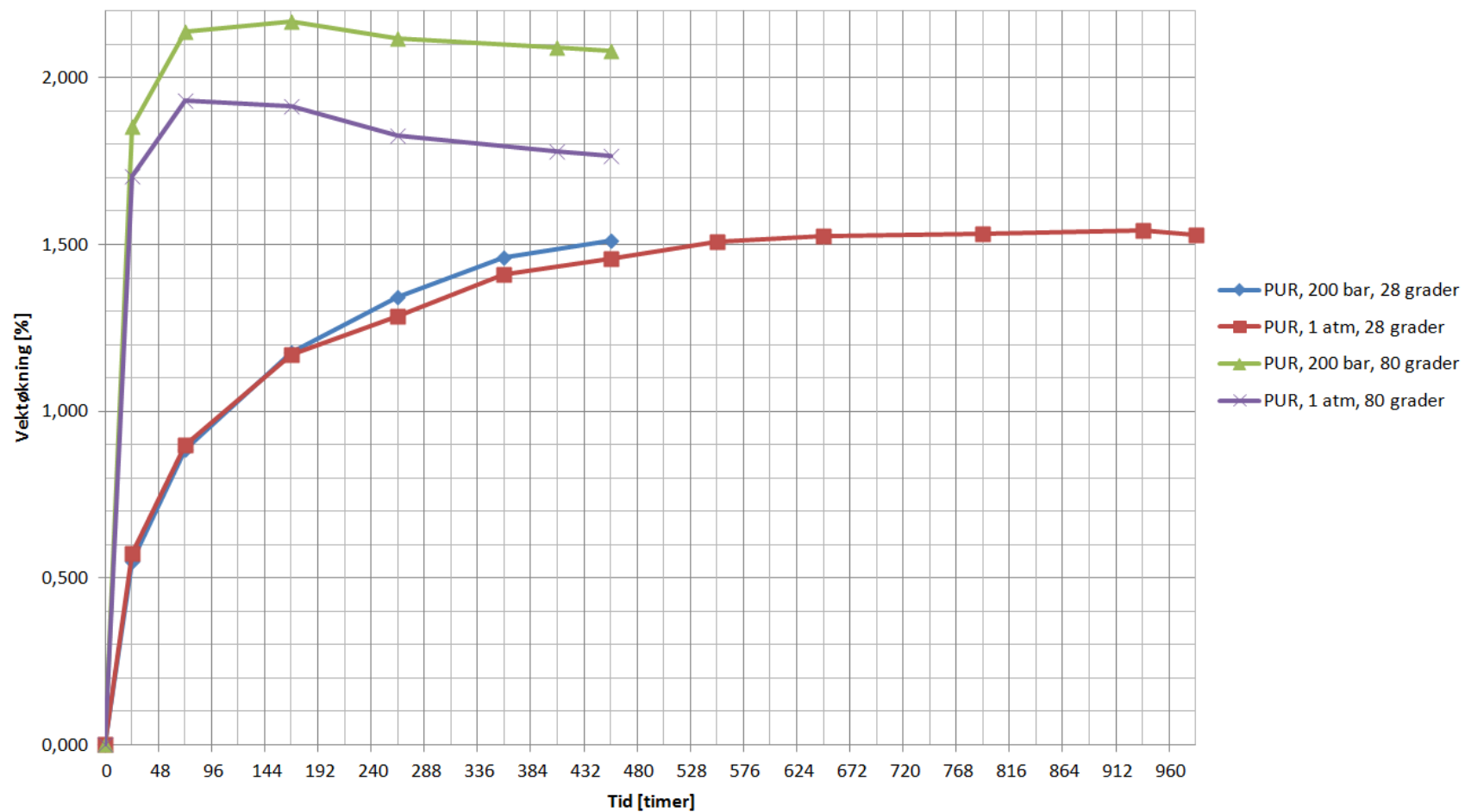
Figur 32 - Prosentvis vektøkning for POM

## Prosentvis vektøkning, PEEK



Figur 33 - Prosentvis vektøkning for PEEK

## Prosentvis vektøkning, PUR



Figur 34 - Prosentvis vektøkning for PUR

Astrup leverte, som nevnt tidligere, stavene som støpte staver. Stavene ble kuttet opp i like lengder, men hadde forskjellig diameter og tetthet (se Vedlegg G). Siden diameteren var ulik, ble også overflatearealet ulikt for hvert material. For å kompensere for ulikt overflateareal og tetthet ble resultatet normalisert. Måten det ble gjort på var å erstatte prosentvis vektøkning med vektøkning pr. arealenhet. Normaliseringen er vist i Figur 35. Stavene er sylinderformet slik at totalt overflateareal kan finnes ved å legge sammen arealet for to sirkler og en sylinder. Areal for en sirkel finnes ved følgende formel:

$$A_{sirkel} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (3.2)$$

Areal av en sylinder:

$$A_{syl} = \pi \cdot D \cdot h \quad (3.3)$$

Totalt overflateareal:

$$A_{tot} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} + \pi \cdot D \cdot h \quad (3.4)$$

Totalt overflateareal er oppgitt i Tabell 13.

**Tabell 13 Diameter, tetthet og overflateareal for testobjektene**

| Material | Diameter [mm] | Tetthet [kg/m <sup>3</sup> ] | Overflateareal [cm <sup>2</sup> ] |
|----------|---------------|------------------------------|-----------------------------------|
| PEEK     | 16            | 1310                         | 16,6                              |
| POM      | 22            | 1410                         | 24,9                              |
| PUR      | 20            | 1110                         | 22,0                              |

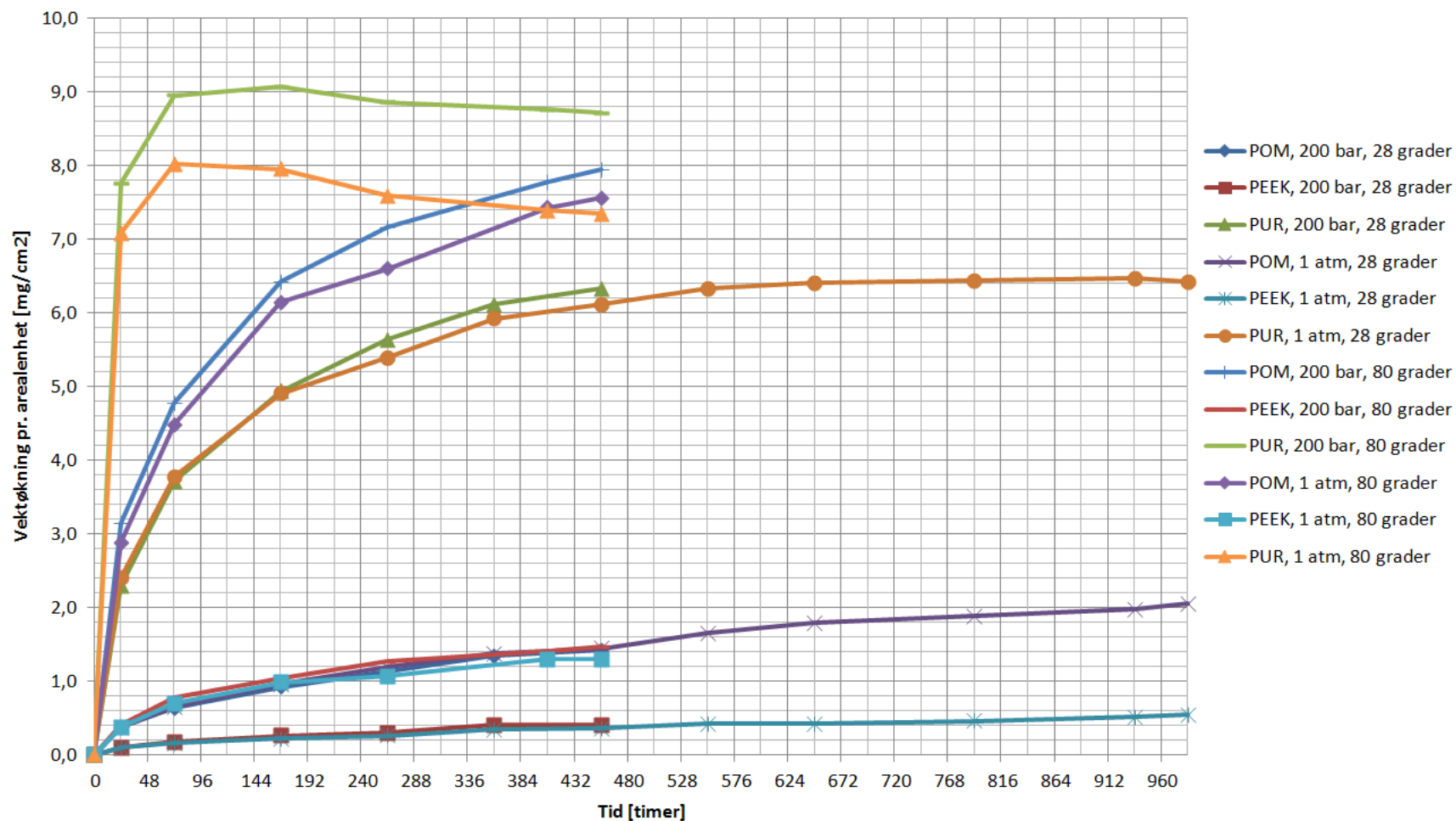
Sammenligne materialene. PUR har høyere peak-verdier, men mister trolig masse slik at vi får en vektreduksjon. PEEK absorberer minst vann.

I Tabell 14 er det tatt utgangspunkt i de første 19 dagene av forsøkene og viser sluttverdiene for normaliseringen.

Tabell 14 - Sluttverdier for normalisert data

| <b>Normalisering (Vektøkning pr. arealenhet [mg/cm<sup>2</sup>] for 19 dagers periode</b> |                        |                        |                        |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>Testforhold:</b>   | <b>POM</b>             | <b>PEEK</b>            | <b>PUR</b>             |
| 1 atm, 28 grader Celsius:   | 2,0 mg/cm <sup>2</sup> | 0,5 mg/cm <sup>2</sup> | 6,4 mg/cm <sup>2</sup> |
| 200 bar, 28 grader Celsius:   | 1,4 mg/cm <sup>2</sup> | 0,4 mg/cm <sup>2</sup> | 6,3 mg/cm <sup>2</sup> |
| 1 atm, 80 grader Celsius:   | 7,6 mg/cm <sup>2</sup> | 1,3 mg/cm <sup>2</sup> | 7,4 mg/cm <sup>2</sup> |
| 200 bar, 80 grader Celsius:   | 7,9 mg/cm <sup>2</sup> | 1,5 mg/cm <sup>2</sup> | 8,7 mg/cm <sup>2</sup> |

### Vektøkning pr. arealenhet, 28 og 80grader



Figur 35 - Vektøkning pr. arealenhet (Normalisert)

### 3.1.6 Diskusjon

I standard ISO 62:2008 står det spesifisert at det skal kalkuleres prosentvis vektøkning som funksjon av tid. Siden det er tre ulike materialer med både ulik diameter og tetthet ble det nødvendig å normalisere resultatene. Prosentvis vektøkning vil ikke gi et korrekt bilde over vektøkningen ved sammenligning av de ulike materialene. Sammenlignes materialene internt under ulike forhold vil prosentvis vektøkning være den mest korrekte metoden å bruke. Dette er fordi en slik tilnærming tar hensyn til de små initiale forskjellene mellom testobjektene som trolig er forårsaket av unøyaktighetene ved oppkutting av prøvene.

Normaliseringen tok for seg vektøkning per arealenheter som funksjon av tid. De initiale vektforskjellene mellom testobjektene vil ikke være mulig å ta høyde for i en slik normalisering. Vekten til testobjektene var derimot veldig like, slik at en kompensering for initiale vektforskjeller kan sees på som neglisjerbare. Fordelen med å ta utgangspunkt i vektøkning kontra prosentvis vektøkning er muligheten til å kompensere for tettheten til de ulike materialene.

Ut i fra plottene generert i Excel-arkene (Vedlegg A3) og i figurene representert under resultat tyder det på at trykket ikke hadde en stor betydning for diffusjonsraten til et material. Det ble en tilsynelatende liten vektøkning. Effekten av temperatur hadde derimot en større betydning for resultatet sammenlignet med trykket. Stigningstallene i figurene ble vesentlig større, noe som kan ha sammenheng med at plastmaterialene utvider seg i takt med temperaturøkningen. Dermed kan det antas at materialene vil absorbere mer vann.

Det tyder på at metningspunktet til testobjektene endrer seg ved å øke temperatur (se Figur 32, Figur 33 og Figur 34). Ved lav temperatur ser det ut til at metningspunktet vil være betraktelig lavere enn for høy temperatur. Resultatene ga indikasjon på at PUR nådde metningspunktet for både 28 og 80 grader, men det er kun en måling ved 28 grader som tyder det. Kurvene (i Figur 32 og Figur 33) gir tegn på en tydelig kumulativ reduksjon i diffusjonsrate og kan antas at metningspunktet vil være forskjellig fra lav til høy temperatur. For å bekrefte dette burde forsøket holdt på en stund til.

### 3.1.7 Feilkilder

Vekten som ble brukt til å veie testobjektene til nærmeste milligram, var ikke helt stabil i starten. Den hadde problem med å stille seg inn til en bestemt verdi. Det ble funnet ut av luftstrømmer forårsaket av ventilasjonsanlegget var hovedgrunnen til vekten stod å vipet

mellom verdier. Det ble derfor brukt en vekt som hadde vegger rundt i tillegg til et lokk for å hindre at luftstrømmene påvirket resultatet.

Det ble bruk vann fra springen i stedet for destillert vann. Standarden (ISO 62:2008) nevnte at alle forurensinger skulle unngås da dette kan ha innvirkning på resultatet. Det ble uheldigvis noen uventede forurensinger allikevel. Figur 28 og Figur 31 viser gitterstrukturene som ble brukt for på skille testobjektene da forsøket holdt på. Etter bare en uke ble det observert rust/korrosjonsprodukt i vannet og rundt bolteforbindelsen som følge av galvanisk korrosjon (se kapittel 2.5). Det kan ha fått innvirkning på resultatet da prøvene var mer eller mindre dekket av korrosjonsprodukt før de ble tatt opp av vannet for å veies.

Trykkbeholderen hadde et lokk med 10 boltehull og boltene måtte naturlig nok skrues ut hver gang prøvene skulle veies. Det ble brukt kobberpasta for å gjøre det lettere å skru boltene ned. Etter den første målingen ble det observert kobberpasta nedi vannet i beholderen.

Kombinasjonen av urent vann, korrosjonsprodukt og kobberpasta var ikke helt ideelt i forhold til standarden (ISO 62:2008).

Det skal nevnes at det ble en del oppstartsvansker under dette forsøket. Eksempelvis ble forsøket avbrutt på grunn av strømstans. Testobjektene måtte da inn i varmeskap igjen for å tørke. I tillegg var ikke trykkbeholderen tett etter at det ble observert en lekkasje etter bare 50 bar. Trykkbeholderen ble dermed modifisert ved hjelp av dreiebenk. Samtidig ble det brukt O-ringer i hver ende av trykkbeholderen. Da testobjektene ble utsatt for 80 grader og 200 bar måtte O-ringene skiftes ut for hver gang boltene ble skrudd opp. Dette hadde sammenheng med at O-ringene utvider seg ved høy temperatur slik at når boltene skrues opp vil det slite på O-ringene og samtidig ødelegge den.

### 3.1.8 Konklusjon

Resultatene er entydige. Feilkildene hadde ikke stor betydning for plastmaterialene sett i forhold til hverandre. Det var tydelig at høy temperatur påvirket diffusjonsraten betraktelig, men at trykket ikke hadde like stor betydning. Alle resultatene tyder på at metningspunktene for lav og høy temperatur er rett rundt hjørnet, men at det ikke er funnet en spesifikk verdi for det. For å få endelig bekreftelse på det burde prøveobjektene stått litt lengre.



## 3.2 Korrosjon

### 3.2.1 Sammendrag

Formålet med korrosjonsforsøket var å sjekke om Sensorlinks ultralydteknologi fungerte. Prøveobjektet (bit av et stålrør, type API 5L X52 grad) ble senket ned i en vannfylt beholder for å observere veggtykkelse som funksjon av tid. Det ble benyttet piezoelektriske transducere for å måle godstykkelsen.

Det ble generert et Excel-plot for alle rådataene slik at gjennomsnittlig korrosjonsrate kunne uttrykkes. Det var noen "utstikkere" representert i resultatet, som kan ha sammenheng med at tykkelsesalgoritmen ikke fungerte optimalt for de punktene. Alt i alt kan resultatene anses som gode og bekrefte at Sensorlinks ultralydteknologi fungerer.

### 3.2.2 Introduksjon

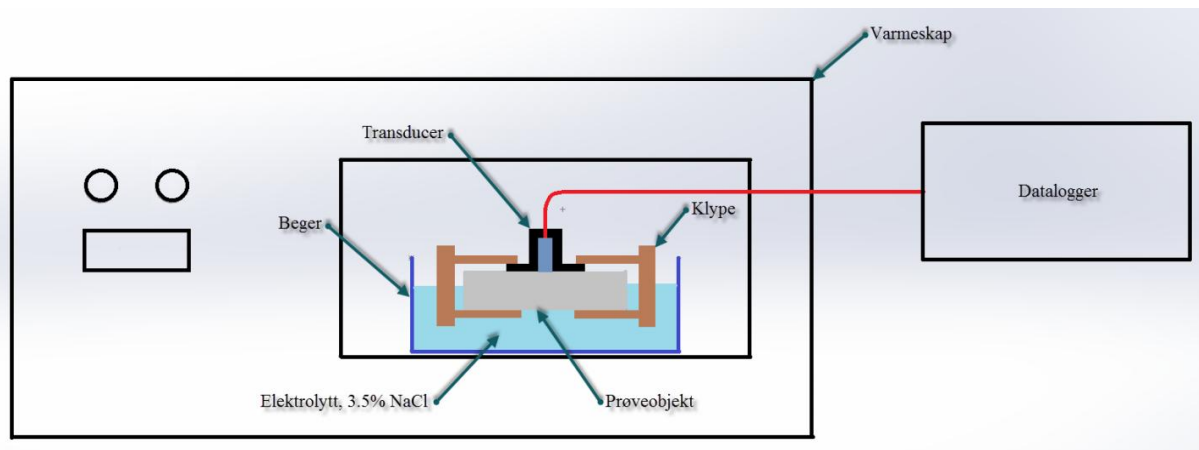
Hensikten med dette forsøket var å påvise integriteten til Sensorlinks ultralydteknologi. Ved å nedsenke et prøveobjekt i en korrosiv elektrolytt skulle endring av godstykkelse observeres som funksjon av tid.

### 3.2.3 Teori

Godstykkelsen ble målt ved bruk av Ultralydteknologi med piezoelektriske transducere basert på *Pulse-echo* metoden (se kapittel 2.2). Benyttet algoritme for prosessering av målesignal er utviklet av Sensorlink AS.

### 3.2.4 Oppsett og prosedyre

Figur 36 viser en enkel skisse av oppsett for korrosjonsforsøket. Hensikten med varmeskapet er å opprettholde konstant temperatur. Materialprøven plasseres i saltvann og to transducere måler veggtykkelse over tid. Transducerene er fiksert til testobjekt ved hjelp av to klyper, som vist i Figur 37, for å forsikre at transducerene står i ro under forsøket.



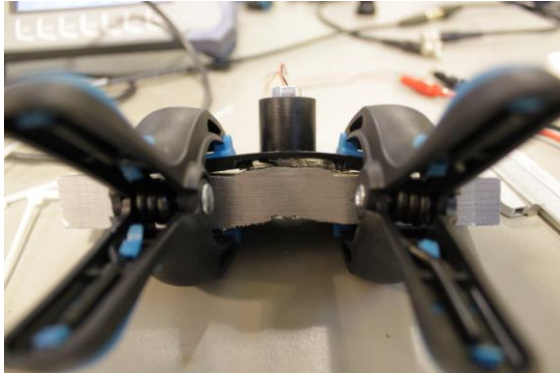
Figur 36 - Skisse av oppsett for korrosjonsforsøk

Utstyr som ble brukt:

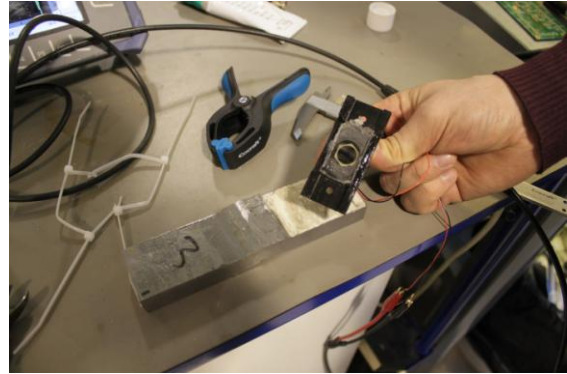
- Varmeskap
- Måleinstrumentet Olympus Epoch 600
- Beholder med saltvann
- Transducer med pute av silikongummi.
- Klyper for fiksering av transducere
- Prøveobjekt (fra et stålrør, type API 5L X52 grad)

Prosedyre for forsøket:

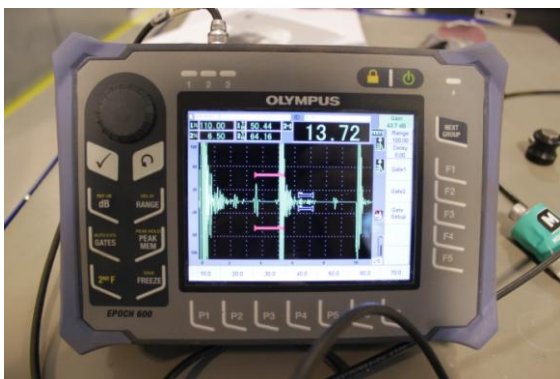
1. Transducerene ble smurt inn med en gel (kontaktmiddel), Figur 38.
2. Måleinstrumentet (Figur 39) ble koblet til transducerene. Grunnen til at det ble brukt to transducere var for å sjekke veggtykkelse ved sveisen samt grunnmaterialet. (se Figur 42)
3. Etter at transducerene var festet, ble stålmaterialet plassert i en blå beholder og fylt med vann (Figur 41). Det ble tilsatt salt i vannet tilsvarende en vektprosent på 3,5% for å etterligne forholdene i sjøvann.
4. Beholderen ble tilslutt plassert i et varmeskap (Figur 40). Som nevnt i kapittel 2.2.2 varierer lydshastigheten med temperatur. Prøveobjektet ble derfor plassert i varmeskap for å sørge for at temperaturen var konstant under forsøket.



