

# Vakuuminnfesting av fjernstyrte undervannsverktøy

**Jon Frodason Låstad**  
**Bjarte Holmgard**

Produktutvikling og produksjon  
Innlevert: Juni 2012  
Hovedveileder: Bjørn Haugen, IPM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for produktutvikling og materialer



---

## I. FORORD

---

Denne masteroppgaven er skrevet av Bjarte Holmgard og Jon Frodason Låstad ved Institutt for produktutvikling og materialer ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Rapporten er skrevet som besvarelse i emnet "TMM4901, Produktutvikling, beregning og bearbeiding" i tidsrommet 16. januar til 8. juni 2012. Den er en videreførelse av prosjektoppgaven skrevet høsten 2011. Oppgaveteksten er utarbeidet i samarbeid med veileder Bjørn Haugen ved NTNU og senioringeniør Martin Hasle ved Linjebygg Offshore AS.

Linjebygg har kommet frem til at vakuum er beste løsning for innfesting under båtskrog, slik at man har stabilitet under vedlikehold. Et konsept for vakuuminnfesting og tilkomst til et område under lasteskipet Njord B ble utarbeidet i prosjektoppgaven. For å undersøke gjennomførbarheten til konseptets vakuumsystem, måtte det videreutvikles og testes.

Grunnet en forsinkelse i leveransen av vakuumpumpen fra Travaini ble testingen forsinket med seks uker. Alle planlagte tester ble likevel gjennomført.

Vi ønsker å rette en stor takk til Roar Haukenes ved Aratron AS og Rune Haug ved Vakuu-Service AS for hjelp og konsultasjon ved bestilling av utstyr, Halvard Støwer ved NTNU for hjelp med sensorer og måleteknisk utstyr, Senioringeniør Nils-Inge Johan Nilsen ved SINTEF Materialer og kjemi for hjelp ved oppsett av vakuumsystem, verkstedspersonal ved IPM for veiledning under konstruksjon av testrigg, Martin Hasle ved Linjebygg Offshore AS og veileder Bjørn Haugen for godt samarbeid og gode innspill, og til slutt, venner, kjæreste og familie, for korrekturlesing og støtte gjennom semesteret.

Trondheim, 8. juni 2012



---

Bjarte Holmgard



---

Jon Frodason Låstad



---

## II. OPPGAVETEKST

---

NORGES TEKNISK-  
NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET  
INSTITUTT FOR PRODUKTUTVIKLING  
OG MATERIALER

**MASTEROPPGAVE VÅR 2012  
FOR  
STUD.TECHN. BJARTE HOLMGARD  
OG STUD.TECHN. JON FRODASON LÅSTAD**

**VAKUMINNFESTING AV FJERNSTYRTE UNDERVANNsverktøy  
Vacuum attachment of remote controlled submerged tools**

Linjebygg Offshore AS leverer tjenester og komplette prosjekter til olje- og gasssektoren innen inspeksjon, vedlikehold, modifikasjoner og fjerning. Linjebygg Offshore har spesialisert seg på å utføre tjenester i områder med vanskelig tilkomst, høyt og lavt på installasjonene.

Flytende produksjons- og lager installasjoner offshore bygges ofte med basis i standard skipskonstruksjoner som modifiseres spesielt for formålet. Disse innretningene kalles med en fellesbetegnelse for FPSOer (Floating Production, Storage and Offloading). Når disse installasjonene nærmer seg sin designlevetid er det ofte ønskelig å øke levetiden for bedre utnyttelse av eksisterende brønner eller for å drive haleproduksjon. Av økonomiske årsaker er det ønskelig å gjøre dette arbeidet mens installasjonen er i drift offshore. Ett område som er spesielt utsatt er undersiden av "turret"-en, der stigerør entrer skroget. Trang plass og strømninger gjør konvensjonell bruk av ROVER og dykkere uegnet. Njord B er en flytende installasjon med STL turret. Her har Statoil utfordringer med utskifting av anoder ved innfesting til forankringspunkt.

Gjennom interne utviklingsprosjekter og tidligere masteroppgaver ved NTNU har LBO utviklet metoder for tilkomst og arbeid på flytende produksjons- og lager installasjoner. Gjennom dette arbeidet er vakuum funnet å være den mest hensiktsmessige metoden for sporløs innfesting på skroget. Et konsept for vakuuminnfesting på Njord B ble frembrakt gjennom en prosjektoppgave.

Bruk av vakuuminnfesting på installasjonene krever kunnskap om i hvilken grad en må rengjøre eller preparere overflaten på den gitte arbeidsplassen. Slik kunnskap og erfaring kan best etableres ved systematisk testing.

Oppgaven søker å videreutvikle og teste konseptet for vakuuminnfesting. Testingen innebærer å konstruere et oppsett for å teste vakuumutstyr med hensyn på varierende innfestingsforhold som for eksempel over/under vann, begroing, korrosjon, sveisesømmer og overflateradius. En skal også vurdere om testoppsettet/utstyret bør være mobilt.

Testresultater skal sammenlignes med leverandørers oppgitte spesifikasjoner/kapasiteter med tanke på å vurdere utstyrets sikkerhetsmarginer.

Før kandidaten går i gang med forsøkene, skal han/hun sette opp en oversiktlig forsøksplan som inneholder alle opplysninger om forsøksmetodikk og forsøksbetingelser. Planen skal foreligge til godkjenning innen tre uker etter utlevering av oppgaven.

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

Senest 3 uker etter oppgavestart skal et A3 ark som illustrerer arbeidet leveres inn. En mal for dette arket finnes på instituttets hjemmeside under menyen undervisning. Arket skal også oppdateres ved innlevering av masteroppgaven.

Besvarelsen skal leveres i elektronisk format via DAIM, NTNUs system for Digital arkivering og innlevering av masteroppgaver.

Kontaktperson:

Senioringeniør Martin Hasle, LBO



Torgeir Welo  
Instituttleder



Bjørn Haugen  
Faglærer

---

### III. SAMMENDRAG

---

Arbeidet med vakuuminnfesting for fjernstyrte undervannsverktøy har pågått siden våren 2011, som et samarbeid mellom LBO og studenter ved NTNU. I prosjektoppgaven *"Konsept for innfesting av fjernstyrte undervannsverktøy på flytende produksjonsinstallasjoner"*, Holmgard & Låstad 2011, ble det utviklet et helhetlig konsept for innfesting og tilkomst til skroget på et lasteskip. Løsningen ble en rektangulær ramme med en robotarm for gjennomføring av vedlikeholdsarbeidet. Et vakuumsystem med sugekopper fungerte som innfesting.

Denne masteroppgaven undersøker gjennomførbarheten til vakuumsystemet, gjennom videreutvikling og systematisk testing i en testrigg. Hovedfokuset lå i å teste innfestingskapasiteten til sugekopper under varierende forhold.

Resultatene viste at innfestingskapasiteten i liten grad påvirkes av vann og moderat ruhet. Sugekoppene kan dermed dimensjoneres utfra oppgitte spesifikasjoner fra leverandørene. Det fremstod også hensiktsmessig å bruke vakuumsystem som trykkakkumulator, da den fører til hurtigere innfesting, og lavere trykktap ved lekkasje.

I tillegg til å gi svar på noen av spørsmålene LBO hadde, har vi gjennom oppgaven tilrettelagt for videre arbeid med vakuuminnfesting offshore. Testriggen og øvrig testutstyr kan benyttes til videreutvikling, og vi anbefaler LBO å gjennomføre ytterligere tester.





---

## IV. ABSTRACT

---

Work on vacuum attachment for maintenance operations has been ongoing since the spring of 2011 as a collaboration between LBO and students from NTNU. In the dissertation *“Concept for attachment of remote controlled submerged tools on floating production installations”*, Holmgard & Låstad 2011, a concept for attachment and access to the hull of a cargo ship was developed. The solution was a rectangular steel platform with a robotic arm to perform the necessary maintenance. Suction cups provided stability by attachment to the hull.

This thesis aims to test the feasibility of the vacuum system through further development and systematic testing. The main focus consisted of testing the vacuum attachment capacity under various conditions. The results were analyzed in order to assess the safety margins of the suction cups. Necessary equipment was purchased. Custom items were produced in the workshop, including the test rig itself.

The results show that the vacuum attachment capacity is largely unaffected by factors like water and moderate surface roughness. This indicates that a vacuum attachment system can be designed using the producer’s specifications for suction cups.

It was also concluded that the use of a vacuum tank as a pressure accumulator is appropriate, as it leads to faster attachment, and slows the loss of pressure in case of leakage.

This thesis has laid a foundation for the work on offshore vacuum attachment, but further development and testing of the assembled system is recommended.



---

## INNHALDSFORTEGNELSE

---

1	Innledning .....	1
1.1	Bakgrunn .....	1
1.2	Formål .....	3
1.3	Omfang .....	3
1.4	Begrensninger .....	3
2	Teori .....	5
2.1	Vakuum .....	5
2.1.1	Vann i vakuum .....	5
2.2	Sugekopper .....	6
2.3	Trykkfall i vakuumslinger .....	6
2.4	Vakuumpumper .....	7
2.4.1	Rotary vane .....	7
2.4.2	Væskeringspumpe .....	8
3	Testoppsett .....	9
3.1	Utstyr .....	9
3.1.1	Valg av sugekopper .....	9
3.1.2	Valg av pumpe .....	10
3.1.3	Trykktank .....	10
3.1.4	Kondensavskiller .....	12
3.1.5	Koblingspunkter .....	12
3.2	Utvikling av testtrigg .....	13
3.2.1	Prototype, LEGO-modell .....	14
3.2.2	Prototype, CAD-modell .....	15
3.2.3	Detaljering .....	15
3.2.4	Endelig design .....	17
3.3	Produksjon av testtrigg .....	18
3.3.1	Testbasseng .....	21
3.4	Instrumentering & måledata .....	22
3.4.1	Trykkmåler .....	22
3.4.2	Lastceller .....	23
3.4.3	Beskrivelse av programvare .....	24
4	Testing .....	25
4.1	Innfestingskapasitet .....	25
4.2	Vakuumtank .....	27
4.3	Vann i vakuumsystemet .....	27
4.4	Logging .....	27
5	Resultater .....	29
5.1	Innfestingskapasitet .....	29
5.2	Trykkakkumulator .....	31
5.3	Vann i vakuumsystemet .....	32
5.4	Feilkilder og diskusjon .....	32
6	Konklusjon .....	33
7	Videre arbeid .....	35

7.1	Vakuumpumpe.....	35
7.2	Vakuumtank.....	35
7.3	Sugekopper.....	35
7.4	Videre testing.....	35
	Referanser .....	37
R.1	Litteraturreferanser .....	37
R.2	Personreferanser .....	39
	Vedlegg.....	41
V.1	Møtereferat 19.01.12.....	41
V.2	Møtereferat 21.03.12.....	42
V.3	HPU spesifikasjoner .....	43
V.4	Utregning av nødvendig volum på trykktank .....	44
V.5	Koblings skjema.....	45
V.6	Utførte tester .....	46

## FIGURLISTE

Figur 1.1: Njord B med forankringssystemet STL.....	1
Figur 1.2: Konsept fra prosjektoppgave.....	2
Figur 1.3: Blokkdiagram, løsning 1 – 5. ....	2
Figur 1.4: Fremdriftsplan per 25.01.2012.....	4
Figur 1.5: Reell fremdrift .....	4
Figur 2.1: Fasediagram for vann .....	5
Figur 2.2: Sugekopp, omkringliggende trykk.....	6
Figur 2.3: Rotary vane pump .....	7
Figur 2.4: Væskeringspumpe .....	8
Figur 2.5: Kavitasjonsgrense trykk/temperatur .....	8
Figur 3.1: F75, F110 og F150.....	9
Figur 3.2: Løftekrefter og tekniske data for valgte sugekopper. ....	9
Figur 3.3: Travaini TRMB 25-30 .....	10
Figur 3.4: Edwards E2M40.....	10
Figur 3.5: Baglioni VE60064.....	11
Figur 3.6: Spenning .....	11
Figur 3.7: Deformasjon .....	11
Figur 3.8: Kondensavskiller, 1 liter.....	12
Figur 3.9: Kondensavskiller, forklaring.....	12
Figur 3.10: DN25 .....	12
Figur 3.11: Kraft på sugekopp.....	13
Figur 3.12: HPU.....	13
Figur 3.13: Mål på hydraulisk sylinder.....	13
Figur 3.14: LEGO-modell, første utkast .....	14
Figur 3.15: LEGO-modell, andre utkast .....	14
Figur 3.16: Versjon 1, vertikalramme .....	15
Figur 3.17: Versjon 1, horisontalramme .....	15
Figur 3.18: Vertikalramme, uten avstivere, deformasjon .....	16
Figur 3.19: Vertikalramme, uten avstivere, spenning .....	16
Figur 3.20: Vertikalramme, med avstivere, deformasjon.....	16
Figur 3.21: Vertikalramme, med avstivere, spenning.....	16
Figur 3.22: Horisontalramme, deformasjon.....	16
Figur 3.23: Horisontalramme, spenning.....	16
Figur 3.24: Versjon 2 vertikalramme .....	17
Figur 3.25: Versjon 2, horisontalramme.....	17
Figur 3.26: Versjon 2 vertikal, spenning.....	17
Figur 3.27: Versjon 2 vertikal, deformasjon.....	17
Figur 3.28: Sammensatt modell .....	17
Figur 3.29: Arbeid i verkstedet.....	18
Figur 3.30: Braketter for vertikalsylinder .....	19
Figur 3.31: Braketter for horisontalsylinder.....	19
Figur 3.32: Bolt .....	19
Figur 3.33: U-brakett .....	20
Figur 3.34: Feste til sugekopp, skisse.....	20
Figur 3.35: Feste til sugekopp.....	20

Figur 3.36: Testbasseng.....	21
Figur 3.37: Edwards APG-100-XM .....	22
Figur 3.38: Signalspenning – målt trykk.....	22
Figur 3.39: Wheatstone bro konfigurasjon.....	23
Figur 3.40: HBM U2b .....	23
Figur 3.41: Input kanaler .....	24
Figur 3.42: Visualisering .....	24
Figur 4.1: Testoppsett .....	25
Figur 4.2: Bilder fra testing.....	26
Figur 4.3: Riggens kraftoverføring.....	27
Figur 5.1: Innfestingskapasitet ved varierende omgivelser.....	29
Figur 5.2: Varierende areal .....	30
Figur 5.3: Varierende trykk.....	30
Figur 5.4: Innfestingshastighet.....	31
Figur 5.5: Lekkasje ved sugekopp .....	31
Figur 5.6: Trykk ved koking.....	32

---

## FORKORTELSER

---

LBO	Linjebygg Offshore AS
FPSO	Floating Production Storage and Offloading
NTNU	Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet
IPM	Institutt for produktutvikling og materialer
FEM	Finite element method
CAD	Computer assisted design
STL	Submerged Turret Loading
ROV	Remote operated vehicle
HPU	Hydraulic Power Unit

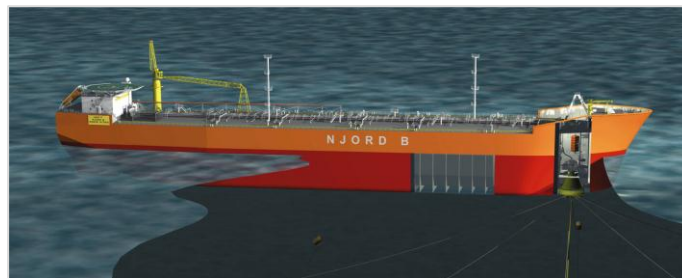




# 1 INNLEDNING

## 1.1 BAKGRUNN

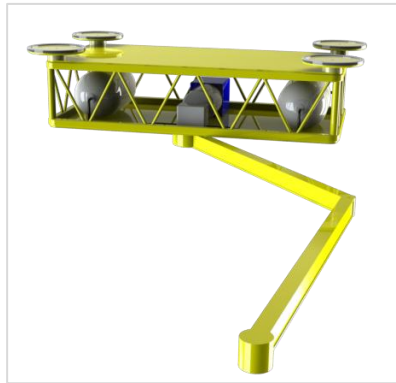
Oljefeltet Njord ligger 130 km nordvest for Kristiansund. Oljen fraktes i rørledning fra den flytende plattformen Njord A, til lagerskipet Njord B. Skipet er oppankret like ved plattformen i en tårnbøye, som igjen er forankret til sjøbunnen med et åttepunkts forankringssystem (Figur 1.1). I den første fasen av feltets levetid ble oljen hentet opp gjennom 11 produksjonsbrønner, mens fire injeksjonsbrønner sendte gassen ned igjen i reservoaret som trykkstøtte. Fra desember 2007 ble en ny fase innledet hvor også gassen på feltet skulle utvinnes. Til sammen ble det investert 1,15 milliarder kroner i utstyr for gasseskport og 450 millioner kroner i nye produksjonsbrønner [R.1.1]. I forbindelse med de nye investeringene på Njord-feltet ønsker operatøren Statoil å forlenge levetiden til Njord B ved å skifte ut anoder ved innfestingen til forankringssystemet STL. STL-turreten er et gjennomføringspunkt for rørledningene som kommer fra plattformen. Den er konstruert slik at skipet kan roteres fritt etter vind og strømretninger.