**Figur 37 - To klyper som holder transduceren i ro**



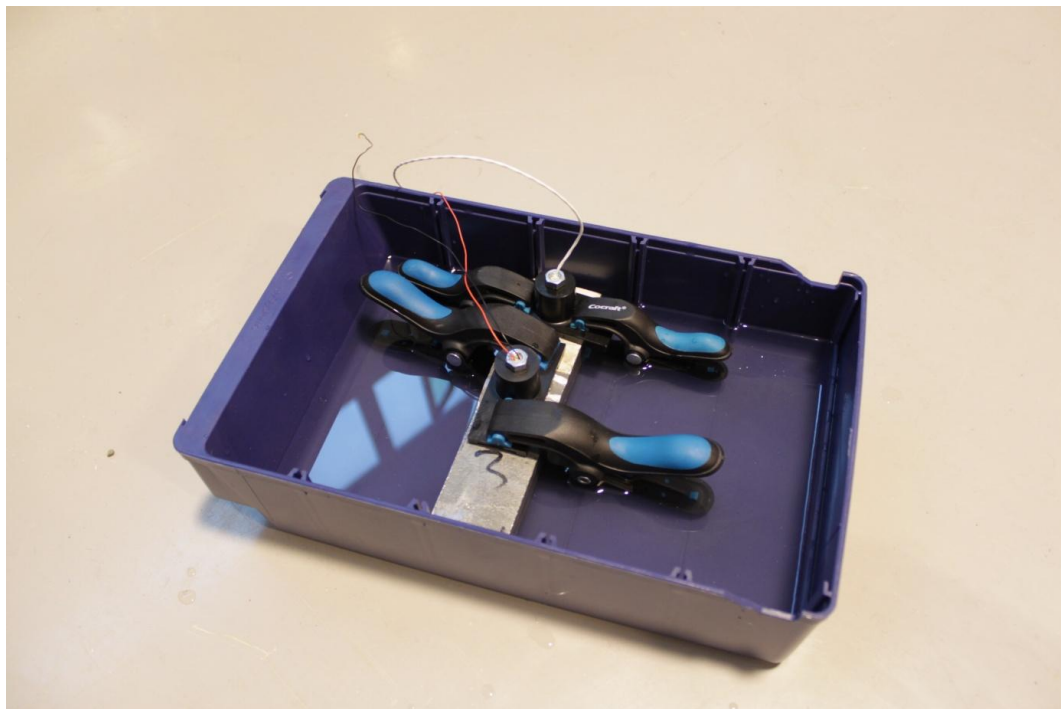
**Figur 38 - Smøring av transducer**



**Figur 39 - Måleinstrumentet Olympus Epoch 600**

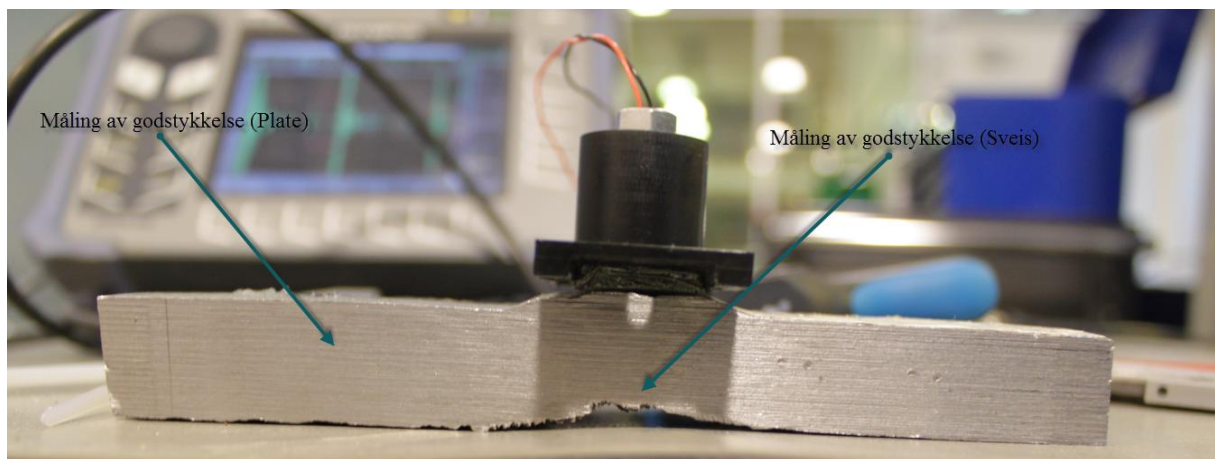


**Figur 40 - Varmeskapet**



**Figur 41 - Testobjektet plassert i saltbad**

Figur 38 viser en pute av silikongummi som lå over transduceren som et slags avstandsstykke for å transportere ultralyden fra transduceren over til stålet. I tillegg ble det brukt en spesiell gel/kontaktmiddel mellom transduceren og stålet. Dette kontaktmiddelet øker signalstyrken betraktelig. Silikongummien kan til en viss grad gi signal på ujevne flater selv uten gel, med det vil alltid bli bedre signal hvis man smører silikongummien inn med denne gel'en. I Sensorlink bruker de en silikongrease i stedet for en vannbasert gel. *Silikongreasen* gir dårligere signal i forhold til de vannbaserte kontaktmidlene, men den fordamper ikke, renner ikke bort og fryser heller ikke. (Baltzersen, 2014)



**Figur 42 - Måling av godstykkelse**

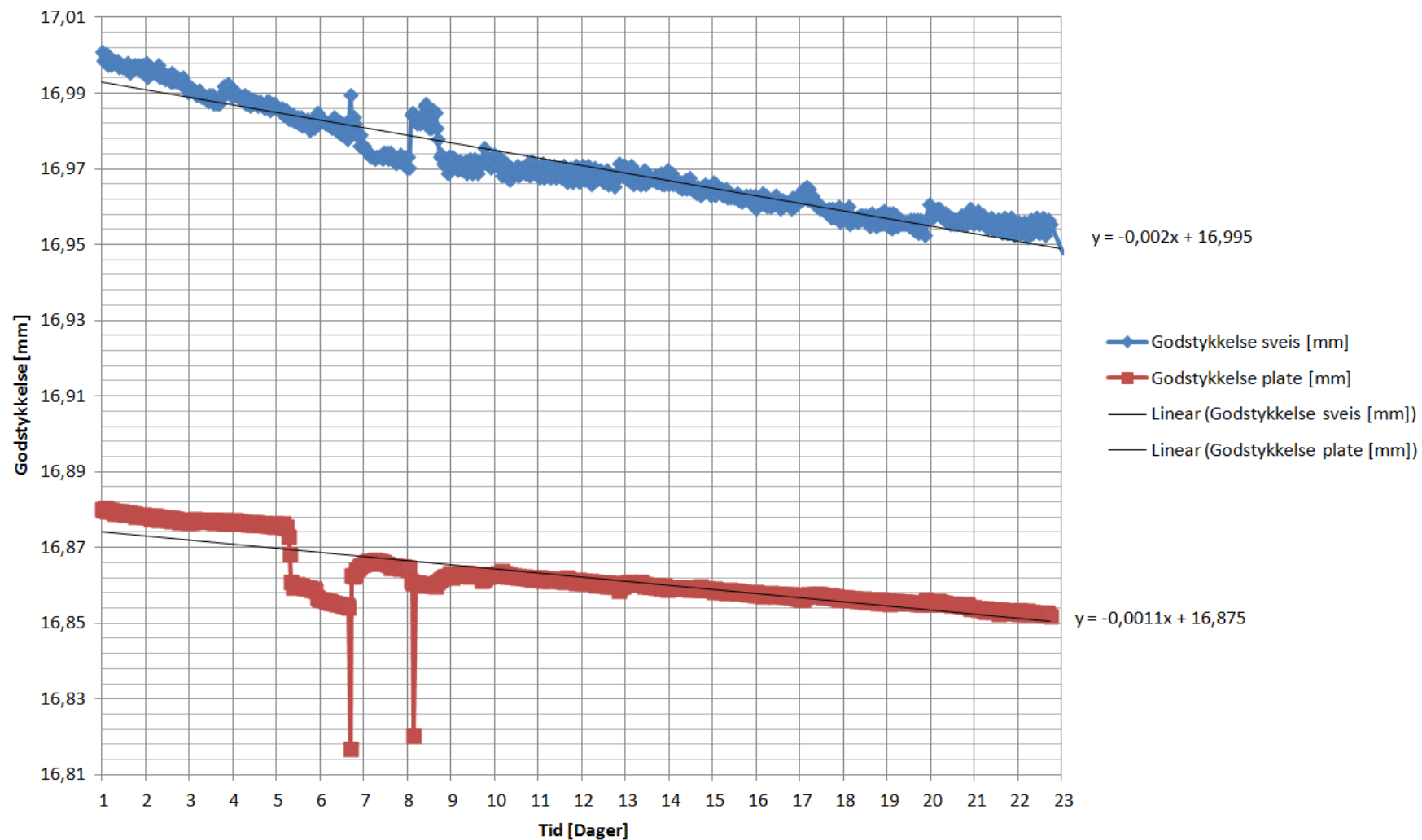
### 3.2.5 Resultat

Rådata fra korrosjonsforsøket ble importert til Excel for videre behandling. Her ble godstykkelse av testobjektet plottet som funksjon av tid, som vist i Figur 43. Ved å legge til trendlinjer ble en gjennomsnittlig korrosjonsrate ved sveis og grunnmateriale kalkulert. Resultat er presentert i Tabell 15.

**Tabell 15 - Korrosjonsrate**

| Plate    | Sveis    | Plate   | Sveis   | Plate                       | Sveis                       |
|----------|----------|---------|---------|-----------------------------|-----------------------------|
| [mm/dag] | [mm/dag] | [mm/år] | [mm/år] | [ $\mu\text{m}/\text{år}$ ] | [ $\mu\text{m}/\text{år}$ ] |
| 0,0011   | 0,0020   | 0,40    | 0,73    | 401,5                       | 730                         |

### Endring av godstykkelse over tid som følge av korrosjon



Figur 43 - Endring av godstykkelse over tid

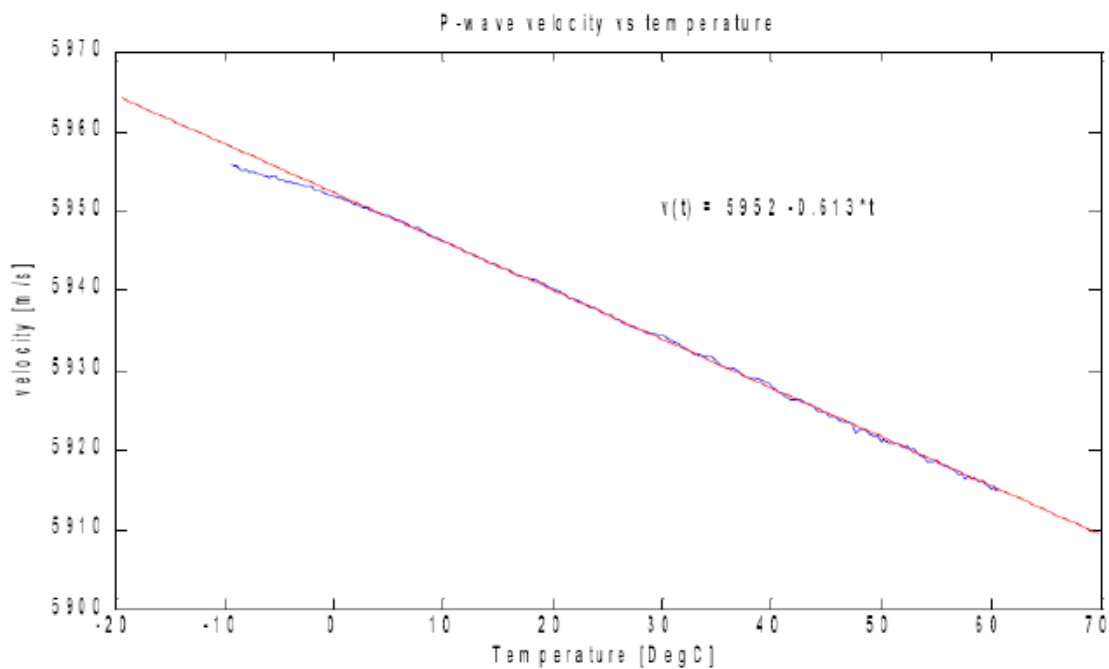
### 3.2.6 Diskusjon

Som tidligere nevnt ble prøveobjektene plassert i varmeskap da lyd hastigheten i stålet endres med temperatur. Varmeskapet viste seg dessverre å være defekt, prøvene ble derfor plassert i romtemperatur. Figur 44 viser forholdet mellom temperatur og lyd hastighet. Forholdet er tilnærmet lineært slik at korreksjon for temperaturvariasjon kan implementeres ved å uttrykke lyd hastigheten ved hjelp av formelen for trendlinjen vist på figuren.

$$c_L(T) = c_{L0} + \alpha T \quad (3.5)$$

Hvor:

$c_{L0} = 5952 \text{ m/s}$  og  $\alpha = -0,613 \text{ m/s}^\circ\text{C}$  som tilsvarer 0,01% endring i lyd hastighet per grader celsius ( $^\circ\text{C}$ ).



**Figur 44 - Hastighetsendring i stål som funksjon av temperatur. (Øystein Baltzersen, u.d.)**

Benytter formel (2.1) til å kalkulere godstykkelsen ( $G$ ), men substituerer lyd hastigheten ( $c$ ) med den temperaturkorrigerede lyd hastigheten ( $c_L(T)$ ) fra (3.5):

$$G = \frac{c_L(T) \cdot t}{2} \quad (3.6)$$

hvor  $t$  er propageringstiden i materialet. Avviket i godstykkelse kan dermed beregnes ut i fra følgende formel:

$$\Delta G = G_0 - \frac{(c_{L0} + \alpha T) \cdot t}{2} \quad (3.7)$$

(Øystein Baltzersen, u.d.)

Prøveobjekt benyttet i dette forsøket hadde en godstykkelse på omlag 17 mm. Tabell 16 tar for seg tre forskjellige godstykkelser og tre forskjellige temperaturavvik. Med  $15^\circ C$  avvik vil stålprøven (med godstykkelse på 17mm) ha en målt godstykkelsesfeil på 26,3  $\mu m$ . I Figur 43 mellom dag 5 og 7, er det observert en brå reduksjon av målt veggtykkelse for platen (markert med røde punkt). Reduksjonen er i størrelsesorden 20  $\mu m$ , noe som ved første øyekast kan tyde på en temperaturvariasjon. Samtidig er det ikke registrert reduksjon av målt godstykkelse for sveisen (markert med blå punkt) i samme tidsperiode. Tvert imot tyder det på at den har økt noe. Målefeil skyldes i dette tilfellet antageligvis ikke temperaturvariasjon. I målingene for plate(grunnmaterialet) er det to ”uteliggere”, den ene rett før dag 7 og den andre rett etter dag 8. Disse målefeilene stammer trolig fra feilprosessering av tykkelsesalgoritmen.

**Tabell 16 - Avvik i godstykkelse ved å ignorere det temperaturavhengige uttrykket i ligning (3.5)**

| Temperature offset | Godstykkelse 14 mm | Godstykkelse 17 mm | Godstykkelse 20 mm |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $\pm 1^\circ C$    | 1,44 $\mu m$       | 1,75 $\mu m$       | 2,06 $\mu m$       |
| $\pm 5^\circ C$    | 7,21 $\mu m$       | 8,75 $\mu m$       | 10,3 $\mu m$       |
| $\pm 15^\circ C$   | 21,63 $\mu m$      | 26,26 $\mu m$      | 30,90 $\mu m$      |

(Øystein Baltzersen, u.d.)

### 3.2.7 Konklusjon

Korrosjonsraten for karbonstål ligger vanligvis i området 0,2 – 0,8 mm/år. (Johnsen, 2007) I dette forsøket er korrosjonsrate estimert til å være 0,4 mm/år for grunnmaterialet og 0,73mm/år for sveisen. Måledata fra dette korrosjonsforsøket anses derfor for å være realistiske. Det kan dermed konkluderes med at Sensorlinks ultralydteknologi fungerer. Som nevnt under diskusjon var målefeil på mikrometernivå observert. Målefeil forventes å forekomme i positiv og negativ retning slik at over tid vil en trendlinje gi et godt bilde av korrosjonsraten.

## 4 Utforming og design

### 4.1 Design Basis

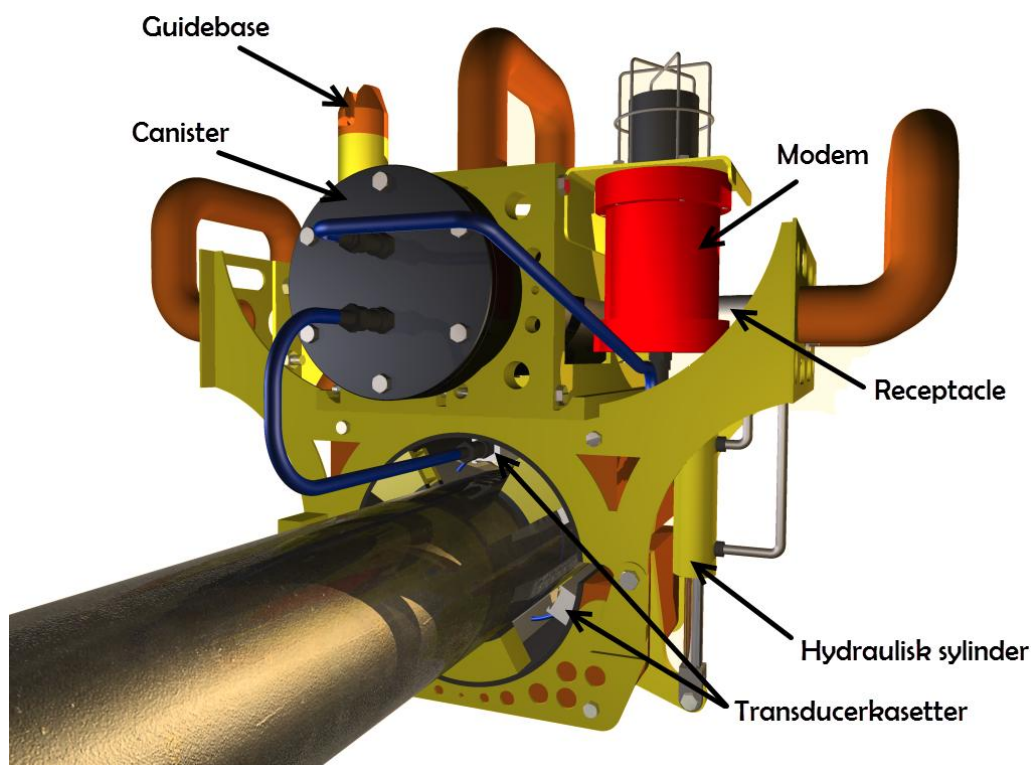
Ultralydklammerets rammebetingelser er listet opp i kapittel 1.2. I tillegg er det fokusert på:

- Klammerets låsmekanisme
- Klammerets forspenning ved lukking

### 4.2 Presentasjon av korrosjonsmonitoreringsystem

Figur 45 tar viser noen av de viktigste komponentene på ultralydklammeret. I 3D DAK-modellen (Vedlegg A6) er det modellert i forhold til en rørledning som er 6" i diameter da denne oppgaven fokuserer på små rørledninger (3" til 12"). Ultralydklammeret er todelt, hvor den øverste delen står statisk på toppen av rørledningen, og den nederste delen av klammeret lukker seg rundt rørledningen ved hjelp av en hydraulisk sylinder.

Det er en viss risiko for at den hydrauliske sylinderen vil begynne å lekke. Det er derfor tenkt at den hydrauliske sylinderen tas opp igjen etter installasjon. For at det skal være mulig må klammeret ha en annen låsmekanisme. Et forslag til låsmekanisme ligger i delkapittel 4.4.1.

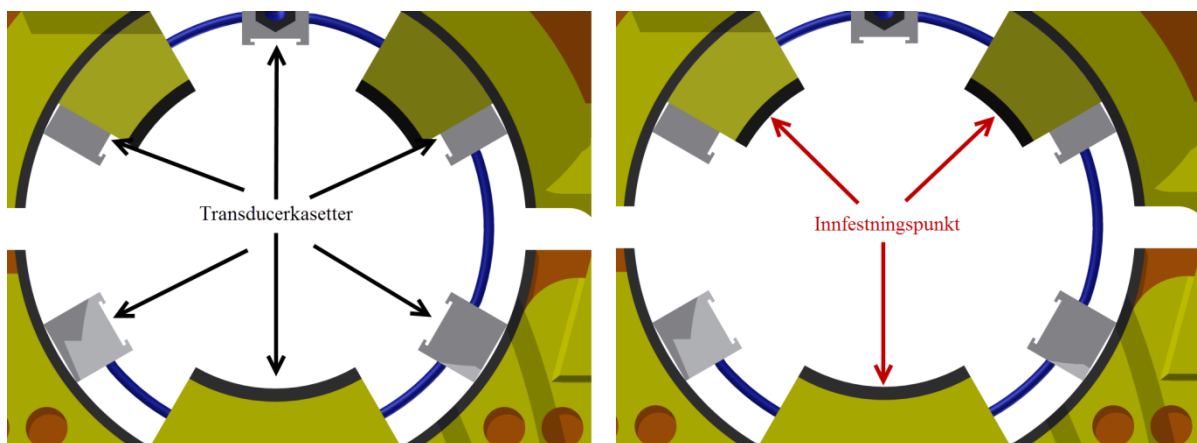


Figur 45 - Viktige komponenter på klammeret



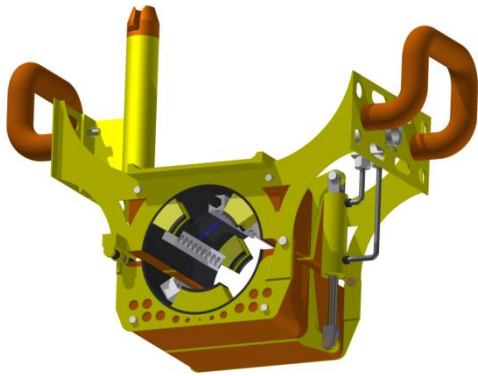
Transducerene er ligger i transducerkasettene i ønsket klokkeposisjon. Det er foreslått å bruke en transducerkasett som kan har kapasitet til ni transducere. Da dette er en relativt liten rørledning (6") er det foreslått å bruke totalt 6 transducerkassetter slik at det totale antallet transducere blir 54 transducere. Ultralydkortet støpes direkte i transducerkassetten (selv om den ikke er tegnet inn i modellen). Ultralydklammeret installeres slik at rørledningen ligger inntil innfestningspunktene som vist i Figur 46. Når klammeret er nedsenket i sjøvann vil det være utsatt for marin begroing. Transducerene vil være spesielt utsatt da de gjør de faktiske målingene. Det kan da være hensiktsmessig å installere en leppepakning over transduceren for å hindre marin vekst og hindre gjennomstrømning. En annen måte å hindre marin vekst på er å bruke kobberanoder som frigjør kobberioner som hemmer begroingsraten. (Berg, 2013)

Transducerkasettene ligger aldri inntil rørledningen, men vil ligge såpass næme rørveggen at målesignalet fortsatt blir bra nok.

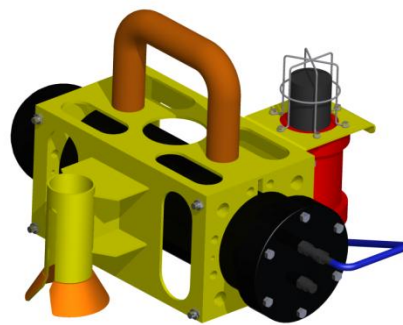


**Figur 46 - Transducerkassetter og innfestningspunkter**

Korrosjonsmonitoreringssystemet består av to hovedmoduler. Modul 1 består av ultralydklammeret med transducerkassetter og en hydraulisk sylinder som er koblet til en *receptacle*. Det er tenkt at klammeret skal installeres i to faser på grunn av høy vekt. Klammeret kan også installeres ved hjelp av vinsj fra fartøy hvis ønskelig.



Figur 47 - Modul 1: Ultralydsklammer



Figur 48 - Modul 2: Canistermodul

For å beregne nøyaktig hvor mye disse modulene veier i vann, brukes følgende formel:

$$W = m \cdot g \quad (4.1)$$

hvor:

$W$  er vekten til klammeret målt i Newton.

$m$  er massen til klammeret

$g$  er gravitasjonskraften ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ )

I vann vil klammeret få oppdrift på grunn av fortrengt volum. Oppdriften blir dermed:

$$O = \rho \cdot g \cdot V \quad (4.2)$$

hvor:

$O$  er oppdriften målt i Newton

$\rho$  er vannets tetthet

$V$  er fortrengt volum

Klammerets vekt i vann blir dermed differansen mellom vekt i luft og oppdrift:

$$W = m - \rho \cdot V, [\text{kg}] \quad (4.3)$$

(Lindaas, 2002)

Massen og volumet til klammeret (uten oppdriftselementer) er kalkulert i Inventor (se CD for mer informasjon) og satt inn i Tabell 17.

**Tabell 17 - Klammerets egenskaper**

| Modul                | Total vekt i luft: | Volum                 | Total vekt i vann: | Eksponert overflateareal |
|----------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|--------------------------|
| <b>Klammeret</b>     | 44,1 kg            | 0,0174 m <sup>3</sup> | 40,0 kg            | 2,30 m <sup>2</sup>      |
| <b>Canistermodul</b> | 60,4 kg            | 0,0083 m <sup>3</sup> | 51,9 kg            | 1,56 m <sup>2</sup>      |

### 4.3 Installasjon

Klammeret skal kunne installeres ved hjelp av ROV. Det betyr at vekten av modulene ikke kan overstige en vekt på 50kg i vann (som nevnt i 2.1). Ifølge Tabell 17 veier klammeret og canistermodulen henholdsvis 40,0 og 51,9kg i vann. Canistermodulen er med andre for tung for å kunne installeres med en ROV. Det finnes flere måter å løse dette på, eksempelvis:

- Legge til oppdriftselement
- Bruke hiv-kompensert vinsj for å guide canistermodulen på plass
- Redusere godstykkelse på eksempelvis brakettene

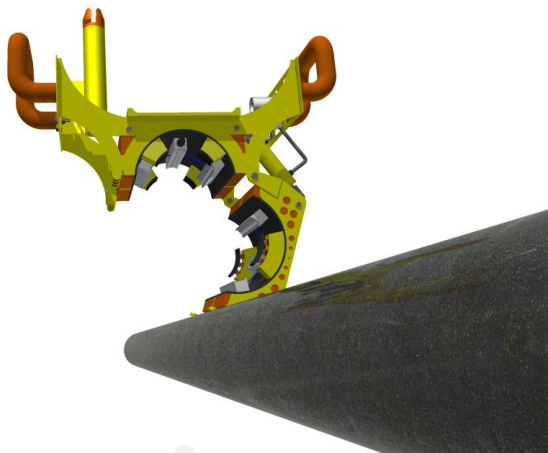
I denne oppgaven er det foreslått å bruke ROV til å installere klammeret. Den enkleste løsningen er da å legge på noen ekstra oppdriftselementer rundt canistermodulen.

Oppdriftselementene er ikke tegnet inn i canistermodulen som vist i Figur 47.