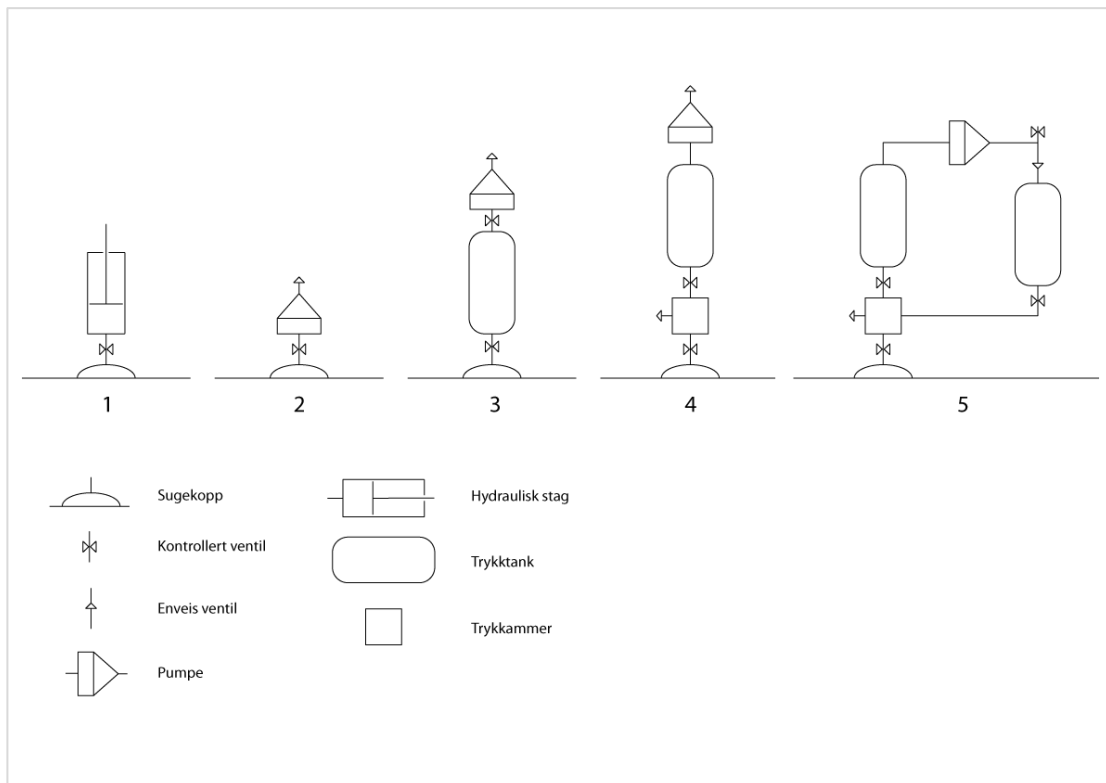
Figur 1.1: Njord B med forankringssystemet STL

LBO leverer tjenester og komplette prosjekter til olje- og gasssektoren, og har de siste årene spesialisert seg på områder med vanskelig tilkomst. De har gjennom interne utviklingsprosjekter og tidligere masteroppgaver ved NTNU gjennomført studier for å løse vedlikeholdsjobben på Njord B. Konvensjonell bruk av ROV og dykkere er utelukket grunnet store bølge- og strømningsbelastninger. Det er derfor behov for innfesting til skroget slik at vedlikeholdsarbeidet kan gjennomføres. Prosjektene konkluderte med at vakuumpumpe ville være den mest hensiktsmessige metoden for sporløs innfesting [R.1.2].

I prosjektoppgaven høsten 2011, utviklet vi et konsept for både innfesting og tilkomst til det aktuelle arbeidsområdet [R.1.3]. Resultatet ble en rektangulær ramme med en robotarm for gjennomføring av vedlikeholdsarbeidet. Sugekopper sørget for stabilitet ved innfesting til skroget (Figur 1.2). Vi undersøkte forskjellige sammenstillinger av vakuumsystemet (Figur 1.3) og konkluderte med at systemet skulle drives av en vakuumpumpe med trykktank som akkumulator for hurtig tilkobling, som vist i løsning 3. Det er usikkert hvordan faktorer som vann og ruhet påvirker innfestingskapasiteten. I samtaler med LBO våren 2012 [V.1], ble vi enige om å ta arbeidet med vakuuminntestning offshore videre.



Figur 1.2: Konsept fra prosjektoppgave



Figur 1.3: Blokkdiagram, løsning 1 - 5.

## 1.2 FORMÅL

Det foreligger ingen dokumentasjon på at eksisterende vakuumsystemer kan benyttes. Vi må derfor undersøke hvordan faktorer som vann og ruhet påvirker innfestingskapasitet. Systematisk testing i simulerte miljøer kan bygge opp kunnskap og danne et grunnlag for videre utvikling.

## 1.3 OMFANG

En testrigg må konstrueres og nødvendig utstyr kjøpes inn. En sugekopps festekapasitet er vanligvis oppgitt i normalkraft og skjærkraft avhengig av trykkdifferansen tilgjengelig. Det er nødvendig å teste hvordan denne kapasiteten endres som følge av ruhet og vann på kontaktflaten og hvorvidt vann i systemet kan håndteres. For å si noe om dimensjoneringen av sugekoppene må det undersøkes om det er en proporsjonal sammenheng mellom trykk/kraft og festeareal/kraft slik teorien tilsier.  $F=pA$  for normal påkjenning, og  $F=\mu pA$  for parallell påkjenning. Det er også nødvendig å undersøke nytteverdien ved å benytte en trykkakkumulator i systemet.

## 1.4 BEGRENSNINGER

Testene må gjennomføres i kontrollerte omgivelser slik at resultatene blir nøyaktige. Det ble besluttet å bestille utstyr som ville være ideelt til forsøkene, men som ikke nødvendigvis ville fungere til bruk i den reelle vedlikeholdsjobben uten modifikasjoner. Ved oppstart ble det utarbeidet en fremdriftsplan (Figur 1.4). Planlegging, bestilling og leveranse av utstyr tok mye lenger tid enn antatt. Som følge av dette ble det endringer i fremdriften (Figur 1.5).

Uke			
3	Oppgavedefinering Planlegging av oppgave Planlegging av testing Undersøke nødvendig utstyr Skaffe anbud Bestille deler		Møte med LBO
4			Oppgaveskriving
5			
6			Møte med LBO
7			
8			Oppgaveskriving
9		Planlegge testtrigg	
10			Oppgaveskriving
11	Bygge testtrigg		
12	Påske		
13			
14	Motta deler	Montere system  Testing	Oppgaveskriving
15			
16			
17			
18			Oppgaveskriving
19			
20	Analyse av resultater		
21			
22			
23			
24			Innlevering

Figur 1.4: Fremdriftsplan per 25.01.2012

Uke			
3	Oppgavedefinering Planlegging av oppgave Planlegging av testing Undersøke nødvendig utstyr Søke anbud Motta anbud Bestille deler		Møte med LBO
4			Oppgaveskriving
5			
6			Møte med LBO
7			
8			Oppgaveskriving
9		Planlegge testtrigg	
10			Oppgaveskriving
11	Bygge testtrigg		
12			
13	Påske		
14		Montere system  Testing	Oppgaveskriving
15			
16			
17			
18	Motta deler		Oppgaveskriving
19			
20			
21	Analyse av resultater	Testing	
22			Inspeksjon av LBO
23			
24			Innlevering

Figur 1.5: Reell fremdrift

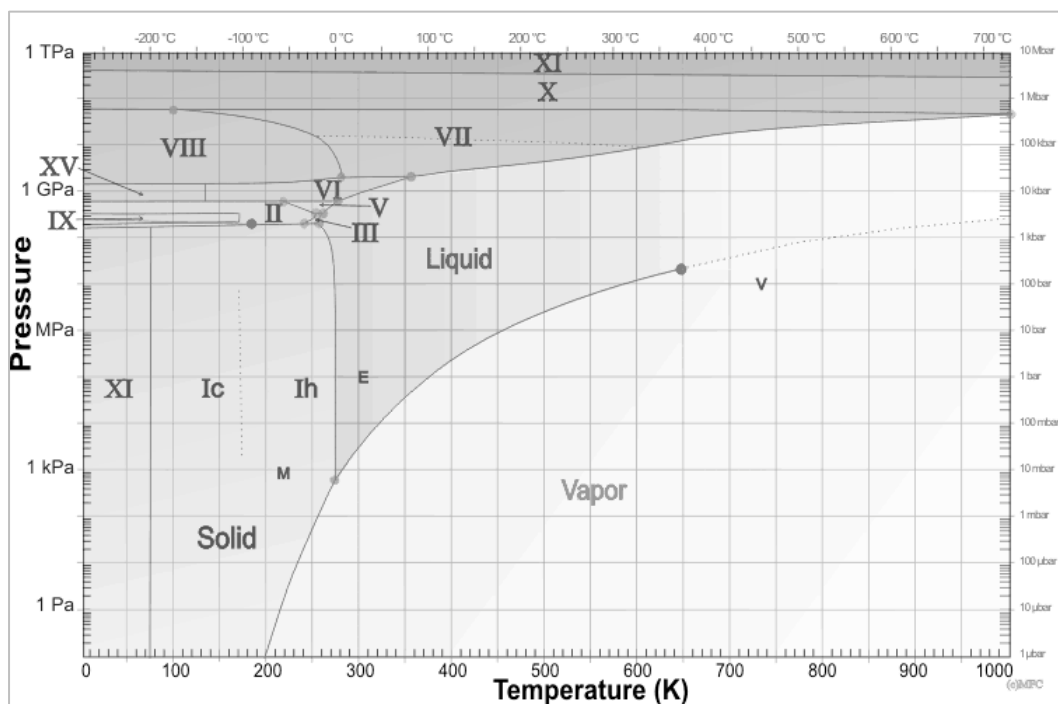
## 2 TEORI

### 2.1 VAKUUM

Når vi bruker termer som "vakuum", "negativt trykk" og "undertrykk" menes et trykk som er lavere enn omgivelsesstrykket. I luft er dette atmosfæretrykket, et trykk som kommer av luftens tyngde. Ved havoverflaten er dette normalt 1013 mbar (101.3 kPa). Da 1 Pa er det samme som 1 N/m, betyr dette at en søyle med luft med tverrsnitt på 1 m trykker på jordens overflate med en kraft på ca. 100 000 N. Dette kan brukes som en potensiell kraftkilde. Under havet er det, i tillegg til atmosfæren, vannets vekt som utgjør den arbeidende kraften. Ettersom vann har en høyere massetetthet enn luft, vil det hydrostatiske trykket i vann øke med 1 bar for hver tiende meter.

#### 2.1.1 VANN I VAKUUM

Vann endrer karakteristikk når trykket reduseres. Kurven mellom væske og damp på fasediagrammet (Figur 2.1) viser kokepunktet til vann ved forskjellige trykk. Ved 1 bar er koketemperaturen 100°C, men tas trykket ned til 100 mbar er koketemperaturen bare 50°C. Når vannet koker bruker det termisk energi til å frigjøre vannmolekyler i gassform. Temperaturen synker, og dersom trykket kommer under 8 mbar, vil vannet fryse [R.1.4]. Damputviklingen vil i et lukket system skape en trykkøkning. Dette kan være problematisk dersom effekten er stor.



Figur 2.1: Fasediagram for vann

## 2.2 SUGEKOPPER

Sugekopper virker ved at trykket fra omgivelsene presser sugekoppen mot en overflate. Dette forekommer bare dersom det omkringende trykket er høyere enn trykket mellom sugekoppen og overflaten (Figur 2.2). Jo større trykkforskjellen er, desto høyere er innfestingskraften.

$$F = \Delta p * A,$$

$$\Delta p = P_{AT} - P$$

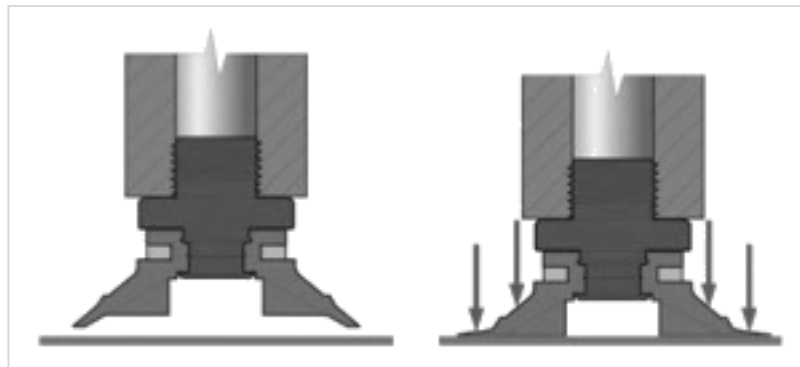
$F$  = innfestingskraft

$A$  = sugekoppens areal

$\Delta p$  = trykkforskjell

$P_{AT}$  = atmosfærisk trykk

$P$  = trykk i sugekopp



Figur 2.2: Sugekopp, omkringliggende trykk

En sugekopp kan brukes uavhengig av om kraften er vinkelrett eller parallell til overflaten. Dersom kraften er parallell, vil den overføres gjennom friksjon mellom sugekopp og overflate.

## 2.3 TRYKKFALL I VAKUUMSLANGER

Treghet i luftstrømmen vil føre til en trykkdifferanse mellom pumpens inntak og sugekoppens innfesting. Riktig diameter og lengde på vakuumslangen er avgjørende for å redusere denne effekten. Trykkfallet kan kontrolleres ved å benytte følgende formler [R.1.5]:

$$\Delta P = \frac{1,6 * 10^{12} * qv^{1,85} * L}{d^5 * P1}$$

$$\Delta d = \left( \frac{1,6 * 10^{12} * qv^{1,85} * L}{\Delta P * \Delta P1} \right)$$

$\Delta P$  = Trykkfall i kPa

$qv$  = strømning i m<sup>3</sup>/s

$d$  = innvendig diameter i mm

$L$  = slangelengde i m

$P1$  = absolutt begynnelsestrykk i kPa

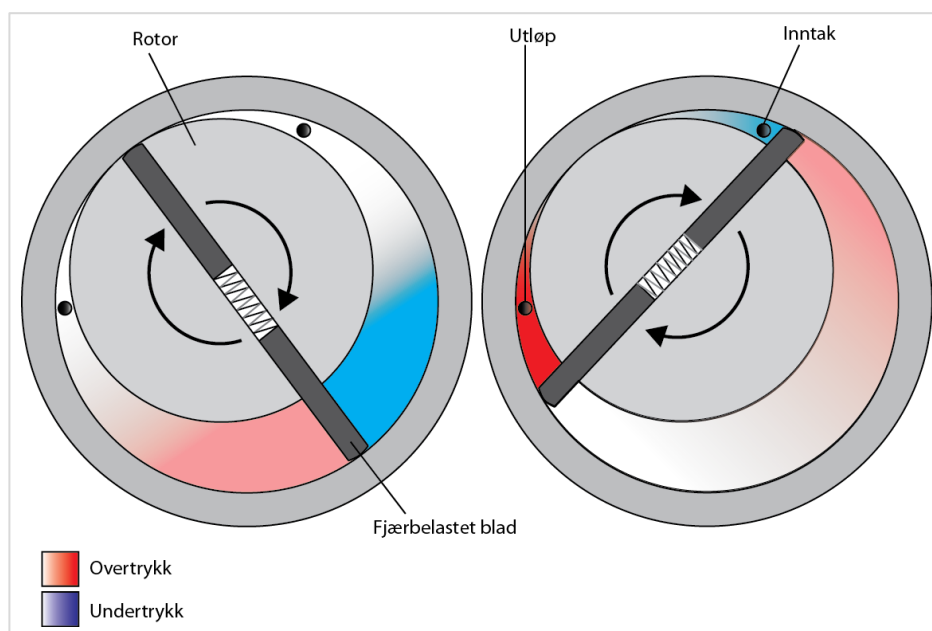
Formelen viser at ved konstant strømning, vil trykkfallet være lineært avhengig av lengden. Økt diameter vil redusere fallet betraktelig. Når strømningen er null, vil ikke det være noe trykkfall. Følgelig vil trykkdifferansen bare forekomme ved initiering av vakuum, eller ved en lekkasje i systemet.