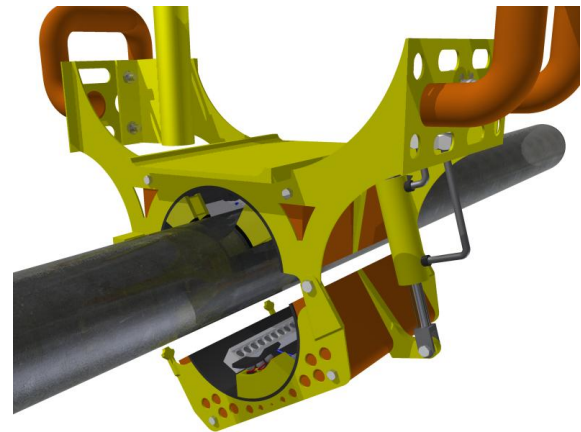
Installasjonsprosedyren kan beskrives i tre steg:

#### 4.3.1 Installasjon - steg 1

Farkost (ROV) blir sjøsatt sammen med det åpne klammeret som vist i Figur 49 og Figur 50 (ROV er ikke representert). Farkosten bruker de oransje håndtakene til å løfte klammeret. Det ene håndtaket kan brukes til å holde seg fast i når farkosten skal operere den hydrauliske sylindren. Klammeret må guides ned på de fire innfestningspunktene. På Figur 50 står klammeret plassert på disse innfestningspunktene. Det bør være høy friksjonsfaktor mellom rørledningen og disse innfestningspunktene. Det er da tenkt at de skilles av et gummimaterial som øker friksjonsfaktoren i tillegg til at den har mulighet til å komprimeres.



**Figur 49 - Åpent klammer**

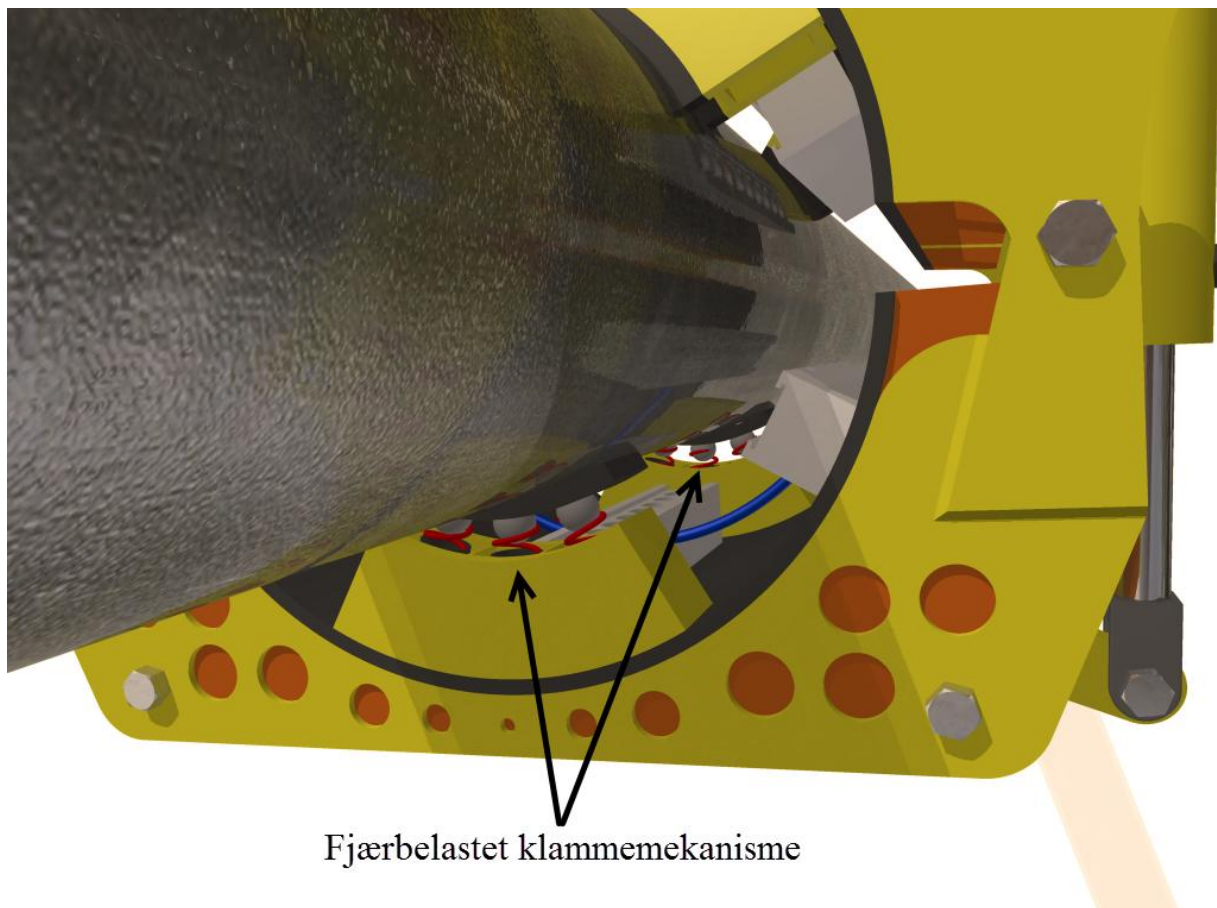


**Figur 50 - Klammeret blir plassert på rørledningen**

#### **4.3.2 Installasjon - steg 2**

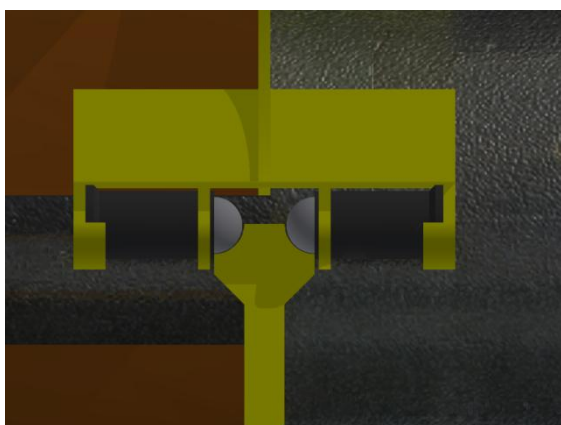
Klammeret tres rundt rørledningen og komprimerer samtidig fjærmekanismen representert i Figur 51. Denne fjærmekanismen vil sørge for at klammeret er forspent rundt røret, som betyr at klammeret vil få økt stabilitet. Samtidig vil dette systemet kompensere for en mulig ovalisering i rørledningen. Transducerkasettene vil dermed ikke stå inntil rørledningen, men fortsatt være nær rørveggen til å oppnå gode målinger.

Låsmekanismen (illustrert i Figur 52, Figur 53 og Figur 54) består også av en fjærmekanisme. Figurene viser stegvis hvordan låsmekanismen fungerer i praksis. I stilling 1 (Figur 52) vil låsepinnen begynne å presse kulan inn i beholderen. Kulan er fastspent i fjæren slik at det må en viss kraft til for å kunne komprimere fjæren. I stilling 2 (Figur 53) er kulan og fjæren helt komprimert. I Figur 54 er klammeret låst og fjærmekanismen har ekspandert ut igjen. Den vil da være låst helt til den hydrauliske sylindren kjøres i motsatt retning.



Fjærbelastet klammemekanisme

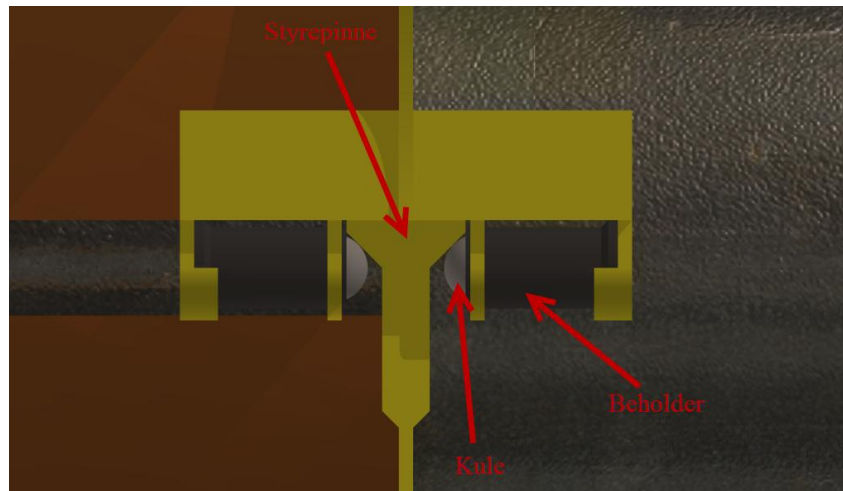
Figur 51 - Fjærbelastet klamme



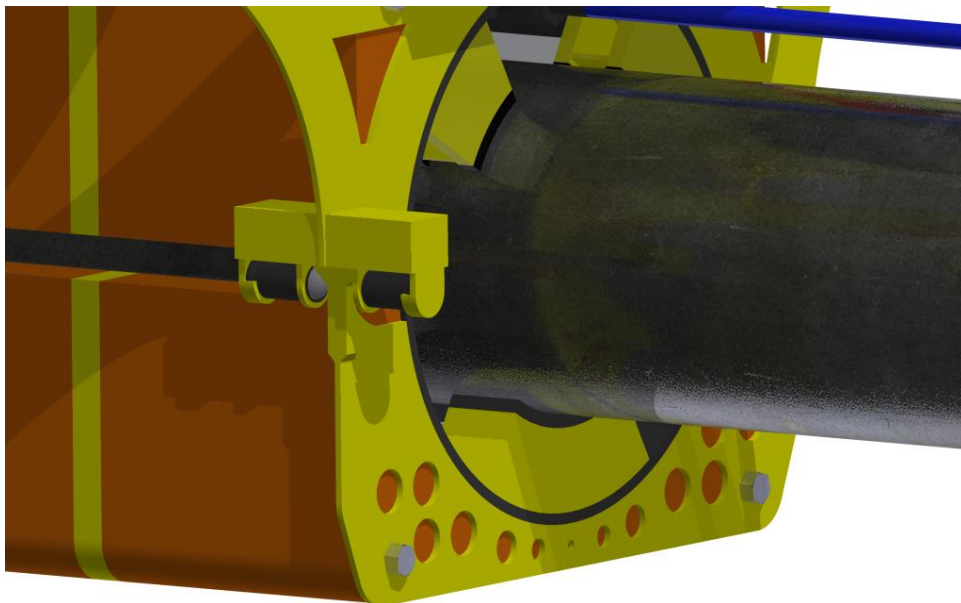
Figur 52 - Låsemekanisme stilling 1



Figur 53 - Låsemekanisme stilling 2



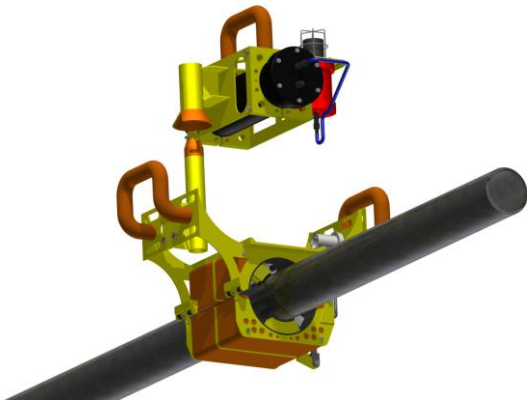
Figur 54 - Låsmekanisme, stilling 3



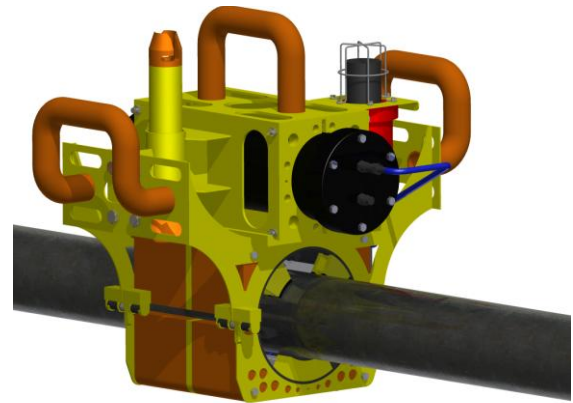
Figur 55 - Klammeret i låst posisjon

#### 4.3.3 Installasjon - steg 3

Når klammeret sitter fast som vist i Figur 55, installeres canistermodulen som siste steg i prosedyren. På selve klammeret er det sveist på plass en guidebase slik at canistermodulen kan enkelt settes på plass. I tillegg er det sveist fast en krybbe som canisteren kommer i rett posisjon. Figur 56 og Figur 57 viser stegvis hvordan canisteren treffer krybben.

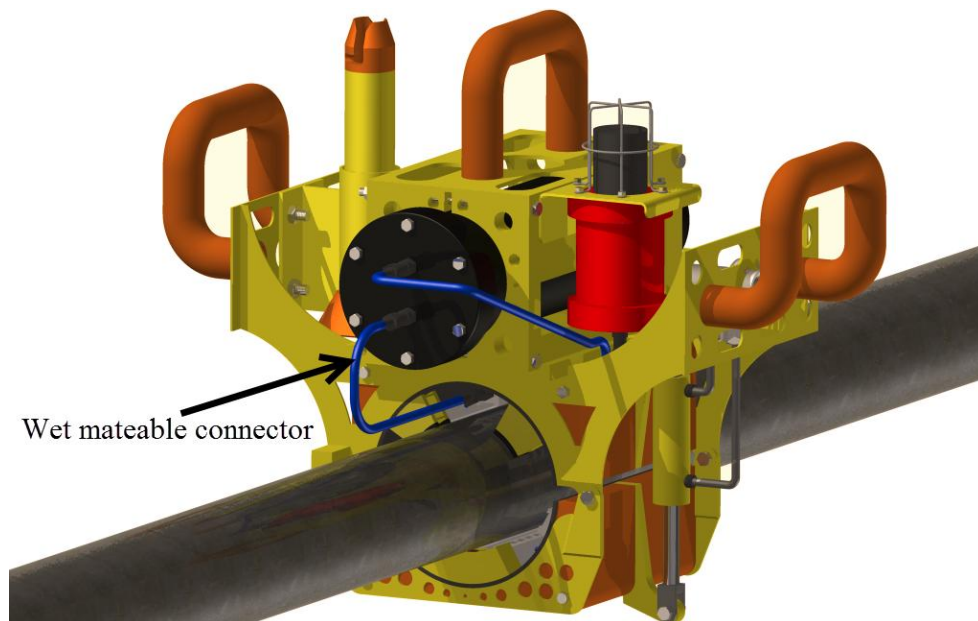


Figur 56 - Modulene settes sammen, del 1



Figur 57 - Modulene settes sammen, del 2

Siste operasjon blir å koble sammen transducerkassetten og canisterflasken ved å bruke en *wet mateable connector* som henvist på Figur 58.



Figur 58 - Sammenstilling med *wet mateable connector*

## 4.4 Låsemekanisme

### 4.4.1 Låsemekanisme

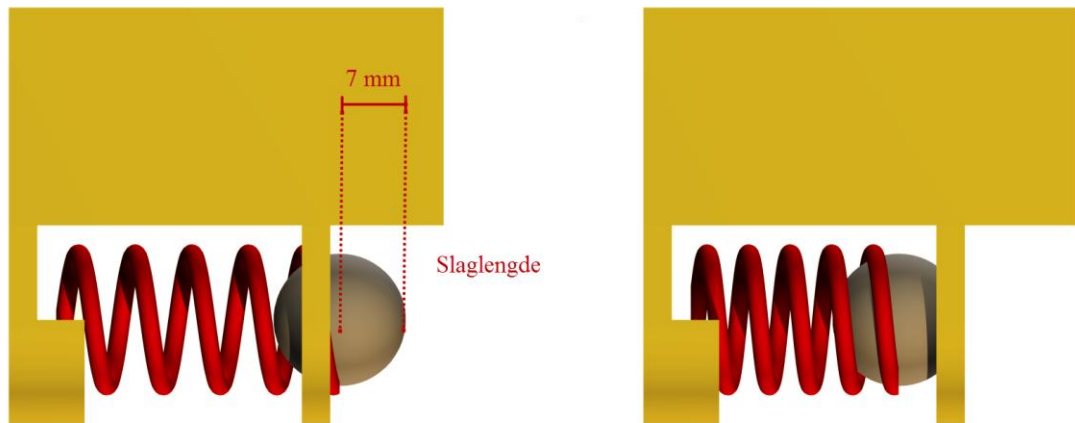
Klammeret har en fjærbelastet låsmekanisme som tidligere nevnt. Når låsepinnen treffer kulen vil fjæren blir komprimert som vist på Figur 59. Når fjæren blir komprimert vil fjæren få en viss kraft  $F$  som alltid vil virke mot bevegelsen, og kan formuleres på følgende måte:

$$F = -k \cdot x \quad (4.4)$$

hvor:

$k$  er fjærkonstanten

$x$  er slaglengde



**Figur 59 - Til venstre: Ekspandert fjær med slagende lik 7 mm. Til høyre: Komprimert fjær**

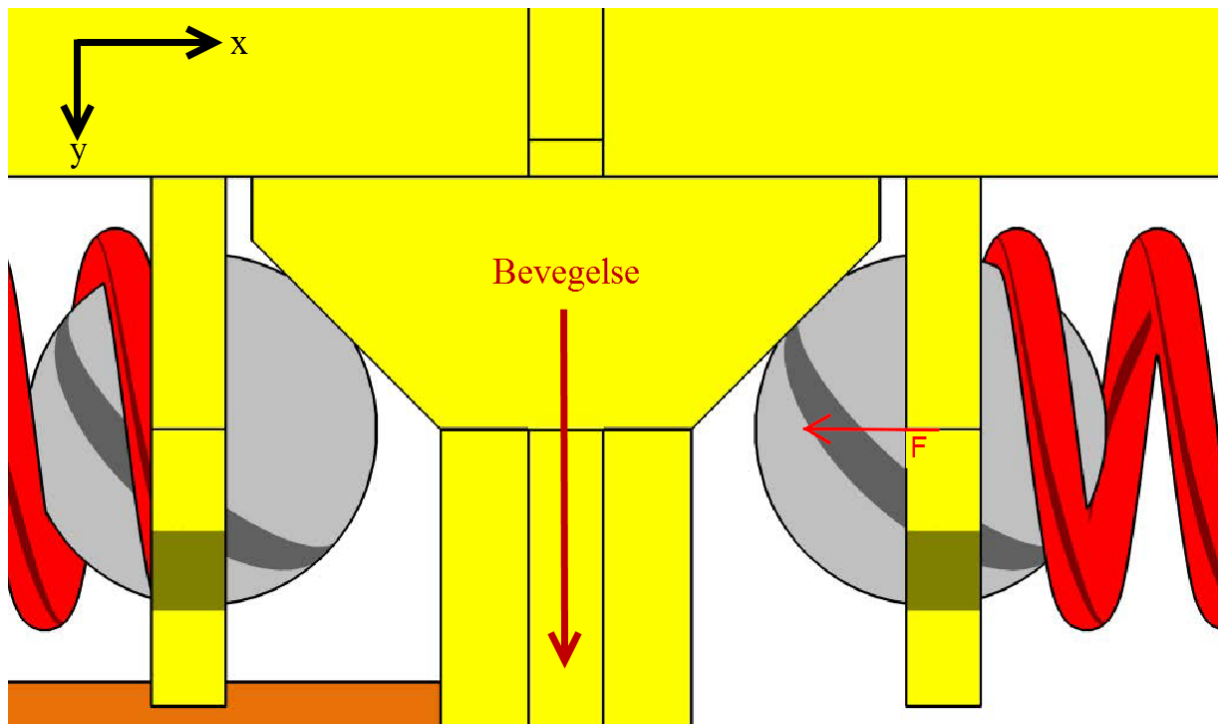
Figur 60 viser fjæren når klammeret står i låst posisjon. En kraft  $F$  må overvinnes for å kunne presse låsepinnen ned for å åpne klammeret. Kulens radius blir dermed slaglengden for denne fjæren, altså 7 mm. Fjærbeholderen er skjult i disse figurene.

Låsepinnen ligger i utgangspunktet og hviler på kulen med en vinkel på 45 grader i forhold til x-aksen. Antar at friksjonskraften mellom kulen og låsepinnen er mye mindre enn kraften det trengs for å åpne klammeret. Kontaktarealet mellom kulen og låsepinnen er lite og derfor neglisjeres friksjonskraften i denne oppgaven. Total kraft som dras ned i Y-retning blir dermed direkte overført til x-retning.

Hele låssystemet består av fire fjærmekanismer slik at den dimensjonerende kraften som må overvinnes kan uttrykkes (Notasjonen  $f$  står for fjær)

$$F_f = 4 \cdot k_f \cdot x_f \quad (4.5)$$





Figur 60 - Sammenhengen mellom fjærkraften  $F$  bevegelsen

#### 4.4.2 Fjærbasert innfestning

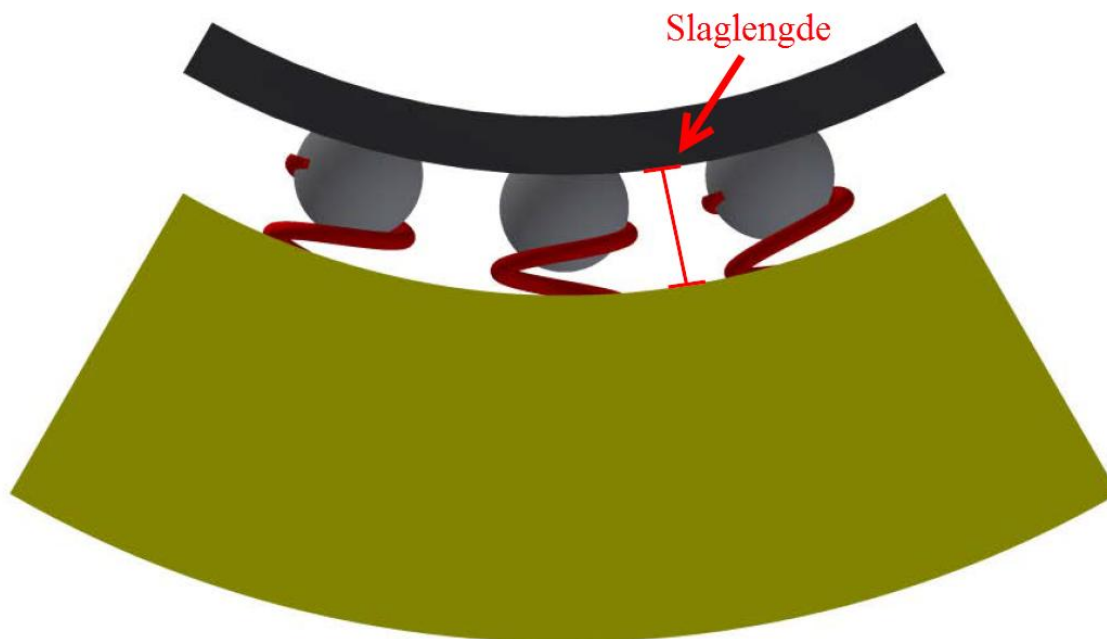
Som nevnt tidligere er klammerets innfestningspunkt også fjærbelastet. Den vil ha en viss forspenning avhengig av ovalisering på rørledningen. I tillegg kan temperaturen ha en innvirkning på stålets diameter (som nevnt i kapittel 2.3.9). Slanglengden vist på Figur 61 har verdi som kan variere med hensyn på ovaliseringen i rørledningen. Den er modellert i Inventor med en slaglengde på 13 mm for å kunne tilpasse seg en perfekt geometrisk rørledning (ingen ovalisering). Denne fjærbaserte innfestningen er sentrert nede i ultralydklammeret som henviser på Figur 63. Ultralydklammeret består av to stk. fjærbaserte innfestninger med 3 fjærer hver. Den totale fjærkraften ved innfestningene når klammeret er helt lukkes kan uttrykkes:

$$F_i = 6 \cdot k_i \cdot x_i \quad (4.6)$$

Fjærkreftene for både låsmekanisme og innfestning er gitt i Tabell 18. Fjærkonstantene er imaginære, men hovedpoenget er at det totale momentet fra låsmekanismen må være større enn momentet fra innfestningen (se kapittel 4.4.4).