## 2.4 VAKUUMPUMPER

Hovedprinsippet for alle vakuumpumper er at de transporterer fluid ut fra et lukket system, og på denne måten skaper et undertrykk. Vakuumpumper har vanligvis en elektrisk motor som drivkraft, men det kan også være en intern forbrenningsmotor, en hydraulisk motor eller en motor drevet av trykkluft. Det ble tidlig i oppgaven klart at ingen av leverandørene vi kontaktet hadde erfaring med bruk av vakuum under vann. Det ble dermed undersøkt forskjellige typer pumper. To typer vakuumpumper ble uthevet. Rotary vane pumper og væskeringspumper.

### 2.4.1 ROTARY VANE

En rotary vane pumpe er en av de mest brukte vakuumpumpene, og består av en eksentrisk roterende rotor i et større sirkulært pumpehus (Figur 2.3). Bladene kan gli inn og ut av rotoren i radial retning, slik at de alltid har forseglende kontakt med beholderen og på denne måten danner et kammer. Ved inntaket vil kammeret øke i volum, noe som skaper undertrykk slik at luften strømmer inn. Ved utløpet minsker kammerets volum, og luften blir presset ut. Pumpen kan oppnå et vakuum på 0,05 mBar [R.1.6]. Ulempen med denne typen pumper er at de krever god oljesmøring, og vann kan skape problemer dersom det entrer pumpen [R.2.5].

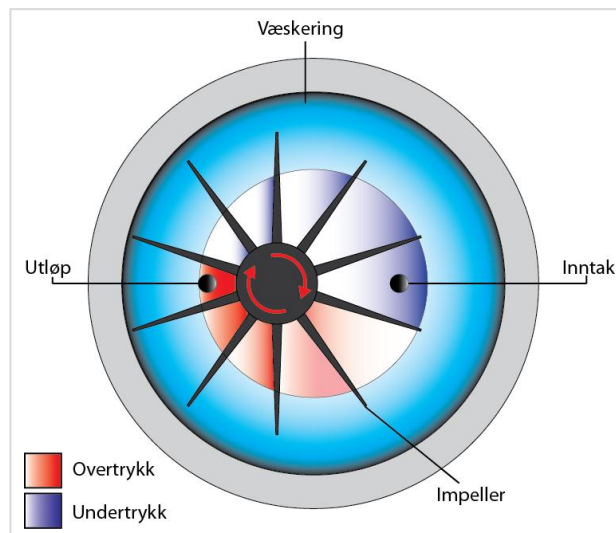


Figur 2.3: Rotary vane pump

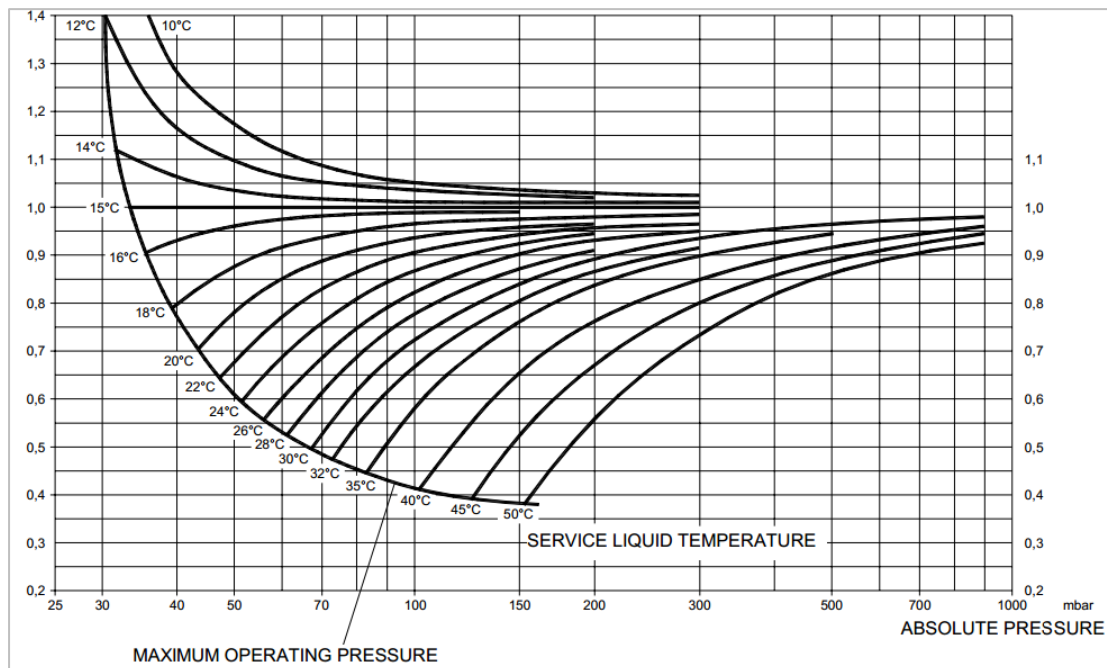
### 2.4.2 VÆSKERINGSPUMPE

Væskeringspumper bruker også prinsippet med eksentrisk roterende blader, men i denne pumpen er bladene fastmontert på en impeller, og en ring med roterende væske brukes for å forsegle kamrene (Figur 2.4). Dette fører til at glidefriksjonen begrenses til rotasjonsakslingens forsegling, og er følgelig lav. Pumpen er meget hardfør i forhold til eksterne partikler og eventuelle væsker som entrer pumpen.

Vann er den mest brukte ringvæsken. Når trykket senkes, senkes også vannets kokepunkt. Skulle det oppstå koking i ringvæsken, vil det forekomme kavitasjon på impelleren [R.1.7]. Pumpen kan derfor ikke levere lavere trykk enn 33 mbar [R.1.8] og som Figur 2.5 viser, må ringvæsken da holde 12°C eller mindre.



Figur 2.4: Væskeringspumpe



Figur 2.5: Kavitasjonsgrense trykk/temperatur



## 3 TESTOPPSETT

### 3.1 UTSTYR

I forprosjektet høsten 2011 ble det utarbeidet et konsept for oppsett av vakuumsystemet (Figur 1.3, løsning 3). Dette bestod av sugekopp, vakuumpumpe og trykktank. Tanken skulle fungere som vakuumakkumulator, og samtidig hindre vann i å nå pumpen. For å kunne teste systemet måtte enkeltkomponentene vurderes og anskaffes.

#### 3.1.1 VALG AV SUGEKOPPER

En sugekopps utforming og størrelse er avgjørende for innfestingsevnen. Vakuumteknologi er utbredt i industrien og brukes for å behandle blant annet mat, pappesker, trevirke, glassplater og steinblokker på flere tonn [R.1.9]. Vi trengte sugekopper som kunne feste seg til stålplater, både vertikalt og horisontalt. For å teste sammenhengen mellom areal og innfestingskraft var det også behov for forskjellige størrelser.

Etter å ha rådført oss med salgssingeniør Roar Haukenes ved Aratron AS [R.1.10], kom vi frem til de tre sugekoppene i Figur 3.1, fra den svenske leverandøren Piab [R.1.4]. Sugekoppene er godt egnet for flate overflater og gir god stabilitet. Innvendige bommer gir god horisontal innfesting (Figur 3.2). Tallene etter bokstaven F, indikerer sugekoppens diameter.



Figur 3.1: F75, F110 og F150

Str.	Løftekraft vinkelrett med overflaten, N, ved vakuumnivå			Løftekraft parallelt med overflaten, N, ved vakuumnivå			Max. bevegelse i høyden mm
	20 -kPa	60 -kPa	90 -kPa	20 -kPa	60 -kPa	90 -kPa	
<b>F75</b>	80	200	270	60	110	140	3.0
<b>F110</b>	140	420	560	140	250	300	4.0
<b>F150</b>	300	850	1100	250	600	800	6.0

Figur 3.2: Løftekrefter og tekniske data for valgte sugekopper.

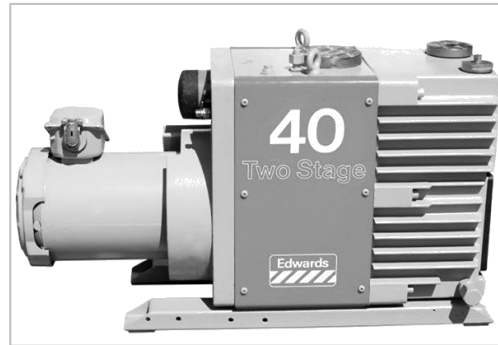
### 3.1.2 VALG AV PUMPE

For å teste sugekoppens innfestingskapasitet mot oppgitte spesifikasjoner (Figur 3.2), måtte det genereres 90 kPa trykkdifferanse. Det betyr at pumpen måtte skape et vakuum på minst 100 mbar. Deler av testingen krevde en pumpe som tåler vann i pumpehuset, med mindre vannet hindres fra å nå pumpen. Høy kapasitet var ønskelig, men ikke et krav.

Gjennom dialog med Rune Haug ved Vakuumservice AS [R.1.11] ble det uthevet to alternativer. Edwards E2M40 (Figur 3.3) og Travaini TRMB 25-30 (Figur 3.4).



Figur 3.3: Travaini TRMB 25-30



Figur 3.4: Edwards E2M40

Pumpe	Travaini TRMB 25-30/C/GH	Edwards E2M40
Type	Væskeringspumpe	Rotary vane pump
Kapasitet	991 L/min	708 L/min
Minimalt trykk	33 mbar	0,05 mbar
Pris	13 000 NOK	15 000 NOK
Fordeler	Pris Høyere kapasitet Toleranse for vann	Høyt vakuum
Ulemper	Høyere minimalt trykk	Oljesmurt Intoleranse for vann

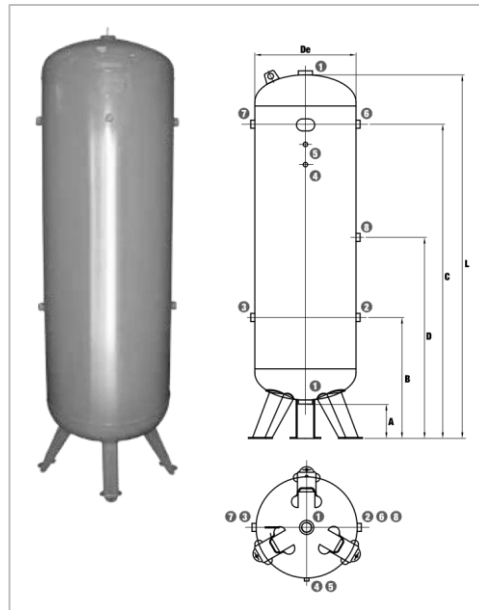
Begge pumpene kan levere tilstrekkelig vakuum, men den avgjørende faktoren for valg av pumpe ble væskeringspumpens toleranse for vann. Dette vil gjøre testingen mer fleksibel og mindre risikabel.

### 3.1.3 TRYKKTANK

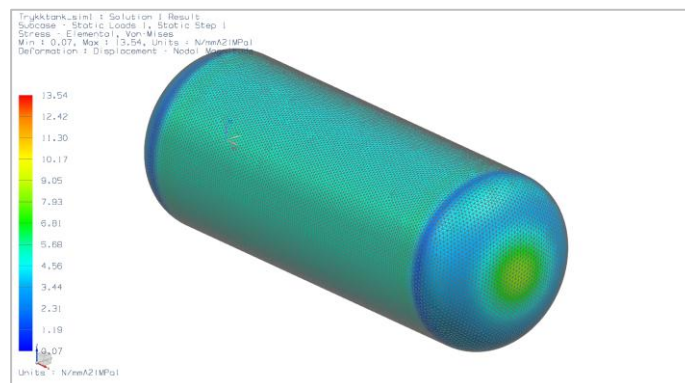
Ved hjelp av noen enkle beregninger, kom vi frem til at volumet på tanken måtte være 50-100 liter for 95-96% bevart undertrykk ved trykkutligning [V.4]. LBO skaffet en trykklufttank på 100 liter (Figur 3.5). Tanken er beregnet for 11 bar indre overtrykk i drift. Ved indre undertrykk vil tankens styrke reduseres, da de indre spenningene ikke lenger forplantes utelukkende som strekk.

Vi foretok en FEM analyse av tanken med indre undertrykk for å undersøke hvorvidt den ville tåle belastningen. Analysen ble utført med atmosfærisk trykk på tankens overflate. Forskyvningen er absolutt, og ble følgelig størst i den frittstående enden av tanken. Med maksimal spenning på 13,6 Mpa (Figur 3.6) maksimal deformasjon på 0,044 mm (Figur 3.7), ble det konkludert at tanken

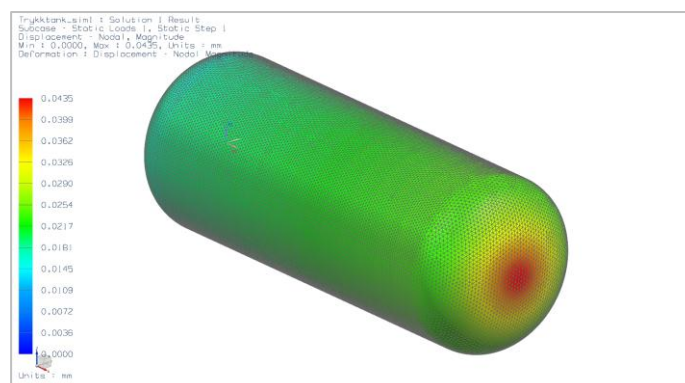
kom til å tåle indre vakuüm. Tanken ble likevel trykktestet under kontrollerte omgivelser før den ble tatt i bruk under forsøk.



Figur 3.5: Baglioni VE60064



Figur 3.6: Spenning



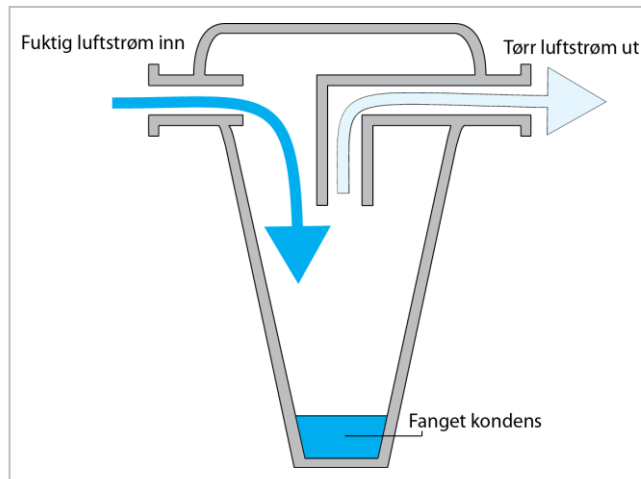
Figur 3.7: Deformasjon

### 3.1.4 KONDENSAVSKILLER

For å enkelt kunne fjerne vann i systemet trengtes en kondensavskiller (Figur 3.8). Dette er en enkel innretning designet for å skille ut væske fra en fuktig luftstrøm. Væskebeholderen kan enkelt skrues av for tømning av oppfanget vann. Figuren viser hvordan luftstrømmen inn i kondensavskilleren går inn i væskebeholderen, mens strømmen ut hentes fra toppen av beholderen (Figur 3.9).