Tabell 18 - Total fjærkraft for begge fjærmekanismene

|              | Fjærkonstant [N/m] | Slaglengde [mm] | Total fjærkraft [N] |
|--------------|--------------------|-----------------|---------------------|
| Låsmekanisme | 2600               | 7               | 72,8                |
| Innfestning  | 550                | 16              | 52,8                |



Figur 61 - Fjærbasert innfestning

#### 4.4.3 Hydraulisk sylinder

Den hydrauliske sylindere sørger for at klammeret kan både lukkes og åpnes. Ved hjelp av en *dual-port receptacle*, vil ROV'en ha mulighet til å kjøre sylindere ut og inn. Den hydrauliske sylindere vil produsere en kraft som vil være avhengig av trykket i sylindere og tverrsnittsarealet:

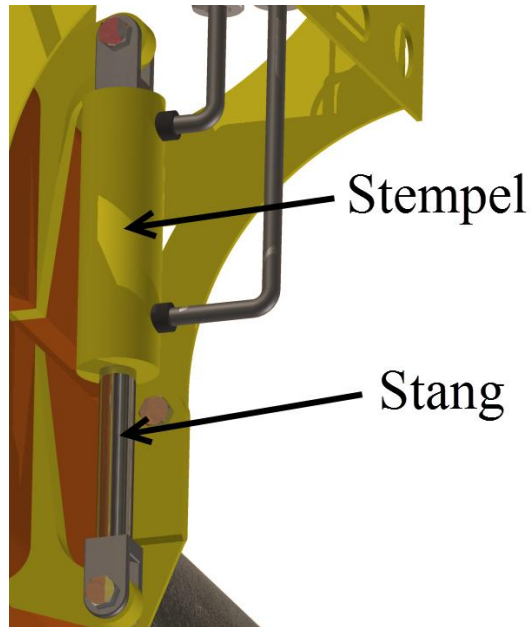
$$F_{syl} = P_{syl} \cdot A \quad (4.7)$$

Tverrsnittsarealet vil variere, avhengig av hvilken retning sylindere går. Indre stempeldiameter og stang (Figur 62) har en diameter på henholdsvis 40 og 20 mm. Hvis klammeret lukkes vil tverrsnittsarealet være det samme som arealet av en sirkel ved å bruke den indre stempeldiameter:

$$A_{lås} = \pi \frac{D_{stem}^2}{4} \quad (4.8)$$

Hvis sylinderen kjøres motsatt veg (klammeret åpnes) vil tverrsnittsarealet være lik tverrsnittsarealet av stempelet substituert med tverrsnittsarealet av stangen:

$$A_{\text{åpne}} = A_{\text{lås}} - \pi \frac{D_{\text{sta}}^2}{4} \quad (4.9)$$



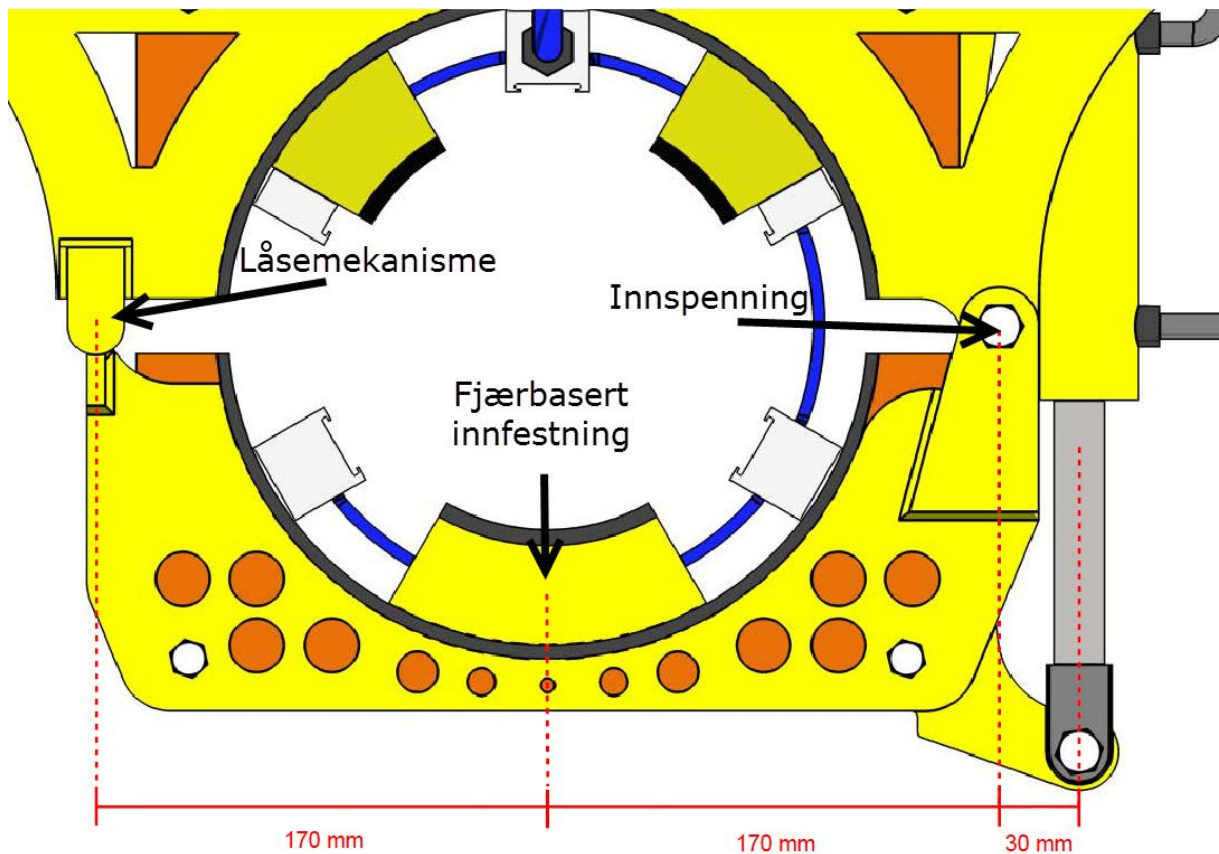
Figur 62 - Sylinder

Tverrsnittsarealene ble:

$$A_{\text{lås}} = 1256,6 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{åpne}} = 942,4 \text{ mm}^2$$

#### 4.4.4 Momentbalanse



Figur 63 - Avstand mellom fjærsystemet og innspenning

#### Trykk i sylinder ved lukking av klammer:

Klammeret vil ha følgende momentbalanse ved lukking av klammer med hensyn på innspenningspunktet ( $L_1$  er lik 30 mm og  $L_2$  er 170mm):

$$F_{syl} \cdot L_1 = F_i \cdot L_2 + F_f \cdot 2 \cdot L_2 \quad (4.10)$$

Kombinerer formel (4.7), (4.8), (4.10):

$$P_{syl} = \frac{F_i \cdot L_2 + F_f \cdot 2 \cdot L_2}{L_1 \cdot A_{lås}} \quad (4.11)$$

Setter inn verdiene funnet i Tabell 18 og tverrsnittsarealet funnet i 4.4.3 og får at trykket i sylindren må være  $P_{syl} = 0,89 N / mm^2 = 8,9 bar$ .

#### Trykk i sylinder ved åpning av klammer:

Hvis klammeret må åpnes blir momentbalansen litt annerledes. Kraften fra den fjærbaserte innfestningen vil virke i samme retning som sylindringen:

$$F_{syl} \cdot L_1 + F_i \cdot L_2 = F_f \cdot 2 \cdot L_2 \quad (4.12)$$

I tillegg vil tverrsnittsarealet for sylindringen være endret som vist i kapittel 4.4.3:

$$P_{syl} = \frac{F_f \cdot 2 \cdot L_2 - F_i \cdot L_2}{L_1 \cdot A_{\text{åpne}}} \quad (4.13)$$

Setter inn verdiene som tidligere funnet og får at  $P_{syl} = 0,56 \text{ N} / \text{mm}^2 = 5,6 \text{ bar}$ . Det krever altså relativt lite trykk i sylindringen for begge operasjoner. Det kreves, ikke overraskende, et høyere trykk for å lukke klammeret, for da vil fjærkraften ved innfestningspunktet virke i mot sylindringen.

#### **Kommentarer:**

Det er viktig at  $F_f \cdot 2 \cdot L_2 - F_i \cdot L_2$  større enn 0 (noe den er i dette eksempelet). Hvis uttrykket blir negativt, vil ikke klammeret ha en fungerende låsmekanisme hvis den hydrauliske sylindringen fjernes fra systemet. Det er dermed essensielt å velge fjærer med hensyn på fjærkonstant for å sørge for at låsmekanismen holdes intakt. Videre kan det nevnes at friksjonskreftene er ignorert. Friksjonskraften vil alltid virke i mot bevegelsen slik at det vil være konservativt å ignorere den. Det vil kreve et større trykk for å lukke og åpne klammeret, men det vil være lettere å sørge for at låsmekanismen fungerer. Det kan også nevnes at i den fjærbaserte innfestningen er det tre fjærer (pr. innfestning) som står symmetrisk i forhold til innspenningen til ultralydklammeret, slik at det totale momentet fortsatt er uendret. Det stilles krav til at fjærene (både for låsmekanismen og innfestningen) kan håndtere sjøvann. Lee Springs produserer fjærer i flere ulike material, blant annet 316L rustfritt stål, hastelloy, inconel, fosfor bronse mm. Det er også mulig å spesifisere ulike fjærkonstanter slik at nødvendig fjærkraft kan optimaliseres. (Spring, 2014)

Uten den hydrauliske sylindringen vil også vekten til den nedre delen av ultralydklammeret ha en betydning. Kraften som forårsakes av vekten av denne delen av klammeret kan være både positiv eller negativt, avhengig av hvor dominerende oppdriftselementene er.

## 4.5 Canister

### 4.5.1 Design

Canisteren er et trykkammer hvor nødvendig elektronikk plasseres for å sikre styring av ultralydmålinger, prosessering og lagring. Canisterflasken med tilhørende lokk er modellert i konstruksjonsstål i Inventor og ANSYS. Den har en veggtykkelse på 15mm (se Vedlegg A6 for 3D DAK-modell). Canisteren skal tåle et utvendig trykk på 300 bar (effekten av 3000 meters vanddybde).

### 4.5.2 FEM analyse

Canisterflasken er den eneste komponenten som er utsatt for differentielltrykk og må testes i et simuleringprogram for å sikre at flasken tåler det utvendige trykket. ANSYS Workbench 14 er blitt brukt til å simulere 300 bar (30 MPa) på canisterflasken. illustrerer henholdsvis canisterflasken og lokket i ANSYS. Som nevnt i kapittel 4.5.1 er canisteren modellert i konstruksjonsstål. Stålets egenskaper er representert i Figur 64 (utdrag fra ANSYS).

| Outline of Schematic A2: Engineering Data |                                  |   |   |   |
|---|----------------------------------|---|---|---|
|   | A                                | B | C | D   |
| 1   | Contents of Engineering Data     |   |   | Description   |
| 2   | Material                         |   |   |   |
| 3   | Structural Steel                 |   |   | Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1 |
| *   | Click here to add a new material |   |   |   |

| Properties of Outline Row 3: Structural Steel |   |                    |                    |   |
|---|---|--------------------|--------------------|---|
|   | A   | B                  | C                  | D |
| 1   | Property  | Value              | Unit               |   |
| 2   | Density   | 7850               | kg m <sup>-3</sup> |   |
| 3   | Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion |                    |                    |   |
| 6   | Isotropic Elasticity                              |                    |                    |   |
| 7   | Derive from                                       | Young's Modulus... |                    |   |
| 8   | Young's Modulus                                   | 2E+11              | Pa                 |   |
| 9   | Poisson's Ratio                                   | 0,3                |                    |   |
| 10  | Bulk Modulus                                      | 1,6667E+11         | Pa                 |   |
| 11  | Shear Modulus                                     | 7,6923E+10         | Pa                 |   |
| 12  | Alternating Stress Mean Stress                    | Tabular            |                    |   |
| 16  | Strain-Life Parameters                            |                    |                    |   |
| 24  | Tensile Yield Strength                            | 2,5E+08            | Pa                 |   |
| 25  | Compressive Yield Strength                        | 2,5E+08            | Pa                 |   |
| 26  | Tensile Ultimate Strength                         | 4,6E+08            | Pa                 |   |
| 27  | Compressive Ultimate Strength                     | 0                  | Pa                 |   |

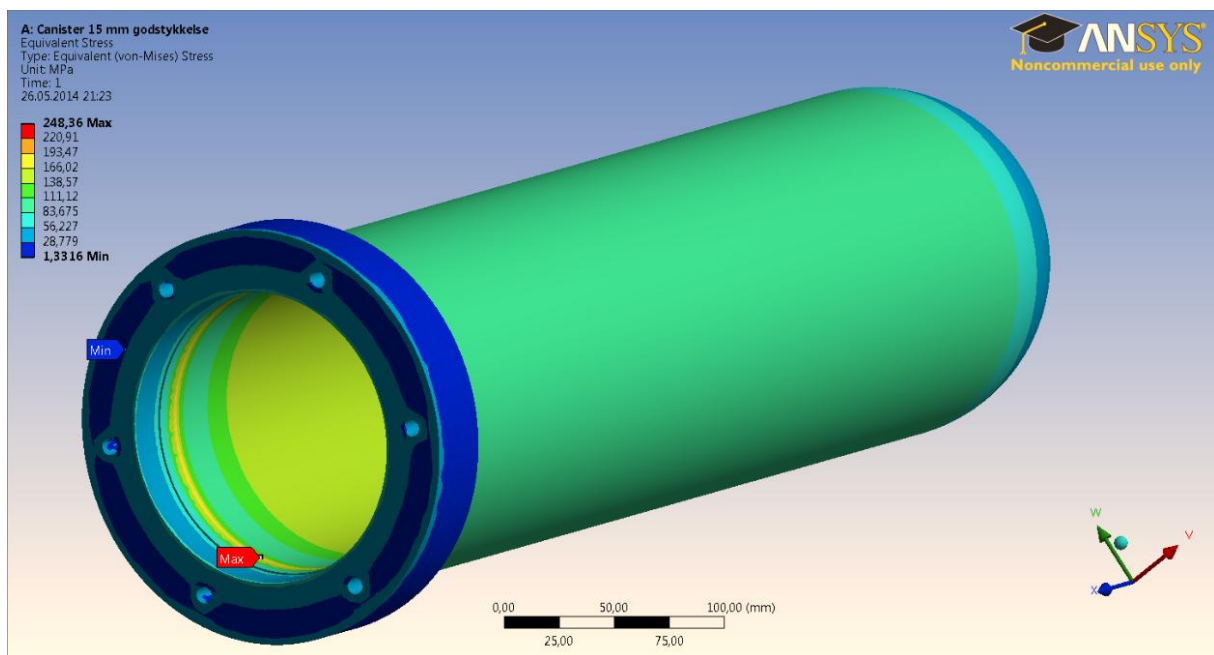
Figur 64 - Data for konstruksjonsstål i ANSYS

Figur 65 viser jevnføringsspenning for canisterflasken. Maks spenning finnes er markert på figur og gir en verdi på 248,36 MPa. Konstruksjonsstålet brukt i simuleringen har en flytegrense på 250 MPa (Figur 64) som fortsatt vil gi en utnyttelsesfaktor som er under 1:

$$\frac{\sigma_{jmf}}{\sigma_y} = 0,993 \quad (4.14)$$

Det er ikke tatt hensyn til sikkerhetsfaktorer i denne analysen. Utnyttelsesfaktoren ligger i grenseområdet til å gå over flytegrensen, hvis det er ønskelig å ha en høyere sikkerhetsfaktor må det gjøres endringer i designet. Eksempelvis:

- Endre materialkvalitet. Velge et material med høyere flytegrense
- Øke godstykkelsen på materialet.



Figur 65 - Jevnføringsspenning i canisterflasken

## 4.6 Materialvalg

Canisterflasken og rammematerial består av karbonstål. For å beskytte karbonstålet best mulig er det tenkt å male stålet i tillegg til å bruke offeranoder. I 3D DAK-modellen som ligger i Vedlegg A6 er stålet hovedsakelig markert i gult og oransje, bortsett i fra oppdriftselementene som også er oransje.

Transducerene som benyttes i Sensorlink lages i PEEK, mens det benyttes POM for transducerkassetene. Dette er beskrevet i forprosjektet til Daniel Berg - kapittel 4.3.

## 4.7 Valg av coating

I kapittel 2.4 ble det nevnt to standarder for å finne frem til korrekt malingsystem for en konstruksjon. ISO 12944-5 ble brukt som prosedyre til å velge et beskyttelsessystem.

Ultralydklammeret skal benyttes i sjøvann. Klammeret består av flere ulike material, både metall og polymerer. Lav-legert karbonstål er det eneste metallet som er valgt for klammeret. Ifølge standarden blir korrosivitetsnivået satt til Im2 (*immersion in sea or brackish water*). Holdbarheten vil i verste fall bli satt som "medium (5 til 15 år)" da disse klammerene ikke skal måle veggtykkelse over lang tid. Både inspeksjons- og monitoreringsklammer vil etter hvert bli tatt opp til overflaten for rengjøring og reparasjon, og da vil det være hensiktsmessig å karakterisere holdbarheten til "medium (5 til 15 år)". Som forbehandling av stål brukes som regel *blast cleaning*. Da er det nødvendig med et blåsemedium, eksempelvis stålpartikler (*steel grit*) eller et mineral i form av aluminiumoksid. Etter at *blast cleaning* er utført, blir det kontrollert at konstruksjonen ikke er utsatt for saltforurensing. (Knudsen, 2010)

**Tabell 19 - Malingsystem for Lavlegert karbonstål**

| Material             | Miljøklassifisering | Levetid     | Forbehandling         |
|----------------------|---------------------|-------------|-----------------------|
| Lavlegert karbonstål | Im2                 | 5 til 15 år | <i>Blast cleaning</i> |

Ifølge Vedlegg E, Table A.6 - Paint systems, er det mange forskjellige malingsystem som tilfredsstillere kravene. For å ikke overdrive levetiden og dermed også kostnadene er stål valget mellom fire kandidater: A6.01, A6.03, A6.05 og A6.09. Samtlige malingsystem, bortsett i fra A6.05 inneholder polyuretan: et bindemiddel som er bannlyst på norsk sektor på grunn av det inneholder et giftig stoff kalt isocyanat. A6.05 ble dermed valgt og består av (se Table A.6 - Paint systems):

- Priming coat: 80 mikrometer NDFT, antall lag: 1
- Malingsystem: 330 mikrometer NDFT, antall lag: 2
- Varer fra 5 til 15 år

(Knudsen, 2010)

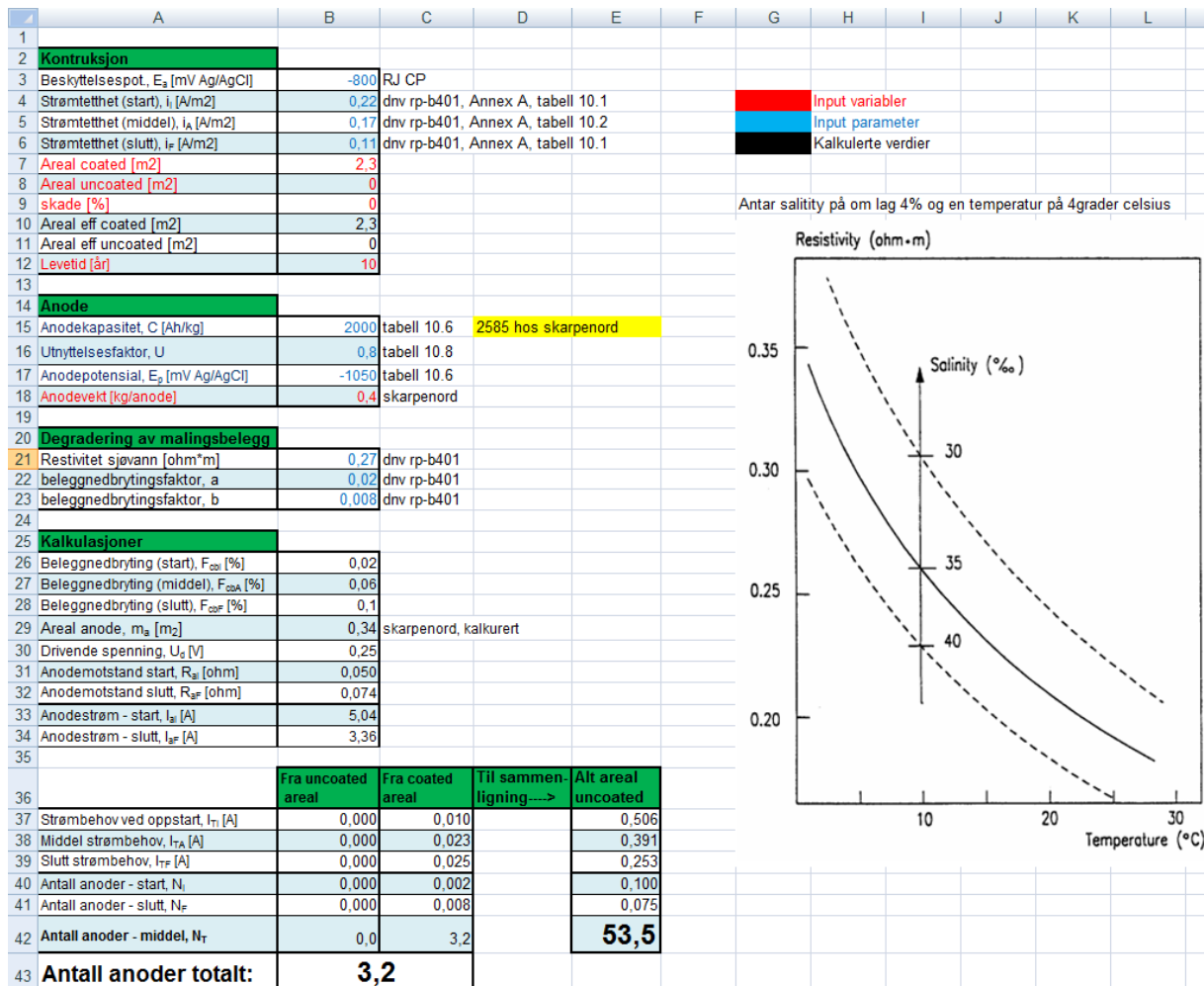
## 4.8 Anoder

Anodemengde baserer seg på eksponert overflateareal for ultralydklammeret. I Tabell 17 står det oppført overflateareal for både ultralydmodulen og canistermodulen. Eksponert overflate



areal for ultralydsklammeret og canistermodulen er henholdsvis 2,30m<sup>2</sup> og 1,56m<sup>2</sup>. I denne oppgaven er det brukt matematisk modell (Vedlegg A5) for å kalkulere anodemengde. I Figur 66 er det vist antall anoder som trengs for å beskytte 2,30m<sup>2</sup> (ultralydmodulen) med malt overflateareal. Ved å bruke de minste anodene tilgjengelig, CORAL A-5, ble det estimert 3,2 anoder, dvs. 4 hele offeranoder for å beskytte ultralydmodulen mot korrosjon med levetid på 10 år. Tilsvarende kan bli gjort for canistermodulen som har overflateareal lik 1,56m<sup>2</sup>. Totalt antall anoder som trengs for å beskytte 1,56m<sup>2</sup> med *coated* stål er 2,2 anoder, eller hele 3 anoder.

Dermed blir totalt antall offeranoder som må installeres sammen med ultralydsklammeret er 7 stk (med en levetid på 10 år).



Figur 66 - Utdrag fra excel-arket som viser totalt antall anoder

## 5 Diskusjon

Ultralydklammeret kunne i noen grad blitt modularisert. Transducerkasettene og transducerene er eksempler på deler som kan standardiseres. Forslaget presentert i denne oppgaven består av et klammer som tilpasses ulike rørdiametre fra 3" til 12". Siden det er krav til at klammeret skal sitte skikkelig (ingen tangentiell eller aksiell bevegelse) kan det bli trøblete å modularisere hele klammeret. En mulighet kan være å dele modulariseringen inn i seksjoner. Eksempler på det kan være at de tre innfestningspunktene kan standardiseres i fire ulike dimensjoner: En dimensjon som passer for rørledninger fra 3" til 4" i diameter og en annen dimensjon som passer fra 5" til 7" osv. Fjærkreftene må uansett kalkuleres for samtlige dimensjoner da slaglengden avhenger av rørledningens geometri.

Fjærkreftene gitt i oppgaven er kalkulert med hensyn på fiktive fjærkonstanter. I tillegg er vekt av klammer og friksjonskraft ignorert, som i praksis ikke vil gi et riktig bilde av situasjonen. Klammeret er på konseptnivå slik at det blir en hel del beregninger hvis alle kreftene skal kalkuleres i forhold til alle mulige rørdiametre. På samme måte som over kan det være hensiktsmessig å dele inn fjærene slik at de passer for et bestemt antall rørdiametre. De tre innfestningspunktene som er laget for å guide klammeret inn i rett posisjon i tillegg til å sørge for stabilitet. Det er essensielt at klammeret står stødig både før og etter den nedre delen av klammeret er låst på plass. I kombinasjon med fjærene er det foreslått å bruke et slags gummi material for å øke friksjonsfaktoren i tillegg til materialet kan komprimeres noe.

Hele canistermodulen (inkludert braketter) kan brukes til andre rørklammer som eksempelvis opererer med større rørledninger. Canisterkrybben er designet slik at canistermodulen lett kan plasseres i rett posisjon. Krybben kan i noen grad modulariseres, men undersiden må tilpasses resten av ultralydklammeret.