Figur 3.8: Kondensavskiller, 1 liter



Figur 3.9: Kondensavskiller, forklaring

### 3.1.5 KOBLINGSPUNKTER

For å koble sammen vakuumsystemet ble det brukt et hurtigflens system, kjent under ISO standard som QF (Quick Flange), KF, NW, eller DN. Disse koblingene fungerer ned til  $10^{-8}$  mbar, og er enkle å montere og demontere. DN25 er en kjønnsløs flens med skrå bakside og 25 mm indre diameter. Den bruker en elastisk o-ring montert på en senteringsring i metall til tetning, og monteres med en klem-ring [R.1.12].

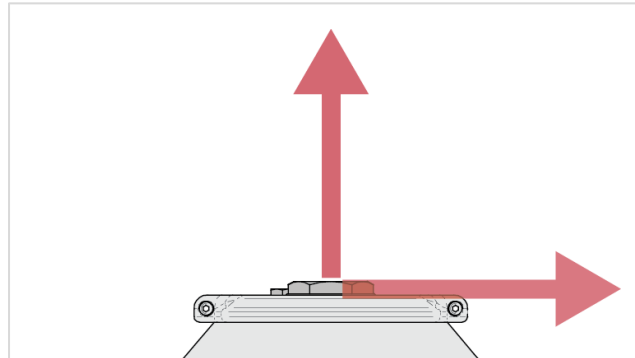


Figur 3.10: DN25

Det er i tillegg mulig å lage et vakuumsystem med gjengede overganger, og dette var nødvendig i et par koblingspunkter på vakuumsystemet, blant annet ved inngangen til vakuumpumpen, til trykktanken og til sugeskoppen. For å tette slike koblinger er det viktig å bruke gjengetape.

## 3.2 UTVIKLING AV TESTRIGG

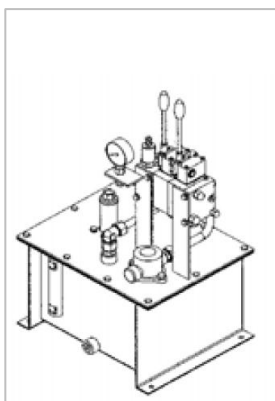
Sugekoppenes løftekraft skulle testes parallelt og normalt til underlaget. Dermed måtte kraft påføres ved draging vertikalt, og draging eller skyving horisontalt på en vannrett flate (Figur 3.11).



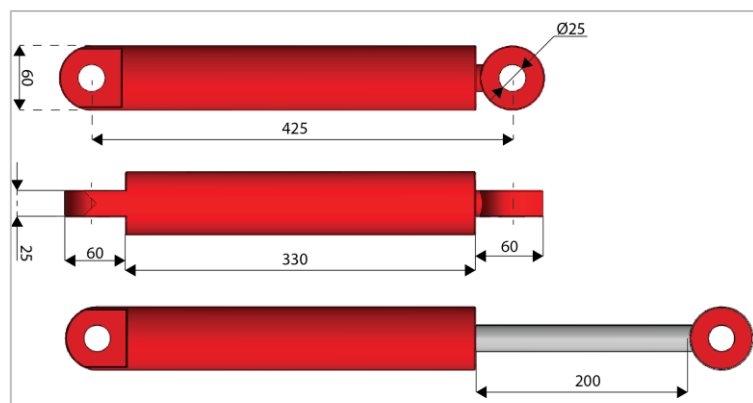
Figur 3.11: Kraft på sugekopp

Kraften måtte være stor nok til å overkomme sugekoppenes maksimale kapasitet, 1100 N vertikalt og 800 N horisontalt. Det var derfor nødvendig å benytte trykkluft, hydraulikk eller lignende lineær aktuator.

LBO hadde to hydrauliske sylindere tilgjengelig som de ønsket at vi skulle bruke. De skulle drives av en HPU (Figur 3.12), en hydraulisk ventil som omgjør 1,5–10 bar trykkluft til 100 bar hydraulisk trykk [V.3]. Sylinderne kan ved dette trykket yte tilstrekkelig skyvekraft og drakraft til testingen. Målene i Figur 3.13 er basert på egne målinger ettersom datablad ikke var tilgjengelig. For å holde sylinderne, og oppta påførte krefter, måtte det utvikles og bygges en testrigg.



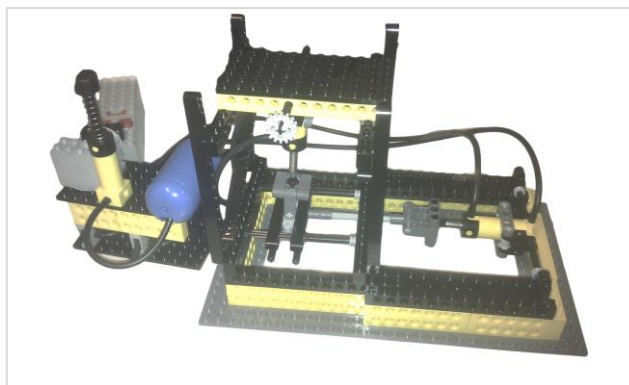
Figur 3.12: HPU



Figur 3.13: Mål på hydraulisk sylinder

### 3.2.1 PROTOTYPE, LEGO-MODELL

Etter å ha jobbet med konseptskisser på tegneblokken, ble det bygget en prototype i LEGO (Figur 3.14). På den måten kunne testtriggens funksjoner og begrensninger lettere visualiseres. Ved hjelp av prototypen fant vi ut at vi måtte se nærmere på innfestingen av de to sylindriske stagen. LEGO modellen ble også brukt for å kommunisere ideen vår med Martin Hasle hos LBO. Modellen består av LEGO, med fungerende sylindriske stag. Disse blir drevet av trykkluft fra en elektrisk drevet pumpe. En liten trykktank fungerer som akkumulator og man kan også fylle denne ved hjelp av en liten hånddrevet pumpe. Den første prototypen ble laget med skinnegang for den vertikale sylindren. Forbedringer ble gjort for å gjøre konstruksjonen enklere, kompakt og mer realistisk (Figur 3.15).



Figur 3.14: LEGO-modell, første utkast



Figur 3.15: LEGO-modell, andre utkast

### 3.2.2 PROTOTYPE, CAD-MODELL

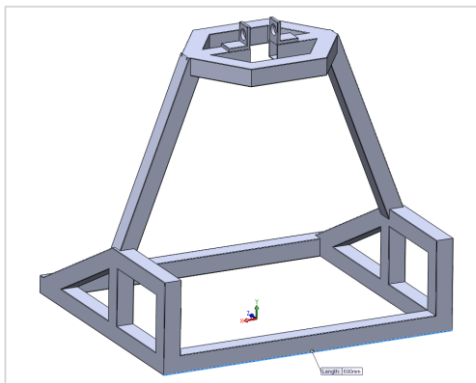
SolidWorks ble brukt for å skape en enkel modell av testriggen. Rammen skulle dimensjoneres etter de hydrauliske sylindrene, med plass til nødvendig gange. Det ble bestemt at testriggen skulle være modulbasert for å gjøre den mer håndterbar. Den måtte tåle minimum 1100 N, som er forventet innfestingskraft til den største sugekoppen. Det ble utført styrkeberegninger med FEM analyse i NX Nastran for å undersøke hvorvidt rammen ville tåle belastningene som skulle påføres.

### 3.2.3 DETALJERING

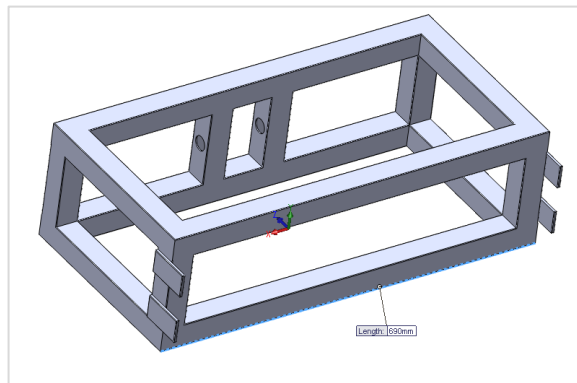
Stålrør med firkantprofil i 40x40 mm og veggtykkelse 2 mm ble valgt som material. Vi modellerte en ramme som inkluderte oppheng til akslinger for montering av sylindrene (Figur 3.16 og Figur 3.17). For å avlaste akslingen på vertikalrammen ble det lagt til avstivere rundt opphenget.