Forslag til materialvalg, *coating* og anodevalg er utarbeidet for hele ultralydklammeret. Det er brukt de minste anodene for å få en jevn fordeling rundt hele klammeret. 4 anoder for ultralydmodulen og 3 for canistermodulen. Hvis et mindre antall anoder er ønskelig kan anodene erstattes med større anoder med høyere masse. Når det er sagt er det heller ikke ønskelig å overbeskytte, eksempelvis ved å bruke anoder med lavest mulig potensial. Klammeret kan da bli utsatt for *cathodic disbonding*, som er nevnt i kapittel 2.4.2. I denne prosessen vil vedheftet til malingen svekkes. *Coatingen* vil da i verste fall løsne slik at stålet vil bli eksponert. Dette kan unngås ved å eksempelvis bruke tilstrekkelig filmtykkelse eller å

unngå anoder med veldig lave potensial. *Cathodic disbonding* vil ha en høyere rate for anoder med lavere potensial. (Knudsen, 2010)

Canistermodulen er for tung for at en ROV kan løfte den og installere den. Det var ikke snakk om mer enn 2 kg slik at mest naturlige ville vært å installere noen ekstra oppdriftselementer. Oppdriftselementer er laget av et relativt kostbart materiale, spesielt hvis den skal tåle store dyp. Alternativt kan operasjonen bli utført ved hjelp av wireline (hiv-kompensert vinsj), mens ROV'en guider ultralydklammeret på plass. (Bredal, 2014)

Levetiden til ultralydklammeret er noe som er avhengig av hvor lenge den skal stå på havbunnen. Hvis det er tenkt å bruke klammeret til å monitorere rørledninger, hvor klammeret i lengre tid er utsatt for korrosjonsangrep, er det hensiktsmessig å anta 10 års levetid. Ved inspeksjonsoperasjoner, som kun er nedsenket i sjøvann i en begrenset antall periode, vil ikke klammeret være like utsatt for korrosjonsangrep. Det kan samtidig argumenteres hvorvidt det er hensiktsmessig å bruke et slikt klammer for en rask inspeksjon. Det ville nok vært lettere og rimeligere å bruke eksempelvis en ROV med et eget ultralydverktøy.

Det ble brukt ANSYS Workbench til å simulere 300 bar trykk på canisterflasken.

Utnyttelsesfaktoren på 99,3% er veldig høy, men fortsatt innenfor kravet. Det er mulig å enten øke godstykkelsen eller endre material for å redusere jevnførende spenning. Det kan være gunstig med tanke på å legge inn sikkerhetsfaktorer.

## 6 Konklusjon

- Korrosjonsmonitoreringssystemet består av et ståklammer som kan installeres ved hjelp av en hydraulisk sylinder. I sammenstillingen er det satt sammen en *receptacle-forbindelse* hvor formålet er å bruke en hydraulisk hot stab til låse klammeret med.
- Korrosjonsmonitoreringssystemet skal installeres i to faser. Først installeres selve ultralydklammeret ved hjelp av en ROV (i tillegg til å lukke klammeret). Deretter må farkosten opp igjen for å hente canistermodulen. Denne modulen installeres på toppen av ultralydklammeret (modul 1).
- De 6 transducerkasettene består av 9 transducere hver (54 totalt) og er installert i en klokkeposisjon.
- Ultralydklammeret hviler på rørledningen i tre innfestningspunkt.
- Transducerkasettene vil aldri være i kontakt med rørledningen, men vil være såpass nærme rørledningen at målesignalene fortsatt blir gode.
- Foreslått valg av *coating* og anodemasse er tatt med hensyn på 10 års levetid.
- Canisterflasken har en utnyttelsesfaktor på 99,3% uten en sikkerhetsfaktor.
- Joule-Thomson effekten kan føre til store temperaturendringer i rørledningen som igjen kan få følger for korrosjonsmonitoreringssystemet. Diameteren av rørledningen vil enten bli ekspandert eller komprimert avhengig av temperaturen.
- Med temperaturendringer tatt i betraktning er det designet et fjærbelastet klammer, som også tar høyde for ovalisering av rørledninger.
- Det er designet en fjærbelastet låsmekanisme slik at det er mulighet for å fjerne den hydrauliske sylindere hvis det ønskes.

## 6.1 Videre arbeid:

- Testobjektene under absorpsjonstesten kunne blitt testet ytterligere for å sjekke at metningspunktet for lav temperatur er forskjellig fra høy temperatur.
- Sikkerhetsfaktor for canisterflasken er ikke spesifisert (satt til 1) i denne oppgaven. Ønsket sikkerhetsfaktor må finnes i henhold til standard. Canisterflasken må med andre ord redesignes i henhold til standarder og trykktestes før den kan tas i bruk.
- Videreutvikle låsmekanismen. Det forventes at det utføres en iterativ revidering av låsmekanismen før den er klar for produksjon.
- Fokuserer på modularisering. Det er deler i denne sammenstillingen som kan brukes for andre rørdiametre.
- Redusere vekt av korrosjonsmonitoreringssystemet ved å implementere flere oppdriftselement eller redusere godstykkelse på overdimensjonerte stålplater.

## 7 Referanser

12944-5, I., 2007. *ISO 12944-5: Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint systems. Part 5: Protective paint systems*, s.l.: the International Organization for Standardization.

Baltzersen, Ø., 2014. *Mailkorrespondanse og møter* [Intervju] (- jan-juni 2014).

Bardal, E., 2001. *Korrosjon og korrosjonsvern*. s.l.:Tapir Akademisk.

Berg, D., 2013. *ANALYSE AV LØSNINGER FOR KORROSJONSOVERVÅKNING I UNDERVANNSRØRLEDNINGER BASERT PÅ RØRKLAMMER*, Trondheim: s.n.

Bredal, J. K., 2014. *Stab, Receptacle, ROV*. Trondheim: Jan Kåre Bredal.

Cengel, Y. A. & Boles, M. A., 2011. *Thermodynamics, An Engineering Approach*. 7. utgave red. New York: McGraw-Hill.

Credence Gas Services, L., 2014. *Credence Gas Services, LLC*. [Internett]  
Available at: <http://www.credencegasservices.com/cgs.php?ID=4>  
[Funnet 10 Mai 2014].

Doctors, C., u.d. *Iron E-pH (Pourbaix) Diagram*. [Internett]  
Available at: <http://www.corrosion-doctors.org/Corrosion-Thermodynamics/Potential-pH-diagram-iron.htm>

Heier, E., 2013. *Pipelines for offshore applications – different concepts and material*. Trondheim: Technip.

Johnsen, R., 2005. *Corrosion-/Erosion Monitoring Systems*. Trondheim: s.n.

Johnsen, R., 2007. *Offshore prosessanlegg Materialvalg*, Trondheim: Inst. of Engineering Design and Materials.

Johnsen, R., 2011. *Cathodic Protection*, Trondheim: Inst. of Engineering Design and Materials.

Johnsen, R., 2011. *Cathodic Protection*, Trondheim: NTNU.

Knudsen, O. Ø., 2010. *Corrosion protection by organic coatings*. Trondheim: NTNU.

Lindaas, J. C., 2002. *Kompendium i undervannsteknologi*. Haugesund: Høgskolen Stord/Haugesund.

NDT-ResourceCenter, 2013. *NDT-ResourceCenter Piezoelectric Transducers*. [Internett]  
Available at: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/piezotransducers.htm>  
[Funnet 19 Desember 2013].

NDT-ResourceCenter, 2013. *NDT-ResourceCenter Transducer Types*. [Internett]  
Available at: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/transducertypes.htm>  
[Funnet 19 Desember 2013].

NDT-ResourceCenter, 2013. *NDT-ResourceCenter\_Basic Principles of Ultrasonic Testing*. [Internett]  
Available at: [c](#)  
[Funnet 19 Desember 2013].

Nisancioglu, K., 2012. *Corrosion basics and engineering*. s.l.:Institutt for teknisk elektrokjemi - NTNU.

Oceaneering, 2013. *Millennium Plus ROV*. [Internett]  
Available at: <http://www.oceaneering.com/rovs/rov-systems/millennium-plus-rov/>  
[Funnet 14 05 2014].

Piezo\_Institute, 2013. *PiezoInstitute*. [Internett]  
Available at: <http://www.piezoinstitute.com/about/whatispiezo/indexv3.php>  
[Funnet 19 Desember 2013].

Sangesland, S., 2014. *Trykkbegrensing: 150 - 250 bar (Kristin)*. Trondheim: s.n.

Sensorlink, u.d. *Ultramonit - High accuracy pipeline corrosion monitoring and wall thickness measurement*.  
[Internett]  
Available at: <http://sensorlink.no/corrosion-erosion/ultramonit/>

Skarpenord, 2014. *Skarpenord CorrosionAS*. [Internett]  
Available at: <http://www.skarpenord-corrosion.no/index.php?id=1933>  
[Funnet 29 Mai 2014].

SNL, 2005-2007. *Store norske leksikon*. [Internett]  
Available at: <http://snl.no/inversjonstemperatur>  
[Funnet 11 Mai 2014].

Spring, L., 2014. *Lee Spring*. [Internett]  
Available at: [http://www.leespring.com/uk\\_index.asp?](http://www.leespring.com/uk_index.asp?)

Støvneng, J. A., 2014. *NTNU(videoforelesning)*. [Internett]  
Available at: <http://video.adm.ntnu.no/openVideo/pres/52dff787cbdf6>  
[Funnet 15 Mai 2014].

Tarjei Rommetveit, R. J. N. U. o. S. a. T. -. N. & Øystein Baltzersen, S. A., 2008. *USING ULTRASOUND MEASUREMENTS FOR REAL-TIME PROCESS CONTROL OF PIPELINES AND PROCESS EQUIPMENT SUBJECTED TO CORROSION AND/OR EROSION*, New Orleans: NACE.

Øystein Baltzersen, T. I. W. R. J., u.d. *Wall thickness monitoring of pipelines using multichannel ultrasound*. s.l., s.n.

## Vedlegg

### Vedlegg A

1. Joule-Thomson excel-ark
2. HYSYS-fil
3. Eksperimentelt arbeid - absorpsjon excel-ark
4. Eksperimentelt arbeid - korrosjon excel-ark
5. Matematisk modell for anodekalkulasjon
6. 3D DAK-modeller og 2D-tegninger
7. ANSYS prosjekt

### Vedlegg B

Forstudierapport

### Vedlegg C

1. ROV
2. Titan manipulatorarm
3. Hydrauliske hot stabs
4. Hydrauliske receptacles

### Vedlegg D

Komposisjon naturgass og skjermbilder fra simulering

### Vedlegg E

Malingssystem

### Vedlegg F

Galvanisk serie, Evans diagram uten CP, Evans diagram uten CP,  
Pourbaix diagram



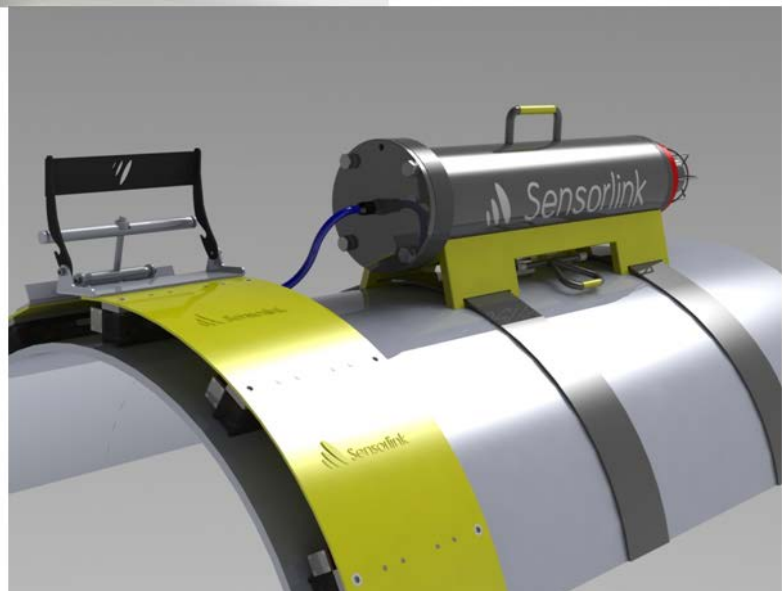
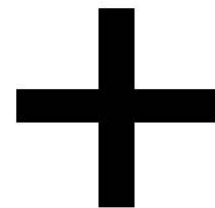
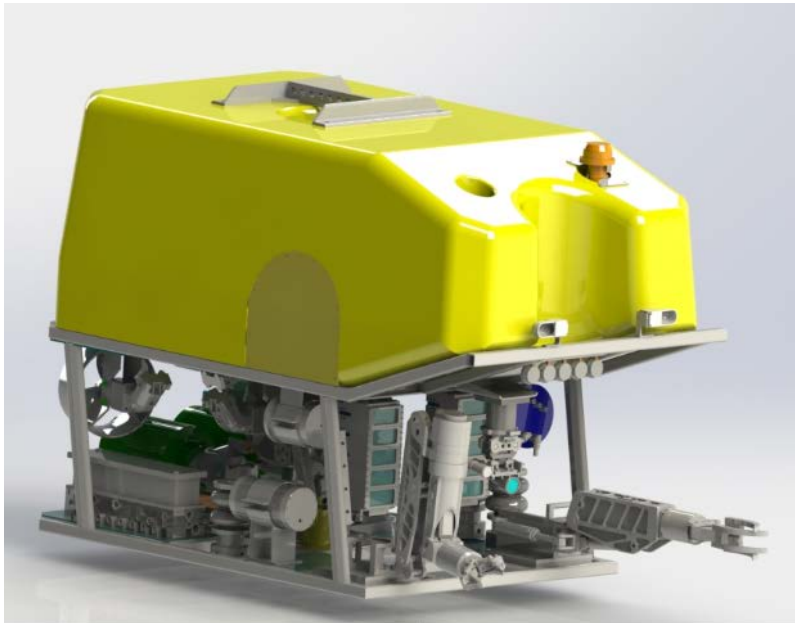
## **Vedlegg G**

1. Pristilbud, Astrup
2. Datablad for POM
3. Datablad for PEEK
4. Datablad for PUR

## **Vedlegg H**

Risikovurdering

## ROV basert multi-sensor verktøy for inspeksjon og overvåkning av undervannsrørledning



**Forstudierapport for Masteroppgaven våren 2014**

**Daniel Berg og Christer Moe**

## Innholdsfortegnelse

|   |   |
|---|---|
| ROV basert multi-sensor verktøy for inspeksjon og overvåkning av undervannsrørledning ..... | 2 |
| 1 Bakgrunn .....  | 3 |
| 2 Prosjektoppgave .....   | 3 |
| 2.1 Mål .....   | 4 |
| 2.2 Metode .....  | 4 |
| 2.2.1 Litteraturkilder .....  | 5 |
| 2.2.2 Milepæler .....   | 5 |
| 3 Vedlegg .....   | 2 |
| 3.1 WBS .....   | 2 |
| 3.2 Gantt .....   | 2 |

## 1 Bakgrunn

Rør og rørledninger er viktige deler av infrastrukturen til olje- og gassproduksjonsfelt. Svikt i disse komponentene vil ha en direkte innvirkning på driften. Operatørene må derfor iverksette omfattende vedlikeholdsprogram for å sikre at systemene er operert innenfor trygge grenser.

Hovedproblemet for rørledninger er nedbrytningsmekanismer i form av mekaniske påkjenninger i tillegg til korrosjon/erosjon.

De mest brukte metodene for å oppdage slike problem er bruken av visuell utvendig inspeksjon, gjerne med videokamera eller høgfrekvens sonar. Innvendig inspeksjon ved bruk av innebygd inspeksjonsverktøy er også en metode som er utbredt. Disse metodene er godt beskrevet i åpen litteratur. Nye teknologier og standardiseringer innen datakommunikasjon og grafikk har lagt grunnlaget for konsept innen petroleumsindustrien som ofte er referert til som "Integrerte Operasjoner". Disse konseptene er ofte implementert samtidig som utviklingen øker. I fagområdet som omfatter inspeksjon og overvåking har rimelige kommunikasjon- og sensorteknologier lagt grunnlaget for nye konsept, hvor overvåking kan bli hyppigere brukt enn før. Innenfor petroleumsindustrien forventer man at denne tilgjengeligheten på rimelige kommunikasjon- og sensorteknologi vil føre til en forandring hvor flere ressurser vil bli brukt på observasjon, og mindre på inspeksjon. Drivkraften er i stor grad påvirket av motivasjonen til å drive olje- og gassfeltene mer kostnadseffektivt. I de fleste tilfeller vil automatisert overvåking kreve mindre personell sammenlignet med inspeksjonsoppdrag for like formål, og vil på den måten redusere kostnadene.

## 2 Prosjektoppgave

### Design/utvikling

- 1) Benytte og videreutvikle konseptet utviklet i forprosjekt (Daniel Berg) for installasjon med ROV ned til 3000m dyp. For Daniel: løsning begrenset til å gjelde for rørdimensjoner fra 12" til 30". For Christer: løsning begrenset til å gjelde for rørdimensjoner fra 3" til 12".

### Kalkulasjoner/simuleringer:

- 2) Belastninger forårsaket av 3000 meters vanddyb på alle komponenter.
- 3) Designe en eller flere trykkbeholdere, optimere design/dimensjonering, fortrinnsvis ved hjelp av finite elementers metode.
- 4) Se på effekten av temperaturveksling (fra normal drift til nedstengning og påfølgende oppstart). FEM analyse vil være foretrukket metode for kalkulasjoner.
- 5) Langsiktige effekter på materielaler (polymerer).

### Lab forsøk:

- 1) Velge noen relevante polymerer for testing i lab (nedsenktet i vann eller silikonolje for å måle absorpsjon som funksjon av tid). Arbeidet avhenger av tilgang til nødvendig labutstyr, eksempelvis autoclave.
- 2) Gjennomføre et korrosjonsekperiment i lab med ultralydmonitorering  
Sensorlink A/S stiller med lab og prøveobjekter for testing.

### Designkrav/rammebetingelser:

- Systemet skal kunne installeres av en ROV.
- Ingen tangentiell eller aksiell bevegelse på transducere tillates.

- Innsamling av data enten ved bruk av akustisk modem eller opphenting av canister ved hjelp av ROV.
- Systemet skal designes for bruk i korrosivt miljø, en kombinasjon av materialvalg, katodisk beskyttelse og maling må vurderes.
- I den grad det er lønnsomt skal systemet modulariseres med formål om tilpasning til ulike rørdimensjoner
- Sjøvannstemperatur fra -3C° til 30C°.
- Maks fluidtemperatur i rør: 100C°.

## 2.1 Mål

Design en modulær ROV installerbar løsning for korrosjonsmonitorering/inspeksjon basert på rørklammer som imøtekommer Sensorlinks krav til utforming, funksjon og kostnad. Dette innebærer at alle komponenter dimensjoneres for å takle trykkbelastning inntil 3000m havdyp. Materialene som benyttes må også takle definert temperaturvindu med tanke på funksjon, belastning og korrosjonsproblematikk.

## 2.2 Metode

For å sikre god prosjektstyring startes prosjektet med et forstudie der oppgaven analyseres og brytes ned i mindre deloppgaver. WBS og Gantt diagram benyttes som hjelpemidler i prosjektstyringen. I Gantt diagrammet er det også lagt inn milepæler for å sikre at tidsskjemaet overholdes. Det forventes en iterativ revidering av både WBS og Gantt i form av mer detaljer ettersom prosjektperioden forløper.

For å forenkle samarbeidet kommer prosjektgruppen til å benytte "Microsoft Skydrive". I tillegg til å fungere som en nettsky for lagring av prosjektrelaterte dokumenter er det også mulig å opprette interaktive tekstdokumenter(word) der to eller flere deltakere kan arbeide synkront/parallelt. I tillegg til dette anses det som praktisk å opprette en mappe i "Dropbox" der prosjektdeltagerne og Sensorlink kan dele dokumenter, dac-filer etc.

Strategien for prosjektmetodikken er å holde møter hvor arbeidsoppgaver drøftes og delegeres. Påfølgende møte startes med revidering av individuelt arbeid før nye arbeidsoppgaver igjen drøftes og delegeres.

Etter at forstudierapporten er ferdigstilt vil det utføres et litteratursøk for å innhente nødvendig informasjon slik at oppgaven kan utføres på en tilfredsstillende måte.

Designarbeidet, som er hovedoppgaven i dette prosjektet, tar utgangspunkt i det dykkerinstallerbare konseptet utviklet i forprosjektet. For å videreutvikle dette til et ROV installerbart system anses det som nyttig å søke ekstern veiledning hos ROV og ROV-verktøy produsenter i tillegg til Sensorlink. Hensikten med dette er å innhente informasjon og kunnskap om prosedyrer ved ROV installasjoner og utfordringer med dette, hvilke type verktøy finnes som hyllevarer etc. Designarbeidet vil bli utført i dacprogrammet SolidWorks.

Rapportskrivingen vil foregå parallelt med øvrig arbeid. På grunn av at designarbeidet krever tett samarbeid med Sensorlink vil det være fordelaktig å ha annet arbeid i påvente av møter, informasjon etc., for å sikre en stabil fremdrift i prosjektarbeidet.

### 2.2.1 Litteratkilder

SCOPUS

Sensorlink

Lærebøker

Bibliotek/BIBSYS

Google search/scholar

Eventuelt andre kilder for relevante vitenskaplige artikler.

### 2.2.2 Milepæler

21.01.2014 - Masteroppgave, oppstart

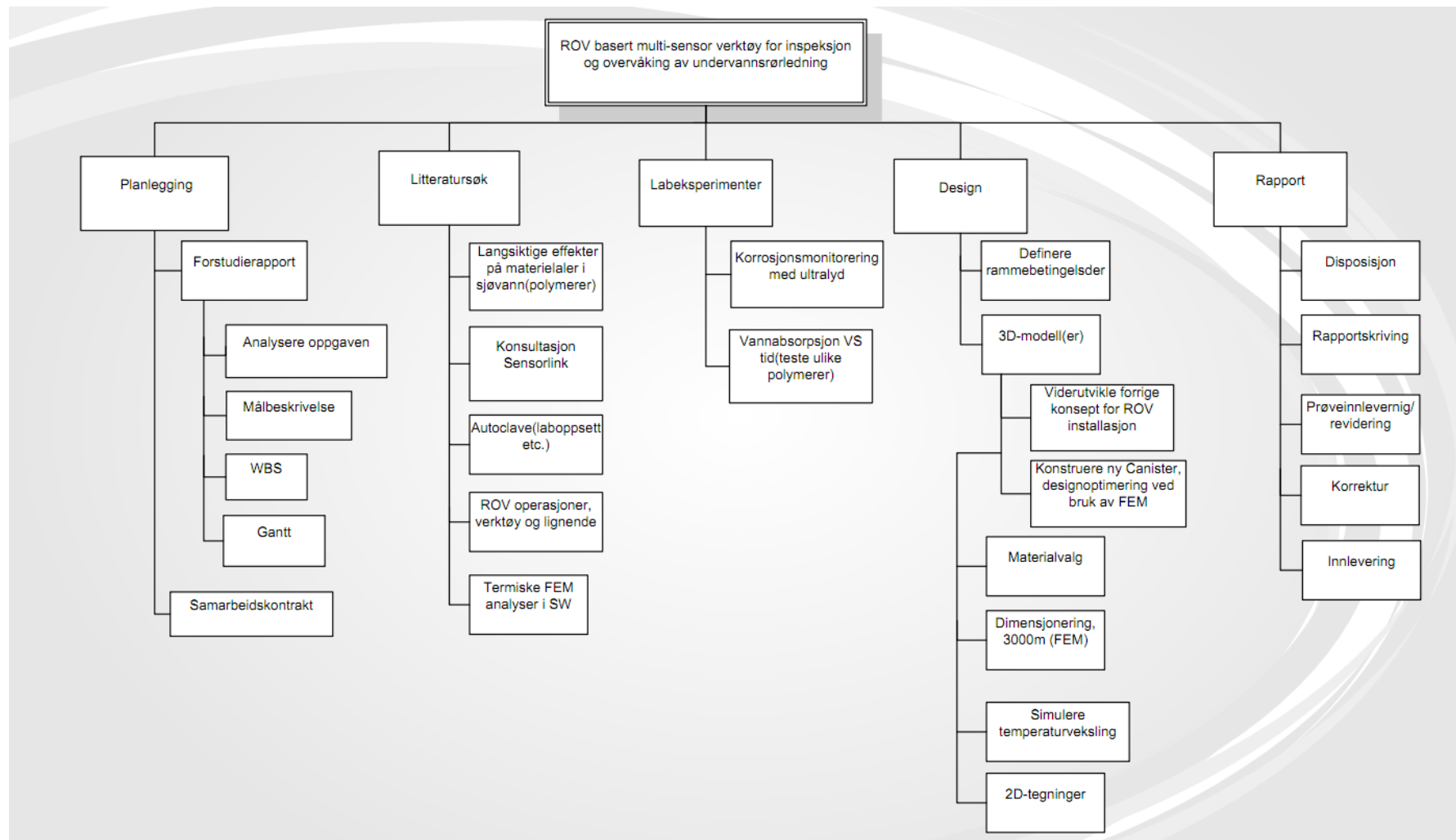
28.01.2014 - Innlevering av forstudierapport

16.05.2014 - Prøveinnlevering

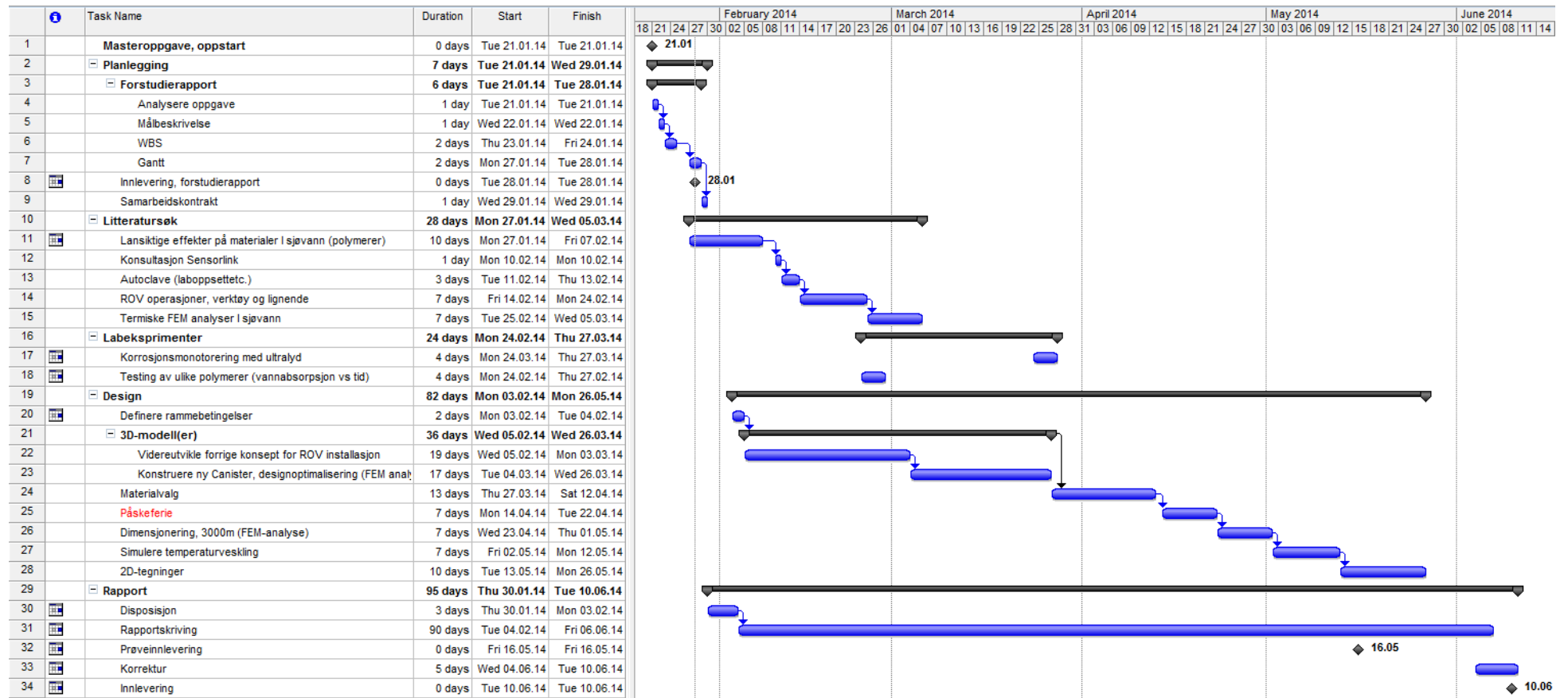
10.06.2014 - Innlevering av Masteroppgave

### 3 Vedlegg

#### 3.1 WBS



### 3.2 Gantt







# **ROV Specification Sheet**

## **Millennium 36/37**



**ROV Specification Sheet**

Rev.1

Page 2 of 4

**Millennium 36/37**

|                        |   |                                |
|------------------------|---|--------------------------------|
| <b>Document No.</b>    | : |                                |
| <b>Title</b>           | : | <b>ROV SPECIFICATION SHEET</b> |
| <b>Project</b>         | : | <b>MILLENNIUM 36/37</b>        |
| <b>Client</b>          | : |                                |
| <b>Client P.O.</b>     | : |                                |
| <b>Client P/N</b>      | : |                                |
| <b>Client S/N</b>      | : |                                |
| <b>Oceaneering S/N</b> | : |                                |

"This document is the property of Oceaneering International Inc., and may not be used for any purpose unless authorized in writing by Oceaneering and which, upon demand, shall be returned to Oceaneering. The document contains Oceaneering confidential, proprietary information and shall not be copied, reproduced, used, transferred to other documents or disclosed to others for any purpose unless specifically authorized in writing by Oceaneering."

| <b>Rev.</b> | <b>Reason for issue</b> | <b>Date</b> | <b>By</b> | <b>Check</b> | <b>Approval</b> |
|-------------|-------------------------|-------------|-----------|--------------|-----------------|
| 1           | Issued for approval     | 02.05.14    | MH        | FE           | NHS             |

## Millennium 36/37

**ROV SYSTEM – General****Weights (maximum)**

- Vehicle 4,000 kg (8,810 lbs)
- Tether Management System/Cage 2,720kg (6,000 lbs)
- Umbilical Winch 33,000 kg (72,750 lbs)
- Control Container NA Built into ship
- Stores Container NA Built into ship
- Handling System 40,000 kg (88,100 lbs)
- Optional Auxiliary Power Pack/Clean Power Unit 1,200 kg (2,640 lbs)

**Power Supply and Requirements**

- Vehicle 220 HP / 164 kVA
- Tether Management System 110 HP / 82 kVA
- Umbilical Winch 140 HP / 103 kVA
- Auxiliary Power Unit 8 kVA
- Handling System Incl. in winch HPU

**Main Electric Power Supply**

- Voltage 440 VAC
- Frequency 60 Hz

**Operational Radius from TMS**

200 meters / 656 feet (standard)  
600 meters / 2,033 feet (optional)

**VEHICLE**

**Manufacturer/Type** Oceaneering/Millennium

**Maximum dimension**

- Length 2.89 m (114 in)
- Width 1.53 m (61 in)
- Height 1.90 m (75 in)

Payload 385 kg (850 lbs)

Vehicle Frame Carrying Load (under slung) 3000 kg (6600 lbs)

Depth Rating 3050 m (10,000 ft)

Propulsion Performance:

- Forward Thrust/Speed 725 kg/3.5 knots
- Aft Thrust/Speed 725 kg/3.3 knots
- Lateral Thrust/Speed 725 kg/2.5 knots

Turning Rate 30 deg./s

Thrust Lifting Capacity-Front of Vehicle 500 kg (1100 lbs)

No`'s of Thrusters and Positions

4 x 45° vectored

4 x vertical

**AUTO FUNCTIONS**

- Auto Heading
- Auto Depth
- Auto Altitude

**HYDRAULIC POWER SYSTEM**

Main Hydraulic Power

2 x 110 HP (220 HP Total)

\*Redundant electro-hydraulic system

**ELECTROHYDRAULIC INTERFACE****for Tooling Systems**

- 7 x RS232 and 3 x RS485
- DC outlet (12/24 V)
- AC outlet (115 V)
- 2 x Spare Proportional Pressure Valves
- Spare video lines

**MANIPULATORS**

**Manufacturer** Schilling

**Options:**

Titan 4

- Control Method Master Slave
- Type of Jaws: Parallel / 3 finger option
- Recess for T-Bars/Handles(mm) 10-20

Rigmaster

- Control Method Rate
- No. of Functions 5
- Type of Jaws 4 finger claw
- Recess for T-Bars/Handles (mm) 10-20

**VIDEO SYSTEM**

TV lines for vehicle, with composite signal (qty) 8

**Low Light Camera**

ROS Navigator or suitable substitute

**Pan & Tilt Camera**

OE 1366 (Z/F) or suitable substitute

\* Separate light on pan & tilt

**Aft Camera**

DeepSea Power and Light B & W

\* Separate light for rear camera

**Schilling Manipulator Camera****LIGHTING**

No`s. of Lights on Vehicle

- Up to 10 x 250W (ADJ.)

Type and capacity

- Oceanlight LED

Total lighting capacity - Vehicle up to 2500 w

**SONAR**

**Manufacturer** Kongsberg Maritime Inc

**Type** 1071

Frequency 675 kHz

Range – 100 meters

Resolution (%) 1,5

Scanning Sector 360° in 30° increments°

Scanning Speed 1 shot pr. 1-4 step

**SENSORS**

- Altimeter (33 meter range)
- TSS Meridian Gyro (survey grade)
- Honeywell Compass (backup)
- Paroscientific digiquartz

## Millennium 36/37

**TOOLING**

- Hardline Cutter – 32mm (1.25 in)
- Softline Cutter – 38mm (1.5 in)
- Grinder
- Suction Kit
- Duplex Intervention Pump

**UMBILICAL**

**Type** Armored Electro-Optical

**Manufacturer** Nexans

- Length 3,587 m (11,760 ft)
- Diameter 41 mm (1.61 in)
- Construction – Steel Armor
- Weight 3.341 kg/km in air (2.25 lbs/ft)
- Breaking strength 67,000 kg (150,000 lbs)
- SWL 16,300 kg (36,000 lbs)
- Cable Ins. Material Hytrel/Polyurethane
- Power Conductors – 9 each
- Telemetry and Video – 12 x fiber
- Spare Conductors – 5 each. 1 shielded quad

**TETHER**

**Type** Power and Fiber

**Manufacturer** Nexans/Cortland

- Length 300 m (mill36) 850 m (mill37)
- Diameter 30mm
- Construction Aramid
- Weight 245 kg/km in seawater
- Breaking strength 90 KN
- Power Conductors – 8 each
- Fibers – 8 each(nexans) 4 each(cortland)
- Spare Conductors (stwp) – 1 each

**TETHER MANAGEMENT SYSTEM**

**Manufacturer** Oceaneering

**Type** Cage

**Maximum Dimensions**

- Length 3.91 m
- Width 2,22 m
- Height 3.79 m
- Tether capacity: 900 meter
- Thrusters for station keeping 2 off
- Cameras 2 x BW
- Lighting 2 x 250 w

**CONTROL CABIN**

**-Fully integrated into vessel**

- Control Stations – Pilot and Navigator
- Video monitors – 6 x Color
- Video logger
- Video text/graphics overlay
- Still Image Capture
- Intelligent Diagnostics (ROV & TMS)
- Web Based Streaming Video (Optional)

**WORKSHOP CONTAINER**

**-Fully integrated into vessel**

**UMBILICAL WINCH**

**Type** TRWV 10000HC

**Dimensions**

- Length 4,78 m (188 in)
- Width 2.45 m (96 in)
- Height 4.54 m (179 in)
- Manufacturer Rapp Hydema
- Line Pull 20,000 kg (44,100 lbs)
- SWL 20,000 kg (35,280 lbs)
- Brake Auto
- Storage (on drum) 3,506 m (11,500 ft)
- Line Speed:
- 55 meters per minute (standard)

**LARS**

**Type** HPL18 built into ship

**Dimensions**

- Length 16,15 m
- Width 5,34 m (96 in)
- Height 8,4 m (179 in)
- Manufacturer SEPRO
- SWL 18,000 kg

# VEDLEGG C2

**FMC**Technologies

## Schilling Robotics TITAN 4 Manipulator

**We put you first.  
And keep you ahead.**

Thousands of our manipulator systems are in use worldwide every day. TITAN manipulators are the highest quality system on the market for the dexterity and strength needed to withstand the industry's harsh and repetitive needs day after day.

- » Acute Precision Control
- » Durable Through the Harshes Conditions
- » Reliability Through the Harshes Conditions
- » Large Operating Envelope
- » High Lift-to-Weight Ratio
- » Depth Rating up to 7,000msw
- » Titanium Construction

The TITAN 4 is widely regarded as the world's premier servo-hydraulic remote manipulator system. Since 1987, these systems have been the industry standard for dexterous manipulator systems used in subsea applications, and are extensively used on ultra-heavy work class ROVs.

This arm has the dexterity and accuracy necessary to perform the fine movements needed for complex tasks. When this ability is combined with the manipulator's reach (1,922mm), payload capacity (122kg at full extension), and large operating envelope, the TITAN 4 offers unequaled performance in a wide range of subsea applications.





In-arm electronics are located in the forearm, increasing system reliability and minimizing electrical connections.

## Acute Precision Control

The manipulator's accuracy is limited only by the pilot's eye. The master controller includes a six-degree-of-freedom replica master arm that ensures comfortable, intuitive manipulator operation. Its movements are just as sharp whether it's moving a 5lb. object or moving a 250lb object.

The controller also contains function keys for selecting menu options and a display for viewing diagnostic and status information. The controller's advanced operational features are individual joint freeze, position scaling (altering the ratio of master arm movement to manipulator arm movement), password security, programmable stow/deploy routines, individual joint movement limits, incremental gripper movement, individual joint diagnostics, and automatic error checking.



The replica master arm ensures comfortable, intuitive operation.

## SPECIFICATIONS

|            |                     |
|------------|---------------------|
| Reach:     | 1,922mm             |
| Type:      | Position Controlled |
| Functions: | 7                   |
| Material:  | Primarily Titanium  |

### » Arm Specifications

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| Standard Depth:           | 4,000 msw |
| Extended Depth:           | 7,000 msw |
| Weight in air:            | 100kg     |
| Weight in water:          | 78kg      |
| Lift at full extension:   | 122kg     |
| Maximum lift, nominal:    | 454kg     |
| Standard Gripper Opening: | 99mm      |
| Grip Force, nominal:      | 4,092N    |
| Wrist torque, nominal:    | 170Nm     |
| Wrist rotate, cont.:      | 6-35rpm   |

### » Master Controller Specifications

|         |       |
|---------|-------|
| Length: | 470mm |
| Width:  | 177mm |
| Height: | 67mm  |
| Weight: | 3.7kg |

### » Electrical and Telemetry

|                          |                      |
|--------------------------|----------------------|
| Input Power, Controller: | 90-260VAC            |
| Input Power, Arm:        | 24 VDC               |
| Power, Controller:       | 6W start, 3W run     |
| Power, Arm:              | 6W start, 45W run    |
| Telemetry:               | RS-232 or RS-422/485 |

### » Hydraulic Requirements

|                         |                               |
|-------------------------|-------------------------------|
| Fluid:                  | Mineral, Glycol, or Synthetic |
| Viscosity:              | 10-200 cSt                    |
| Available Flow:         | 5.7 - 19 lpm                  |
| Max. Pressure:          | 3,000 psi                     |
| Max. Fluid Temperature: | 54°C                          |
| Fluid Cleanliness:      | ISO 4406 14/11                |



Colored diagnostic lights in the connector head indicate the status of electrical power delivery to the arm, master controller transmission to the arm, and arm responsiveness.

## Construction

The arm is constructed primarily of titanium for structural strength, light weight, corrosion resistance, and extraordinary resistance to damage from collisions. TITAN manipulators have a proven track record of reliability in the world's most demanding subsea environments.

## Operating Envelope

It is engineered to give its operators the largest range of motion in its class. This significant flexibility only enhances the arm's precision dexterity for exploration and recovery missions.



The in-arm electronics module features diagnostic lights that indicate system health.

## System Reliability

### Robust Power/Signal Connection

A SeaNet cable connects the arm to electrical power and telemetry, providing a robust, reliable attachment. The small diameter cable (8.9mm) is actively pressure balanced and oil filled. The connector head has spring-loaded contacts, and a positive locking feature eliminates accidental cable disconnection.

### Reliable In-Arm Electronics

All downside arm electronics are located inside the manipulator forearm. This configuration greatly reduces the number of electrical connections, simplifying service operations and increasing the system's ability to withstand shock.

### Quick, Easy Diagnostics

The SeaNet cable connector head contains bright LED status indicator lights that allow first-level diagnostics to be performed solely by visual inspection. The lights show that electrical power is being delivered to the arm, that the controller is transmitting to the arm, and that the arm is responding. This information lets the operator quickly determine where to begin troubleshooting, without removing connectors, applying a voltmeter, or opening sealed enclosures. The system also detects missing or reduced arm position sensor signals, and diagnostic lights on the in-arm electronics module indicate system health.



The titanium wrist camera can be ordered already installed on a new TITAN 4 manipulator system.

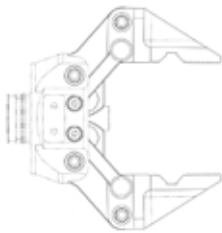
## Manipulator Compatibility

To create the best manipulators on the market, we took the most field proven manipulator technologies and used them repetitively throughout the system. The result is a simple, reliable system with high component commonality that minimizes spare part requirements. Many parts are interchangeable throughout the entire manipulator line: TITAN 4, ATLAS, RigMaster, CONAN, and ORION.

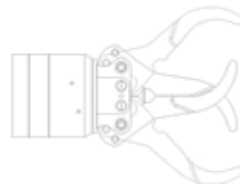
## Options and Accessories

- » Extended Depth Rating to 7,000msw
- » Spares Kit
- » Seal Installation Tool Kit
- » Technician's Tool Kit
- » Dual-Manipulator Configuration includes two manipulator arms and a single master controller with two replica master arms.
- » Radiation Hardening (up to  $1 \times 10^7$  rad gamma)
- » Titanium Wrist-Mounted Camera

## Gripper Options



4" Parallel



7.5" Three Finger Intermeshing

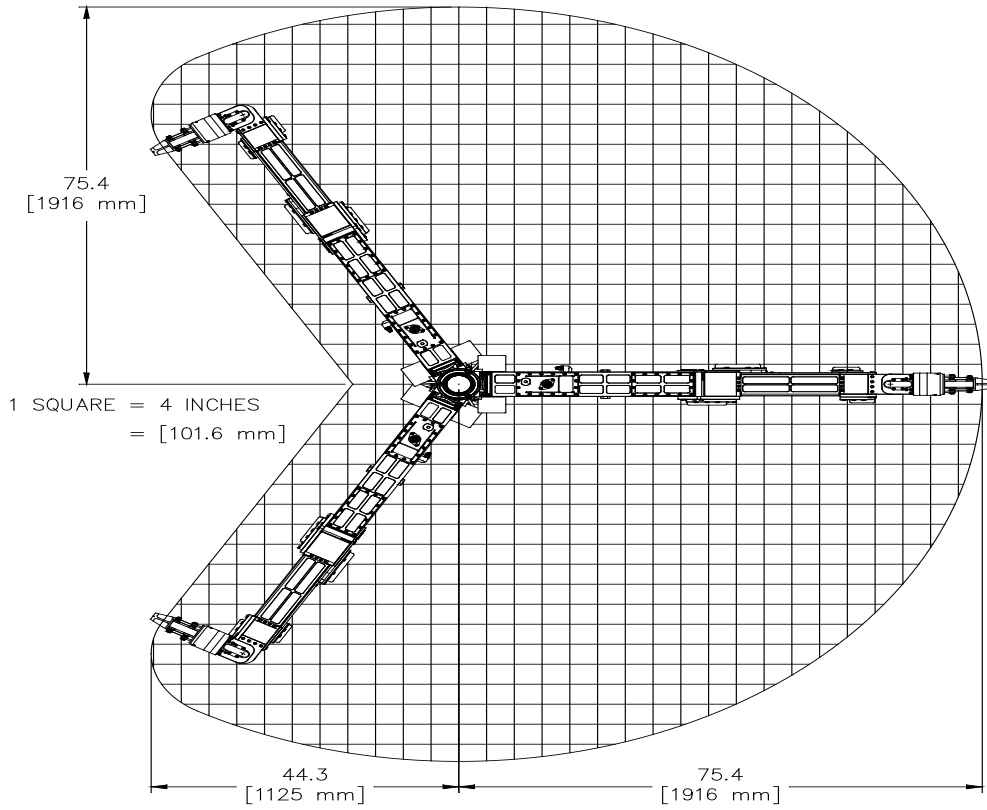


7.8" Four Finger Intermeshing

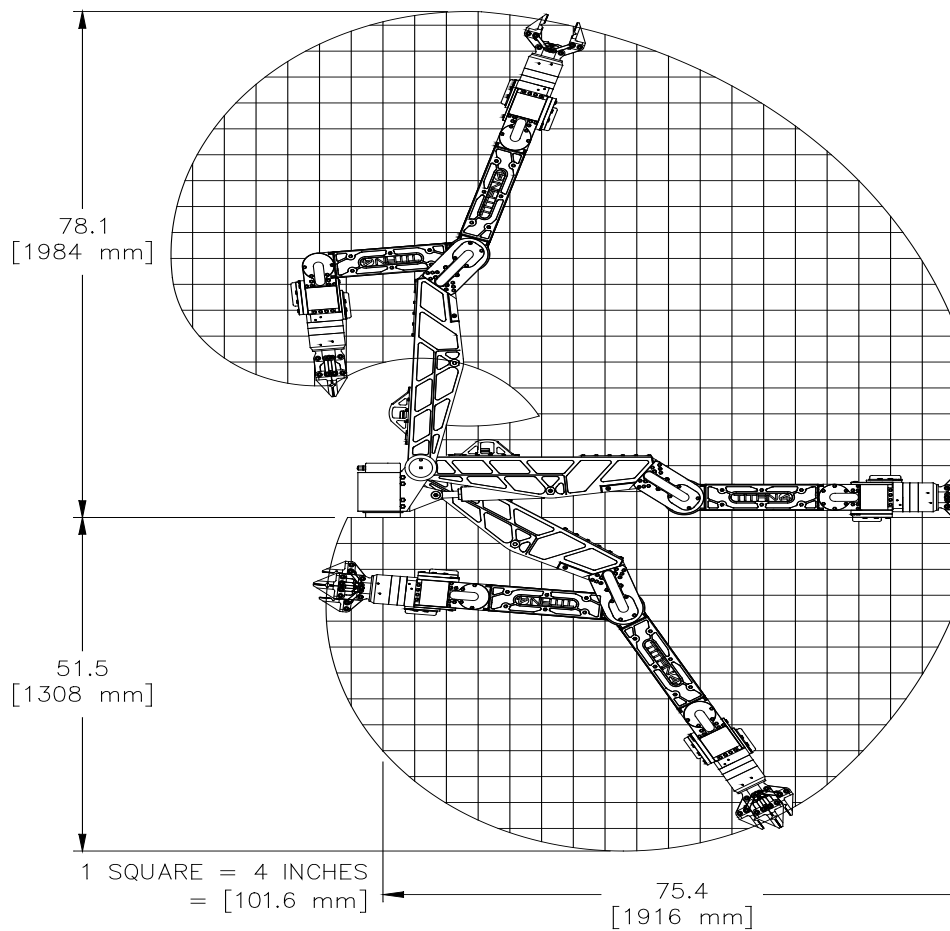


Dual TITAN manipulator configuration.



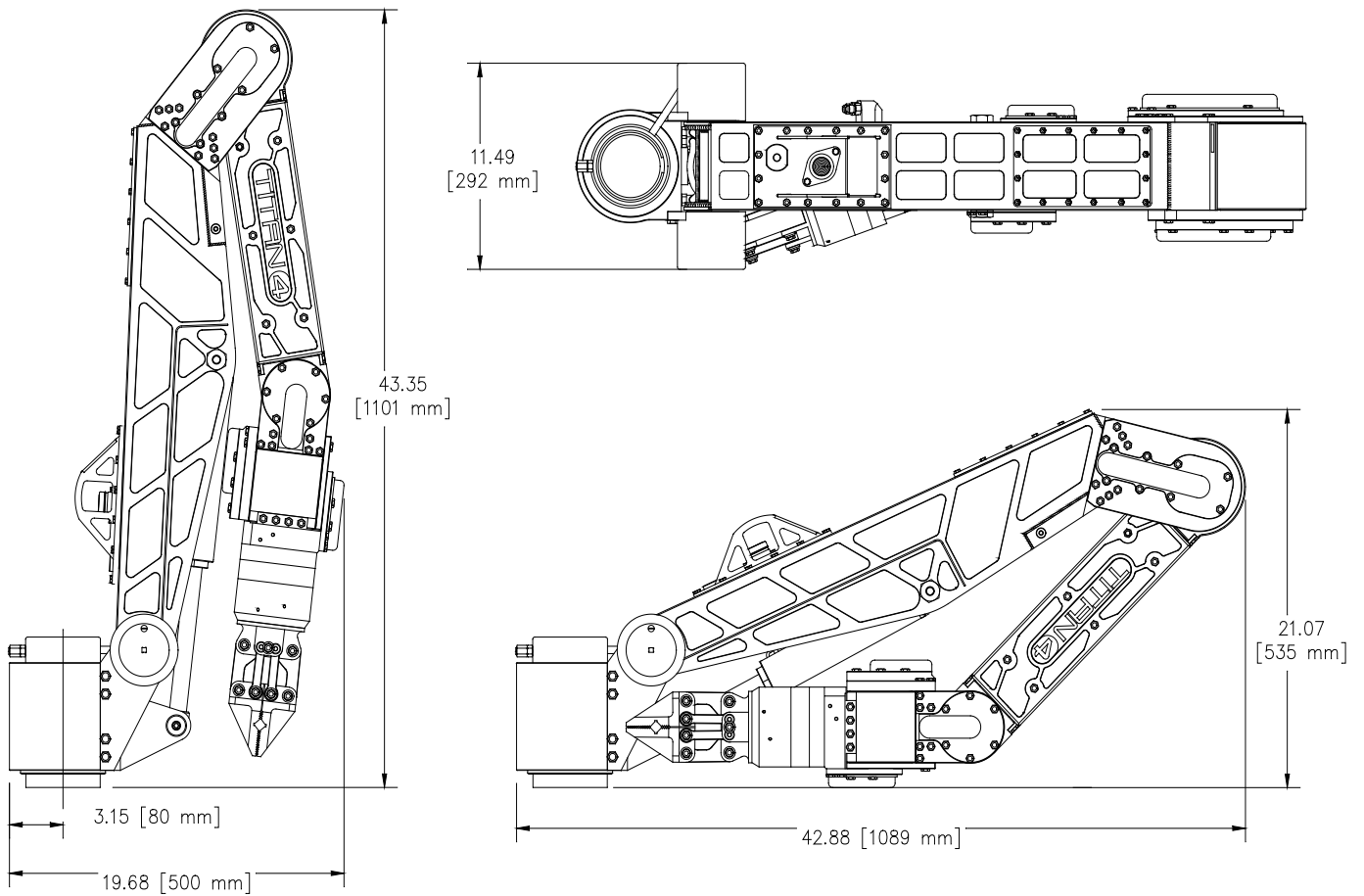


Range of Motion, Top View



Range of Motion, Side View

**We put you first.  
And keep you ahead.**



Stow Dimensions

## Hydraulic Hot Stabs - Ø35 mm (API 17D)

**Mechanica has developed a range of fluid connectors (Hot Stabs and receptacles) in accordance to the international standard API 17D.**

The hot stabs are available in three different versions; single port, dual port and quad port.

ROV handle in super duplex and flexible joint is standard (XO-handle or D-handle).

Dual and quad port stabs have integrated double acting check valves to minimize oil leakage and prevent water ingress into the ROV hydraulic system.

Bore and check valves are designed for high flow capacity.

All stabs have been thoroughly tested in-house and the quality is proven during several years of operation.

Alternative materials, hydraulic interfaces and increased maximum operating pressure are available to suit particular requirements.

### Features:

- ✓ **Low weight**
- ✓ **Low connection/disconnection forces**
- ✓ **Optimized flow/pressure drop capacity**
- ✓ **Field proven**
- ✓ **Heavy duty hydraulic seals**



### Technical Specifications, Mechanica Hot Stabs – Ø35mm (API 17D)

|   | Single Port API Stab | Dual Port API Stab w/checkvalves | Quad Port API Stab w/checkvalves |
|---|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Product no.:  | 86600-11             | 86600-21                         | 86600-41                         |
| Material (stab body):                                 | S165M (W.nr. 1.4418) | S165M (W.nr. 1.4418)             | S165M (W.nr. 1.4418)             |
| Hydraulic interface:                                  | 1 off 3/8" BSPP      | 2 off 3/8" BSPP                  | 4 off 1/4" BSPP                  |
| Max. operating pressure:                              | 690 bar / 10000 psi  | 690 bar / 10000 psi              | 690 bar / 10000 psi              |
| Dimensions (l x h x w):<br>(w/flex joint & XO-handle) | 88 x 475 x 111 mm    | 92,5 x 515 x 111 mm              | 100 x 593 x 111 mm               |
| Weight (air/submerged)<br>(w/flex joint & XO-handle)  | 4,0 / 3,5 kg         | 5,0 / 4,3 kg                     | 5,3 / 4,6 kg                     |

## Receptacles - Ø35 mm (API 17D)

**Mechanica has developed a range of fluid connector receptacles in accordance to the international standard API 17D.**

The receptacles are available in three different versions; single port, dual port and quad port.

All receptacles can be equipped with double acting check valves to minimize oil leakage and prevent water ingress into the hydraulic system.

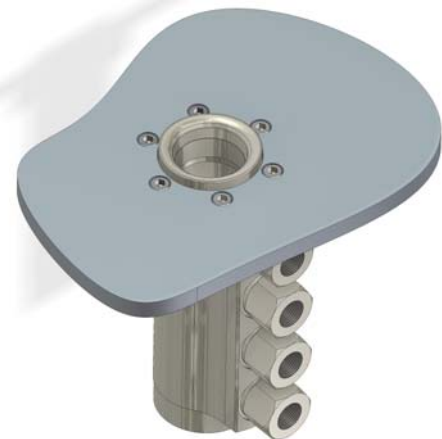
Our receptacles have been thoroughly tested in-house and the quality is proven during several years of operation.

A number of hydraulic interfaces are available to suit particular requirements.



### Features:

- ✓ **Low weight**
- ✓ **Low hot stab connection/disconnection forces**
- ✓ **Optimized flow/pressure drop capacity**
- ✓ **Field proven**
- ✓ **Wide range of hydraulic interfaces available**
- ✓ **Integrated check valves (optional on single port version)**



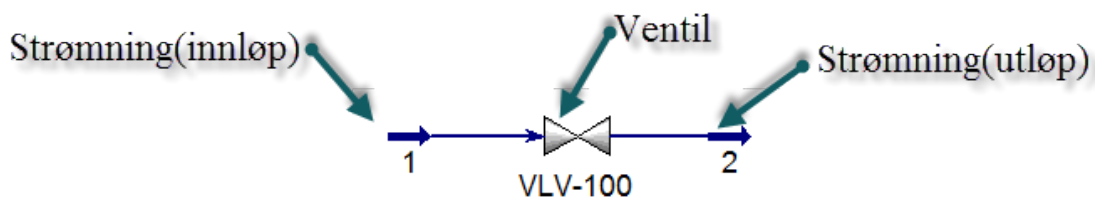
### Technical Specifications, Mechanica Receptacles – Ø35 mm (API 17D)

|                          | Single Port API Receptacle                                       | Dual Port API Receptacle   | Quad Port API Receptacle   |
|--------------------------|--|--|--|
| Product no.:             | 86700-10-003   | 86700-20-103   | 86700-40-103   |
| Material (stab body):    | Nitronic 50 (UNS S20910)   | Nitronic 50 (UNS S20910)   | Nitronic 50 (UNS S20910)   |
| Mechanical interface:    | Hole: Ø53 (recommended)<br>6 off M6 threads @ PCD66              | Hole: Ø53 (recommended)<br>6 off M6 threads @ PCD66              | Hole: Ø53 (recommended)<br>6 off M6 threads @ PCD66              |
| Hydraulic interface:     | 1 off 3/8" BSPP (standard)<br>(Alternative interfaces available) | 2 off 3/8" BSPP (standard)<br>(Alternative interfaces available) | 4 off 3/8" BSPP (standard)<br>(Alternative interfaces available) |
| Max. operating pressure: | 690 bar / 10000 psi  | 690 bar / 10000 psi  | 690 bar / 10000 psi  |
| Dimensions (l x h x w):  | 66 x 83 x 76 mm (wo/CV)  | 101 x 96 x 76 mm (w/CV)  | 170 x 102 x 76 mm (w/CV)   |
| Weight (air/submerged)   | 1,0 / 0,9 kg   | 1,6 / 1,4 kg   | 2,7 / 2,4 kg   |

Tabell 1 Komposisjon av naturgass

| Komponent     | Mol fraksjon |
|---------------|--------------|
| Nitrogen      | 0,025250     |
| Karbondioksid | 0,052619     |
| Metan         | 0,810051     |
| Etan          | 0,050269     |
| Propan        | 0,025340     |
| i-Butan       | 0,004000     |
| n-Butan       | 0,008301     |
| i-Pentan      | 0,002810     |
| n-Pentan      | 0,003520     |
| n-Heksan      | 0,003520     |
| n-Heptan      | 0,004690     |
| n-Oktan       | 0,004070     |
| n-Nonan       | 0,002030     |
| n-Dekan       | 0,003970     |

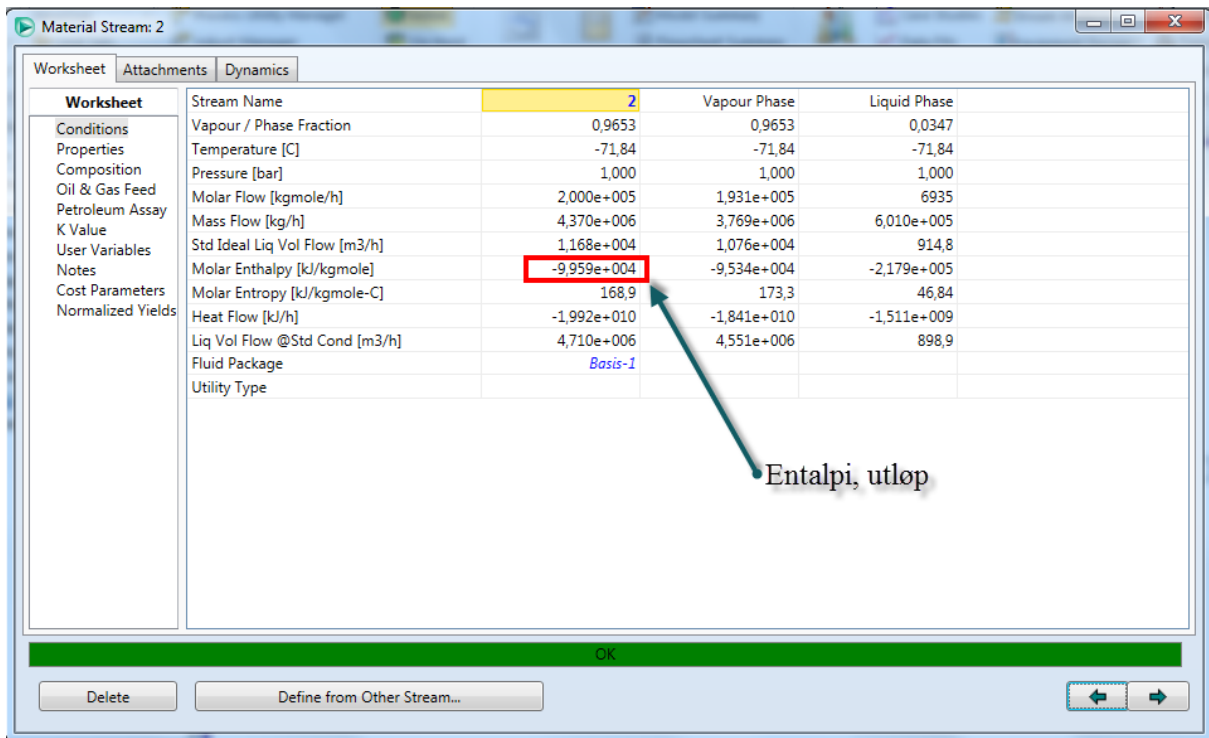
**Referanse:** Data for komposisjon er hentet fra øvingsoppgave(Ø6) I TPG4230 Feltutbygging. Komposisjonen er hentet fra Statoils Snøhvit-felt.



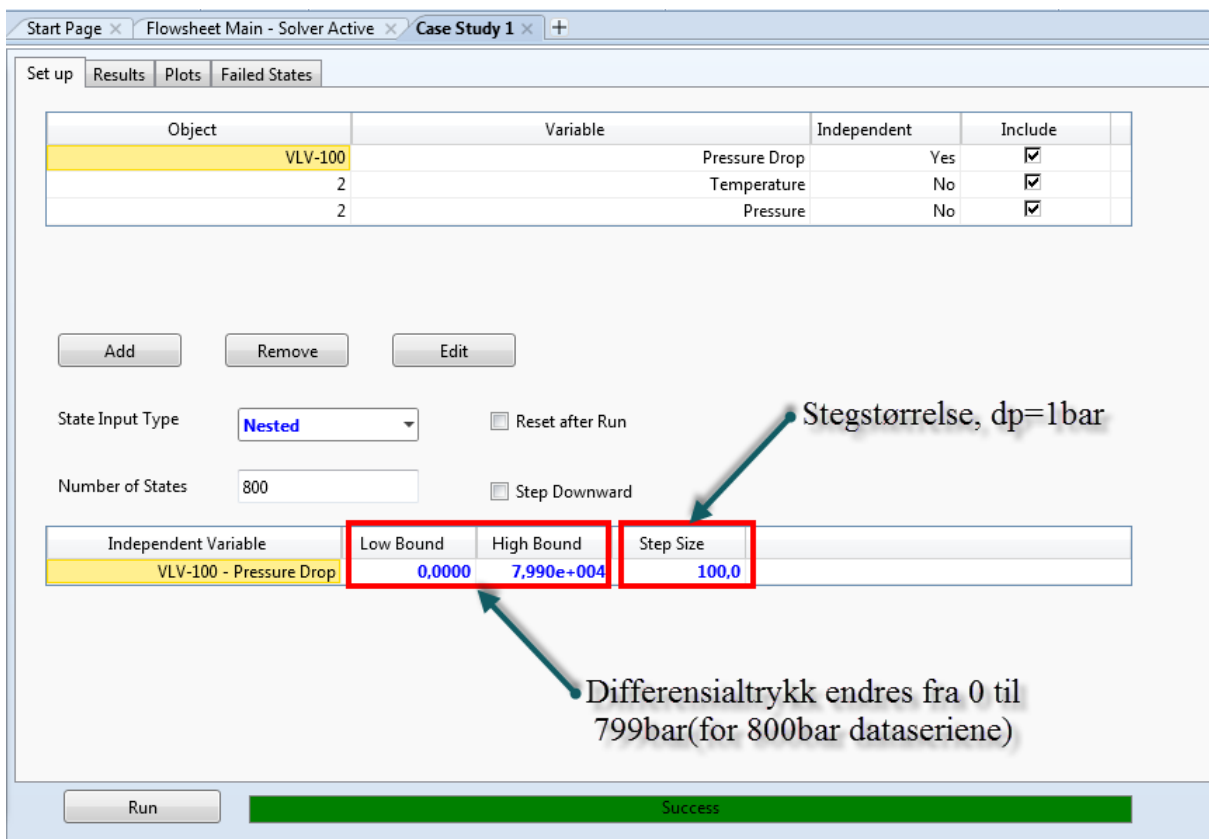
Figur 1 Flytdiagram av Hysys modell

| Worksheet                     | Attachments | Dynamics     |
|-------------------------------|-------------|--------------|
| <b>Worksheet</b>              |             |              |
| Stream Name                   | 1           | Vapour Phase |
| Vapour / Phase Fraction       | 1,0000      | 1,0000       |
| Temperature [C]               | 25,00       | 25,00        |
| Pressure [bar]                | 800,0       | 800,0        |
| Molar Flow [kgmole/h]         | 2,000e+005  | 2,000e+005   |
| Mass Flow [kg/h]              | 4,370e+006  | 4,370e+006   |
| Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 1,168e+004  | 1,168e+004   |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]    | -9,959e+004 | -9,959e+004  |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C]   | 120,8       | 120,8        |
| Heat Flow [kJ/h]              | -1,992e+010 | -1,992e+010  |
| Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h] | 4,710e+006  | 4,710e+006   |
| Fluid Package                 | Basis-1     |              |
| Utility Type                  |             |              |

Figur 2 Data fra innløp



Figur 3 Data fra utløp



Figur 4 Oppsett for Case Study

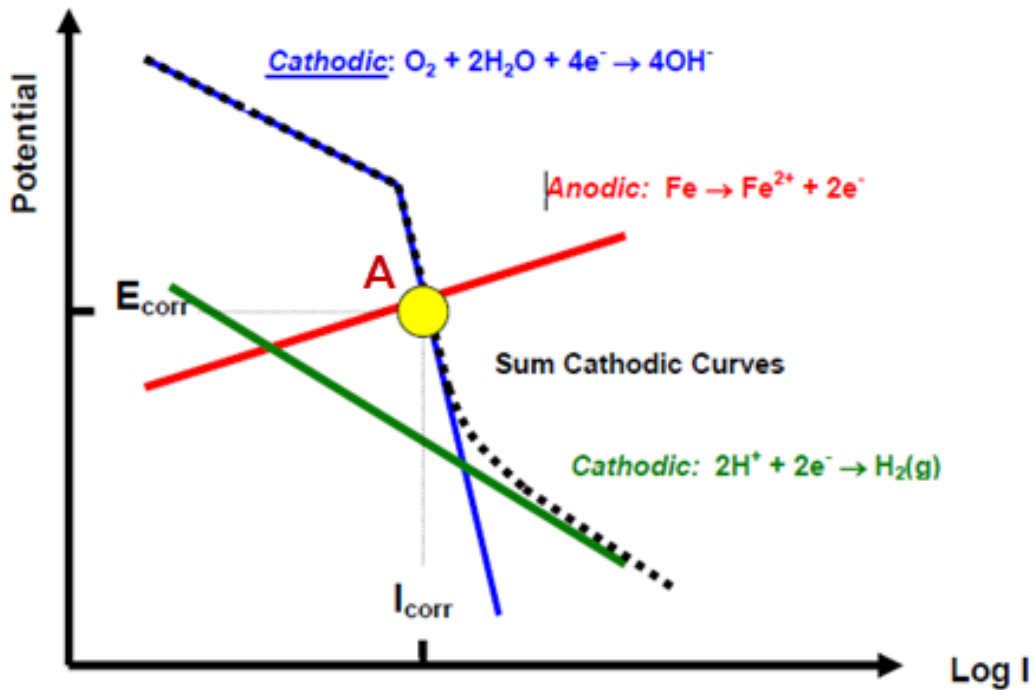
**Table A.6 — Paint systems for low-alloy carbon steel for immersion categories Im1, Im2 and Im3**

| Substrate: Low-alloy carbon steel  |                  |                             |              |                         |                    |              |                         |                     |     |      |
|--|------------------|-----------------------------|--------------|-------------------------|--------------------|--------------|-------------------------|---------------------|-----|------|
| Surface preparation: For Sa 2½, from rust grade A, B or C only (see ISO 8501-1)          |                  |                             |              |                         |                    |              |                         |                     |     |      |
| Low-durability systems are not recommended and therefore no examples of these are shown. |                  |                             |              |                         |                    |              |                         |                     |     |      |
| System No.   | Priming coat(s)  |                             |              |                         | Subsequent coat(s) | Paint system |                         | Expected durability |     |      |
|  | Binder           | Type of primer <sup>a</sup> | No. of coats | NDFT <sup>b</sup> in µm | Binder type        | No. of coats | NDFT <sup>b</sup> in µm | Low                 | Med | High |
|  | A6.01            | EP                          | Zn (R)       | 1                       | 60 <sup>e</sup>    | EP, PUR      | 3-5                     | 360                 |     |      |
| A6.02  | EP               | Zn (R)                      | 1            | 60 <sup>e</sup>         | EP, PURC           | 3-5          | 540                     |                     |     |      |
| A6.03  | EP               | Misc.                       | 1            | 80                      | EP, PUR            | 2-4          | 380                     |                     |     |      |
| A6.04  | EP               | Misc.                       | 1            | 80                      | EPGF, EP, PUR      | 3            | 500                     |                     |     |      |
| A6.05  | EP               | Misc.                       | 1            | 80                      | EP                 | 2            | 330                     |                     |     |      |
| A6.06  | EP               | Misc.                       | 1            | 800                     | —                  | —            | 800                     |                     |     |      |
| A6.07  | ESI <sup>d</sup> | Zn (R)                      | 1            | 60 <sup>e</sup>         | EP, EPGF           | 3            | 450                     |                     |     |      |
| A6.08  | EP               | Misc.                       | 1            | 80                      | EPGF               | 3            | 800                     |                     |     |      |
| A6.09  | EP, PUR          | Misc.                       | —            | —                       | —                  | 1-3          | 400                     |                     |     |      |
| A6.10  | EP, PUR          | Misc.                       | —            | —                       | —                  | 1-3          | 600                     |                     |     |      |

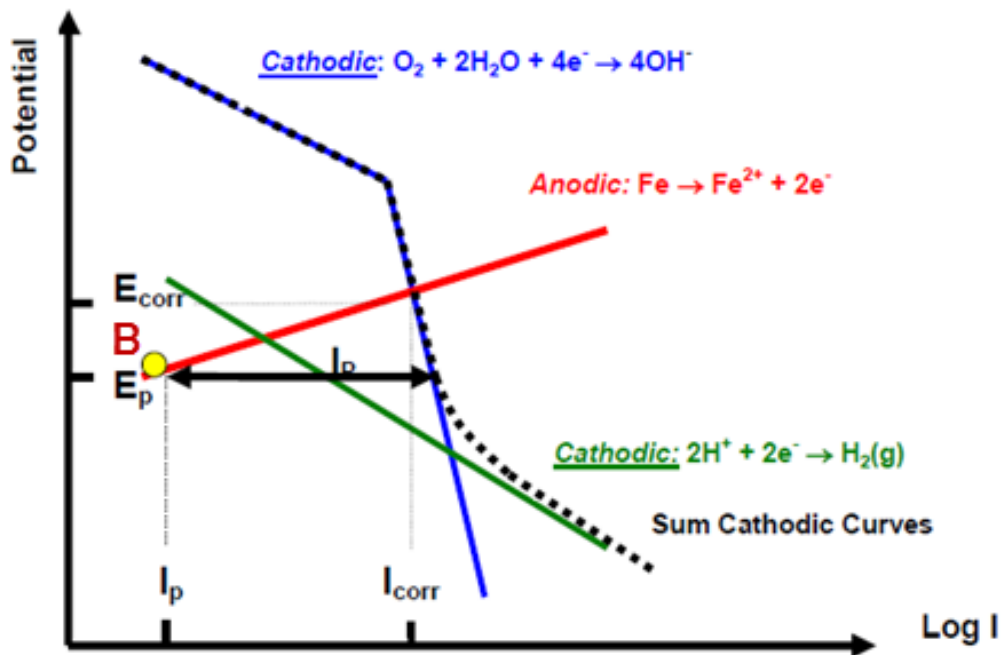
| Binder for priming coat(s)                | Type         | Water-borne possible <sup>f</sup> | Binder for subsequent coat(s)             | Type         | Water-borne possible <sup>f</sup> |
|---|--------------|-----------------------------------|---|--------------|-----------------------------------|
| EP = Epoxy                                | 2-pack       | X                                 | EP = Epoxy                                | 2-pack       | X                                 |
| ESI = Ethyl silicate                      | 1- or 2-pack | X                                 | EPGF = Epoxy glass flake                  | 2-pack       |                                   |
| PURC = Polyurethane combination           | 2-pack       |                                   | PURC = Polyurethane combination           | 2-pack       |                                   |
| PUR = Polyurethane, aromatic or aliphatic | 1- or 2-pack | X                                 | PUR = Polyurethane, aromatic or aliphatic | 1- or 2-pack | X                                 |

- <sup>a</sup> Zn (R) = Zinc-rich primer, see 5.2. Misc. = Primers with miscellaneous types of anticorrosive pigments.
- <sup>b</sup> NDFT = Nominal dry film thickness. See 5.4 for further details.
- <sup>d</sup> It is recommended for ESI primers that one of the subsequent coats be used as a tie coat.
- <sup>e</sup> It is also possible to work with an NDFT from 40 µm up to 80 µm provided the zinc-rich primer chosen is suitable for such an NDFT.
- <sup>f</sup> Water-borne products are in general not suitable for immersion.

## Evans diagram, Pourbaix diagram og den galvaniske serien:

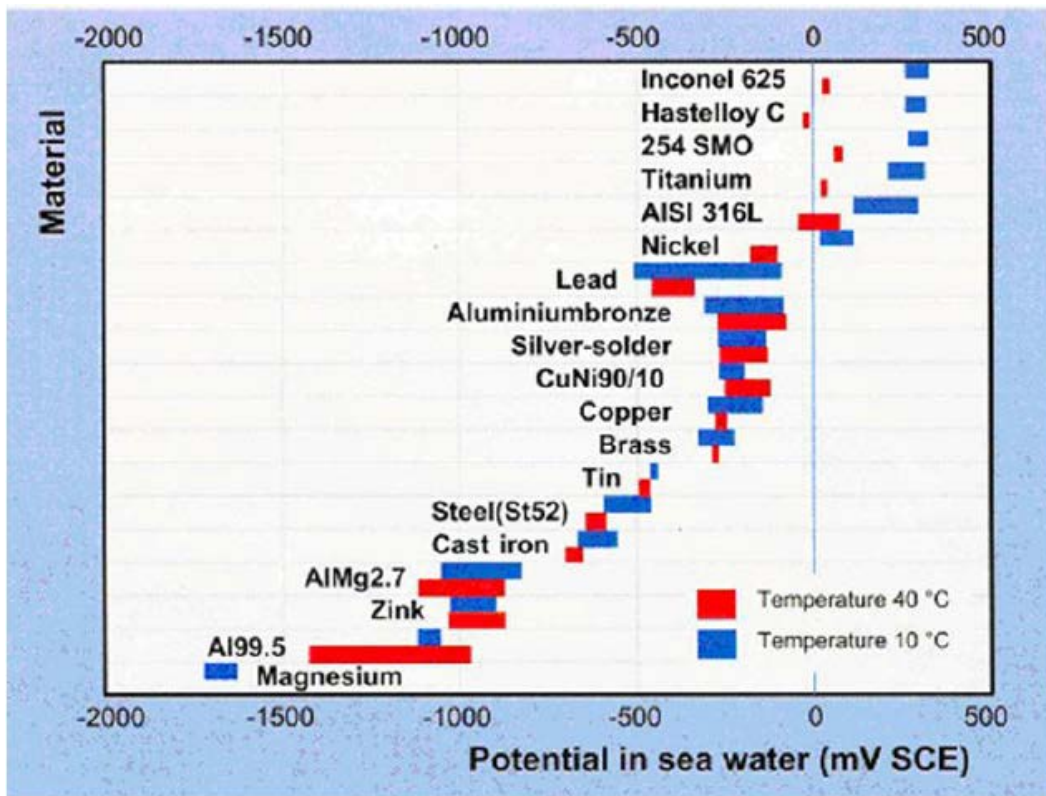


Figur 1 - Evans diagram for stål i sjøvann uten CP (Johnsen, 2011)

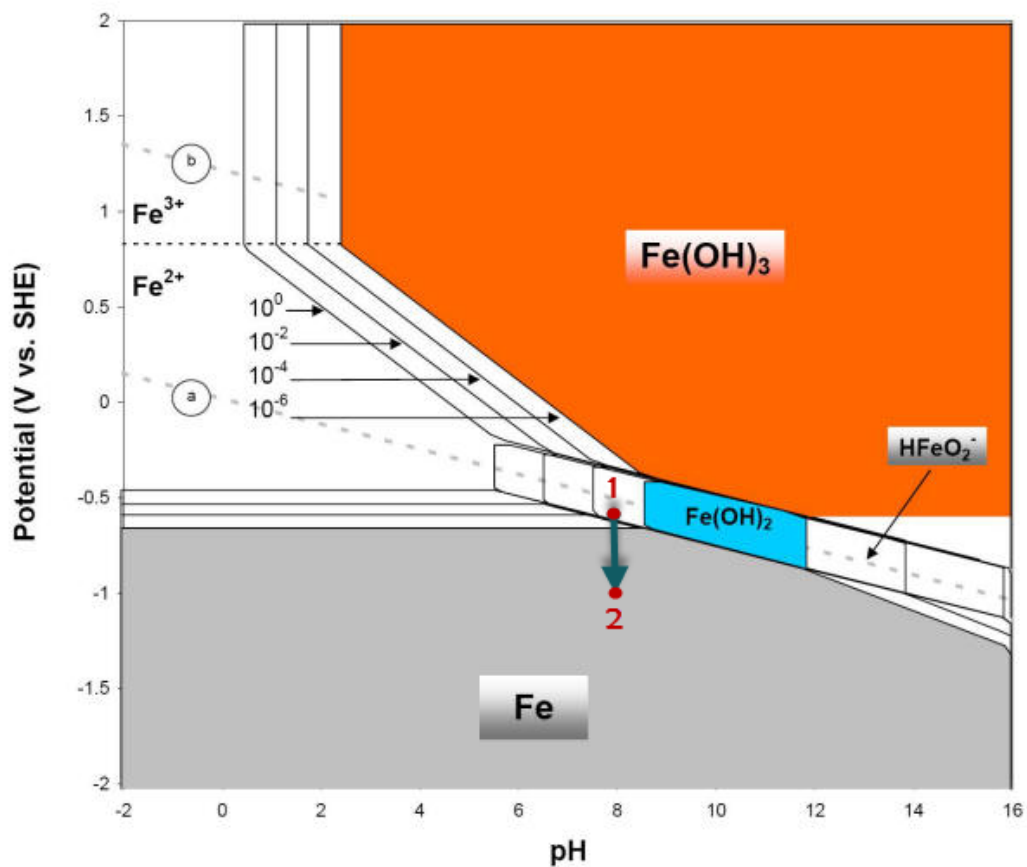


Figur 2 - Evans diagram for stål i sjøvann med CP (Johnsen, 2011)





Figur 3 - Den galvaniske serien i sjøvann (Johnsen, 2011)



Figur 4 - Pourbaix diagram for stål i vann (Doctors, u.d.)

## **Bibliografi**

Doctors, C., n.d. *Iron E-pH (Pourbaix) Diagram*. [Online]

Available at: <http://www.corrosion-doctors.org/Corrosion-Thermodynamics/Potential-pH-diagram-iron.htm>

Johnsen, R., 2011. *Cathodic Protection*, Trondheim: Inst. of Engineering Design and Materials.

**ASTRUP AS**

Postboks 8 Haugenstua  
N-0915 OSLO  
Telefon: 22 79 15 00  
Telefaks: 22 10 72 93  
E-post : astrup@astrup.no  
Internett.: www.astrup.no

Foretaksregisteret  
Org.nr. : NO 947 274 139 MVA  
Bankgiro: 8101 30 17700  
SWIFT : DABANO22  
IBAN : NO0581013017700

**VEDLEGG G1****TILBUD****1190056**

|   |                        |
|---|------------------------|
| <b>Kundeadresse</b><br>Sensorlink AS<br>Postboks 2197<br><br>7018 TRONDHEIM | <b>Kundenr</b> 3028383 |
|---|------------------------|

|  |
|--|
| <b>Leveringsadresse</b><br>Sensorlink AS<br>Nedre Ila 39<br>7018 TRONDHEIM |
|--|

|                            |                             |
|----------------------------|-----------------------------|
| <b>Tilbudsnr</b>           | 1190056                     |
| <b>Tilbudsdato</b>         | 24.03.2014                  |
| <b>Tilbudets varighet</b>  | 1 uke, forbehold mellomsalg |
| <b>Leveringsbetingelse</b> | EXW                         |
| <b>Betalingsbetingelse</b> | Netto pr 15 dager           |
| <b>Leveringstid</b>        | omg fra lager               |
| <b>Leveringsmåte</b>       | (98)Bedriftspakke           |

|                    |                         |
|--------------------|-------------------------|
| <b>Basert kurs</b> |                         |
| <b>Deres ref</b>   | Arve Skjetne            |
| <b>Tlf/Fax</b>     | 73 53 80 50/73 53 80 51 |
| <b>Merket</b>      |                         |
| <b>Vår ref</b>     | Kai Remen               |
| <b>Tlf.nr.</b>     | +47 93203640            |
| <b>E-post</b>      | kr@astrup.no            |

**Vi takker for deres forespørsel, og har gleden av å tilby:**

| Varenr.   | Beskrivelse   | Tilbudt Antall          | Enhet i prisenh. | Antall        | Enhet      | Pris          | Rab.                        | Linjesum      |
|---|---|-------------------------|------------------|---------------|------------|---------------|-----------------------------|---------------|
|   | Forespørsel fra NTNU v/ Christer Moe og Daniel Berg |                         |                  |               |            |               |                             |               |
|   | Vi har følgende biter i de forespurte materialer:   |                         |                  |               |            |               |                             |               |
| 3670050110  | PEEK BOLT 16MM (3 m)                                | 0.53                    | M                | 0,15          | KG         | 1 281,00      |                             | 190,09        |
| 3740050076  | POM BOLT NATUR 22 MM (3 m)                          | 1                       | M                | 0,58          | KG         | 47,00         |                             | 27,26         |
| 3850050510  | PUR BOLT 90 SHORE 20MM (1 m)§                       | 1                       | M                | 1,00          | M          | 200,00        |                             | 200,00        |
|   | Til spesialpris                                     |                         |                  |               |            |               |                             |               |
| <hr/>   |   |                         |                  |               |            |               |                             |               |
| Sign  |   | <b>Netto tilbudsum:</b> |                  | <b>417,35</b> | <b>MVA</b> | <b>104,34</b> | <b>Total inkl. MVA: NOK</b> | <b>521,69</b> |
| Enhetspriser er oppgitt ekskl. mva og emballasje. |   |                         |                  |               |            |               |                             |               |

Totalpris på kilovarer er basert på teoretiske omregningsvekter. Vi tar forbehold om mellomsalg, selger har salgspant i de leverte varer til de er betalt i sin helhet. Forøvrig gjelder våre standard leveringsbetingelser som er tilgjengelig på [www.astrup.no](http://www.astrup.no).

RÖCHLING SUSTAPLAST KG

Sustaplast Straße 1  
D-56112 Lahnstein/Germany

Tel. 02621/693-0  
Fax 02621/693170  
Internet: www.sustaplast.de



## Material Data Sheet

| Trade name                                    | SUSTARINC                        |                        |                            |
|---|----------------------------------|------------------------|----------------------------|
| DIN EN ISO 1043 designation                   | POM                              |                        |                            |
| Modification:                                 | none                             |                        |                            |
| <i>Properties</i>                             | <i>Unit</i>                      | <i>Test method</i>     | <i>Value</i>               |
| <b>General Properties</b>                     |                                  |                        |                            |
| Density                                       | g/cm <sup>3</sup>                | DIN EN ISO 1183-1      | 1,41                       |
| Moisture absorption                           |                                  |                        |                            |
| Saturation in air of 23°C/50% RH              | %                                | DIN EN ISO 62          | 0,2                        |
| Flammability acc.to UL 94 (Thickn. 3mm/6mm)   |                                  | ISO 1210 (UL 94)       | HB / HB                    |
| <b>Mechanical Properties</b>                  |                                  |                        |                            |
|   |                                  |                        | <i>Test specimen "dry"</i> |
| Yield point                                   | MPa                              | DIN EN ISO 527         | 67                         |
| Elongation at break                           | %                                | DIN EN ISO 527         | 30                         |
| Tensile modulus of elasticity                 | MPa                              | DIN EN ISO 527         | 2.800                      |
| Notched impact strength (Charpy)              | kJ/m <sup>2</sup>                | ISO 179/1eA/Pendel 1J  | 6                          |
| Ball indentation hardness                     | N/mm <sup>2</sup>                | DIN EN ISO 2039-1      | 150                        |
| Shore - Hardness                              | Skala D                          | DIN 53505              | 81                         |
| <b>Thermal Properties</b>                     |                                  |                        |                            |
| Melting temperature                           | °C                               | ISO 11357              | 165                        |
| Thermal conductivity                          | W/(mK)                           | DIN 52612              | 0,31                       |
| Specific thermal capacity                     | kJ/(kgK)                         | DIN 52612              | 1,5                        |
| Coefficient of linear thermal expansion       | 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> | Average betw.20°C-60°C | 110                        |
| Service temperature - long-term               | °C                               |                        | - 50 up to 100             |
| Service temperature - short-term, max.        | °C                               |                        | 140                        |
| Heat deflection temperature, Method A:1,8 MPa | °C                               | DIN EN ISO 75          | 110                        |
| <b>Electrical Properties</b>                  |                                  |                        |                            |
| Dielectric constant, 50 Hz                    |                                  | IEC 60250              | 3,8                        |
| Dielectric dissipation factor, 50 Hz          |                                  | IEC 60250              | 0,002                      |
| Volume resistivity                            | Ohm cm                           | IEC 60093              | 10 <sup>13</sup>           |
| Surface resistivity                           | Ohm                              | IEC 60093              | 10 <sup>13</sup>           |
| Comperative tracking index CTI, Sol. A        |                                  | IEC 60112              | 600                        |
| Dielectric strength                           | kV/mm                            | IEC 60243              | 40                         |

### Remarks:

The short-term maximum application temperature only applies to very low mechanical stress for a few hours.  
 The long-term maximum application temperature is based on the thermal ageing of plastics by oxidation, resulting in a decrease of the mechanical properties. This applies to an exposure to temperatures for at least 5.000 hours causing a 50% loss of the tensile strength from the original value (measured at room temperature). This value says nothing about the mechanical strength of the material at high application temperatures. In case of thick-walled parts, only the surface layer ist affected by oxidation from high temperatures. With the addition of antioxidants, a better protection of the surface layer is achieved. In any case, the center area of the material remains unaffected.  
 The minimum application temperature ist basically influenced by possible stress factors like impact and/or shock under application. The values stated refer to an minimum degree of impact stress.  
 The electrical properties as stated result from measurements on natural, dry material. With other colours (in particular black) or saturated material, there may be clear differences in the electrical properties.  
 The values indicated result from numerous individual measurements for an approximation of the values and are to our today's knowledge. They serve as information about our products and are presented as a guide to choose from our range of materials. This, however, does not include an assurance of specific properties or the suitability for particular application purposes that are legally binding. Since the properties also depend on the dimension of the semi-finished products and the degree of crystallisation (e.g. nucleating by pigments), the actual values of the properties of a particular product may differ from the indicated values.

RÖCHLING SUSTAPLAST KG

Sustaplast Straße 1  
D-56112 Lahnstein/Germany



Tel. 02621/693-0  
Fax 02621/693170  
Internet: www.sustaplast.de

## Material Data Sheet

| Trade name                                    | SUSTAPEEK                        |                         |                        |
|---|----------------------------------|-------------------------|------------------------|
| DIN EN ISO 1043 designation                   | PEEK                             |                         |                        |
| Modification:                                 | none                             |                         |                        |
| <i>Properties</i>                             | <i>Unit</i>                      | <i>Test method</i>      | <i>Value</i>           |
| <b>General Properties</b>                     |                                  |                         |                        |
| Density                                       | g/cm <sup>3</sup>                | DIN EN ISO 1183-1       | 1,31                   |
| Moisture absorption                           | %                                | DIN EN ISO 62           | 0,20                   |
| Saturation in air of 23°C/50% RH              |                                  | ISO 1210 (UL 94)        | VO / VO                |
| Flammability acc.to UL 94 (Thickn. 3mm/6mm)   |                                  |                         |                        |
| <b>Mechanical Properties</b>                  |                                  |                         |                        |
| <i>Test specimen "dry"</i>                    |                                  |                         |                        |
| Yield point                                   | MPa                              | DIN EN ISO 527          | 110                    |
| Elongation at break                           | %                                | DIN EN ISO 527          | 20                     |
| Tensile modulus of elasticity                 | MPa                              | DIN EN ISO 527          | 4.000                  |
| Notched impact strength (Charpy)              | kJ/m <sup>2</sup>                | ISO 179/1eA/Pendel 1J   | -                      |
| Ball indentation hardness                     | N/mm <sup>2</sup>                | DIN EN ISO 2039-1       | 230                    |
| Shore - Hardness                              | Skala D                          | DIN 53505               | 88                     |
| <b>Thermal Properties</b>                     |                                  |                         |                        |
| Melting temperature                           | °C                               | ISO 11357               | 343                    |
| Thermal conductivity                          | W/(mK)                           | DIN 52612               | 0,25                   |
| Specific thermal capacity                     | kJ/(kgK)                         | DIN 52612               | 1,34                   |
| Coefficient of linear thermal expansion       | 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> | Average betw. 20°C-60°C | 50                     |
| Service temperature - long-term               | °C                               |                         | - 60 up to 250         |
| Service temperture - short-term, max.         | °C                               |                         | 310                    |
| Heat deflection temperature, Method A:1,8 MPa | °C                               | DIN EN ISO 75           | 152                    |
| <b>Electrical Properties</b>                  |                                  |                         |                        |
| Dielectric constant, 50 Hz                    |                                  | IEC 60250               | 3,2                    |
| Dielectric dissipation factor, 50 Hz          |                                  | IEC 60250               | 0,001                  |
| Volume resistivity                            | Ohm cm                           | IEC 60093               | 4,9 x 10 <sup>16</sup> |
| Surface resistivity                           | Ohm                              | IEC 60093               | 10 <sup>18</sup>       |
| Comperative tracking index CTI, Sol. A        |                                  | IEC 60112               | -                      |
| Dielectric strength                           | kV/mm                            | IEC 60243               | 20                     |

**Remarks:**

The short-term maximum application temperature only applies to very low mechanical stress for a few hours.

The long-term maximum application temperature is based on the thermal ageing of plastics by oxidation, resulting in a decrease of the mechanical properties. This applies to an exposure to temperatures for at least 5.000 hours causing a 50% loss of the tensile strength from the original value (measured at room temperature). This value says nothing about the mechanical strength of the material at high application temperatures. In case of thick-walled parts, only the surface layer ist affected by oxidation from high temperatures. With the addition of antioxidants, a better protection of the surface layer is achieved. In any case, the center area of the material remains unaffected.

The minimum application temperature ist basically influenced by possible stress factors like impact and/or shock under application. The values stated refer to an minimum degree of impact stress.

The electrical properties as stated result from measurements on natural, dry material. With other colours (in particular black) or saturated material, there may be clear differences in the electrical properties.

The values indicated result from numerous individual measurements for an approximation of the values and are to our today's knowledge. They serve as information about our products and are presented as a guide to choose from our range of materials. This, however, does not include an assurance of specific properties or the suitability for particular application purposes that are legally binding. Since the properties also depend on the dimension of the semi-finished products and the degree of crystallisation (e.g. nucleating by pigments), the actual values of the properties of a particular product may differ from the indicated values.

# MATERIALSPECIFIKATIONER

## Slitankvalitéer från UW-ELAST

Nedanstående Slitankvalitéer finns som standard. Nya kvalitéer och varianter tillkommer hela tiden. Vi reserverar oss för eventuella förändringar i specifikationer och sortiment.



| Egenskap  | Sort  | Mätmetod   | Slitan 60 A-01 | Slitan 70 A-01 | Slitan 80 A-01     | Slitan 90 A-01       | Slitan 95 A-01        | Slitan 70 D-01          |
|---|-------|------------|----------------|----------------|--------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|
| Hårdhet   | Shore | ASTM D2240 | 60 °A          | 70 °A          | 80 °A              | 90 °A                | 95 °A                 | 73 °D                   |
| Dragbrottsgräns                                     | MPa   | ASTM D412  | 24,0           | 38,0           | 21,0               | 32,0                 | 35,0                  | 65,0                    |
| Brottöjning   | %     | ASTM D412  | 540            | 750            | 800                | 450                  | 400                   | 260                     |
| Dragspänning vid<br>100% töjning<br>300% töjning    | MPa   | ASTM D412  | 2,0<br>3,0     | 2,5<br>3,5     | 3,0<br>4,5         | 8,0<br>15,0          | 13,0<br>23,0          | 26,0<br>—               |
| Rivhållfasthet                                      | kN/m  | ASTM D470  | 4,5            | 12,0           | 12,5               | 14,0                 | 27,0                  | 20,0                    |
| Sättning<br>Metod A<br>Metod B                      | %     | ASTM D395  | —<br>13        | —<br>35        | —<br>45            | —<br>27              | —<br>40               | 10<br>—                 |
| Studselasticitet                                    | %     | ASTM D2632 | 35             | 30             | 60                 | 45                   | 40                    | 60                      |
| Nötningstålighet, NBS                               |       | ASTM D1630 | —              | —              | 110                | 180                  | 300                   | 420                     |
| Vridstyvhet<br>Clash-Berg 24 °C<br>-18 °C<br>-40 °C | MPa   | ASTM D1043 | —<br>—<br>—    | —<br>—<br>—    | 7,0<br>7,0<br>12,0 | 18,0<br>22,5<br>75,0 | 17,0<br>50,0<br>115,0 | 110,0<br>270,0<br>470,0 |
| Sprödpunkt  | °C    | ASTM D746  | -50            | -50            | -90                | -70                  | -70                   | -70                     |
| Densitet  |       | ASTM D792  | 1,15           | 1,25           | 1,08               | 1,11                 | 1,13                  | 1,20                    |

Tabell 22.







|  |                          |               |           |            |  |
|--|--------------------------|---------------|-----------|------------|--|
| <b>NTNU</b><br><br><b>HMS</b> | <h1>Risikovurdering</h1> | Utarbeidet av | Nummer    | Dato       |  |
|  |                          | HMS-avd.      | HMSRV2601 | 22.03.2011 |  |
|  |                          | Godkjent av   |           | Erstatter  |  |
|  |                          | Rektor        |           | 01.12.2006 |  |

## Sannsynlighet vurderes etter følgende kriterier:

| Svært liten<br>1                | Liten<br>2                      | Middels<br>3                 | Stor<br>4                       | Svært stor<br>5 |
|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------|
| 1 gang pr 50 år eller sjeldnere | 1 gang pr 10 år eller sjeldnere | 1 gang pr år eller sjeldnere | 1 gang pr måned eller sjeldnere | Skjer ukentlig  |

## Konsekvens vurderes etter følgende kriterier:



| Gradering                  | Menneske                              | Ytre miljø<br>Vann, jord og luft         | Øk/materiell   | Omdømme  |
|----------------------------|---------------------------------------|--|--|--|
| <b>E</b><br>Svært Alvorlig | Død                                   | Svært langvarig og ikke reversibel skade | Drifts- eller aktivitetsstans >1 år.                 | Troverdighet og respekt betydelig og varig svekket |
| <b>D</b><br>Alvorlig       | Alvorlig personskade. Mulig uførhet.  | Langvarig skade. Lang restitusjonstid    | Driftsstans > ½ år<br>Aktivitetsstans i opp til 1 år | Troverdighet og respekt betydelig svekket          |
| <b>C</b><br>Moderat        | Alvorlig personskade.                 | Mindre skade og lang restitusjonstid     | Drifts- eller aktivitetsstans < 1 mnd                | Troverdighet og respekt svekket                    |
| <b>B</b><br>Liten          | Skade som krever medisinsk behandling | Mindre skade og kort restitusjonstid     | Drifts- eller aktivitetsstans < 1 uke                | Negativ påvirkning på troverdighet og respekt      |
| <b>A</b><br>Svært liten    | Skade som krever førstehjelp          | Ubetydelig skade og kort restitusjonstid | Drifts- eller aktivitetsstans < 1 dag                | Liten påvirkning på troverdighet og respekt        |

### Risikoverdi = Sannsynlighet x Konsekvens

Beregn risikoverdi for Menneske. Enheten vurderer selv om de i tillegg vil beregne risikoverdi for Ytre miljø, Økonomi/materiell og Omdømme. I så fall beregnes disse hver for seg.

### Til kolonnen "Kommentarer/status, forslag til forebyggende og korrigerende tiltak":

Tiltak kan påvirke både sannsynlighet og konsekvens. Prioriter tiltak som kan forhindre at hendelsen inntreffer, dvs. sannsynlighetsreducerende tiltak foran skjerpet beredskap, dvs. konsekvensreducerende tiltak.

|   |                        |               |        |            |   |
|---|------------------------|---------------|--------|------------|---|
| NTNU  | <b>Risikovurdering</b> | utarbeidet av | Nummer | Dato       |  |
|  |                        | HMS-avd.      | HMSR26 | 03.03.10   |   |
| HMS   |                        | Godkjent av   | side   | Erstatter  |   |
|   |                        | Rektor        | 3 av 4 | 04.03.2009 |   |
|   |                        |               |        |            |   |

|                      |                |                      |       |         |      |            |
|----------------------|----------------|----------------------|-------|---------|------|------------|
| <b>KONSEKVENSENS</b> | Svært alvorlig | E1                   | E2    | E3      | E4   | E5         |
|                      | Alvorlig       | D1                   | D2    | D3      | D4   | D5         |
|                      | Moderat        | C1                   | C2    | C3      | C4   | C5         |
|                      | Liten          | B1                   | B2    | B3      | B4   | B5         |
|                      | Svært liten    | A1                   | A2    | A3      | A4   | A5         |
|                      |                | Svært liten          | Liten | Middels | Stor | Svært stor |
|                      |                | <b>SANNSYNLIGHET</b> |       |         |      |            |

Prinsipp over akseptkriterium. Forklaring av fargene som er brukt i risikomatriksen.

| Farge | Beskrivelse   |
|-------|---|
| Rød   | Uakseptabel risiko. Tiltak skal gjennomføres for å redusere risikoen. |
| Gul   | Vurderingsområde. Tiltak skal vurderes.                               |
| Grønn | Akseptabel risiko. Tiltak kan vurderes ut fra andre hensyn.           |

### 5.5 Etterarbeid

- Foreta evt. en ny befaring av aktiviteten/prosessen for å verifisere at risikoverdiene er realistiske, evt. justere risikoverdiene
- Gå gjennom, vurdere og prioritere aktuelle forebyggende og korrigerende tiltak for å forebygge uønskede hendelser. Identifisere og prioritere tiltak som kan forhindre at hendelsen inntreffer, dvs. sannsynlighetsreduserende tiltak foran konsekvensreduserende tiltak/skjerpet beredskap.
- Tiltak settes i [handlingsplan](#).
- Vurdere restrisiko: Deltakerne foretar en helhetsvurdering for å avgjøre om gjenværende risiko ved aktiviteten/prosessen er akseptabel.
- Gjennomført risikovurdering skal danne grunnlag for utarbeiding av lokale retningslinjer og HMS-dokumenter, opplæring og valg av sikkerhetsutstyr
- Sette evt. opp kostnadsoverslag over planlagte tiltak