For å gjøre simuleringen enklere utnyttet vi rammens symmetri og kjørte simulering på halve modellen. Den første analysen ble foretatt med akslingen fastholdt i x-aksens retning, men avstiverne var frittstående, slik at de ikke påvirket riggens stivhet. Dette ble gjort for å teste hvorvidt det ville være en nødvendig komponent (Figur 3.18 og Figur 3.19). Deretter ble avstiverne også fastholdt i x-retning (Figur 3.20 og Figur 3.21). Begge analysene ble utført med 5 kN. Avstiverne ga 35% spenningsreduksjon, og halverte nedbøyningen.

Den horisontale rammen falt innenfor godkjente verdier med maksimal nedbøyning på 1,3 mm (Figur 3.22), og en maksimal spenning på 185 Mpa (Figur 3.23).

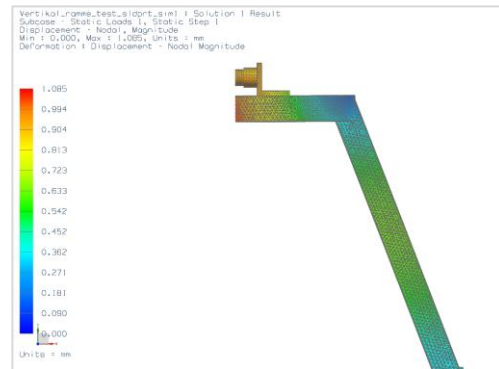


Figur 3.16: Versjon 1, vertikalramme

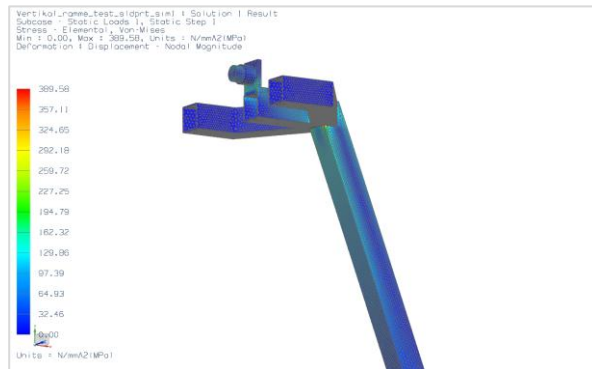


Figur 3.17: Versjon 1, horisontalramme

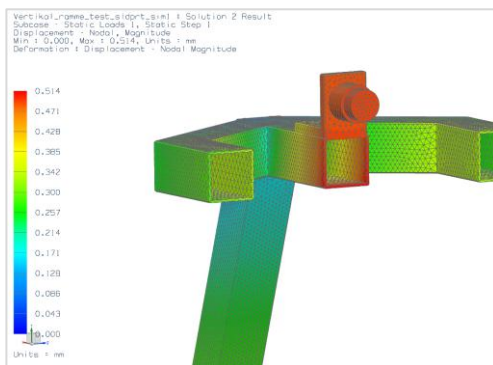




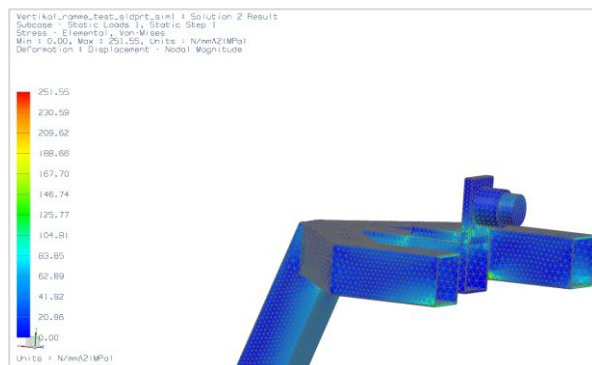
**Figur 3.18: Vertikalramme, uten avstivere, deformasjon**



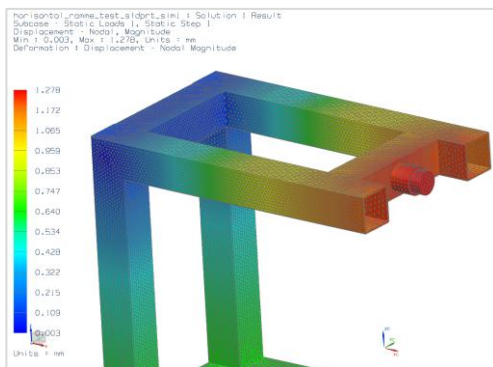
**Figur 3.19: Vertikalramme, uten avstivere, spenning**



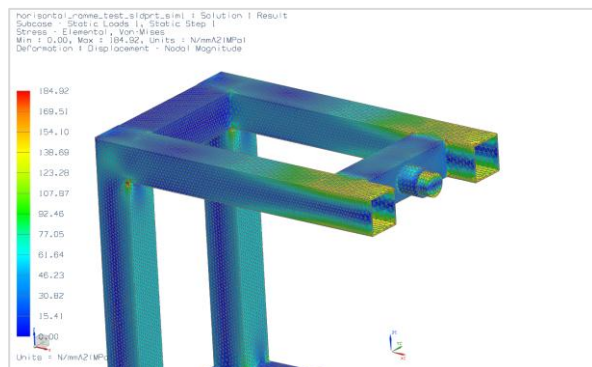
**Figur 3.20: Vertikalramme, med avstivere, deformasjon**



**Figur 3.21: Vertikalramme, med avstivere, spenning**



**Figur 3.22: Horisontalramme, deformasjon**

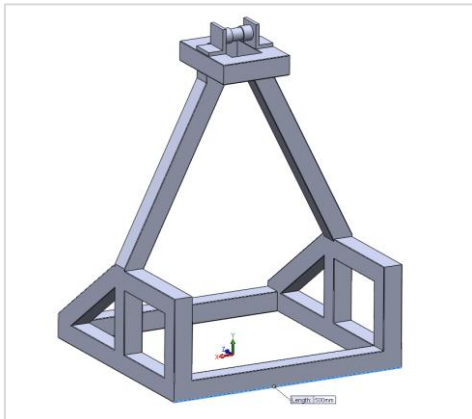


**Figur 3.23: Horisontalramme, spenning**

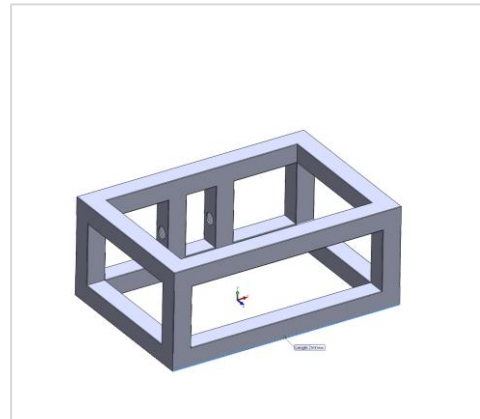
I den endelige modellen ble det flere endringer. Den største sugekoppen er 150 mm i diameter, og rammen kunne derfor lages mindre. Bredden ble redusert fra 690 til 500 mm (Figur 3.25). Avstiverne ble gjort mindre, og skråbjelkene ble festet direkte under opphenget (Figur 3.24). Analyse ble gjort på hele modellen, med 10kN belastning på akslingen.

Rammen ble sterkere med det nye designet. Med 91 Mpa som høyeste spenning (Figur 3.26), og nedbøyning på 0,18 mm (Figur 3.27) ble designet godkjent.. Rammen er overdimensjonert, for å overkomme eventuelle svakheter i sveiser ved egenproduksjon. Dette er en fordel dersom LBO vil foreta tester med større sugekopper på et senere tidspunkt.

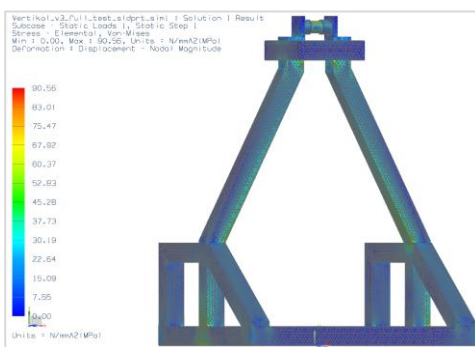




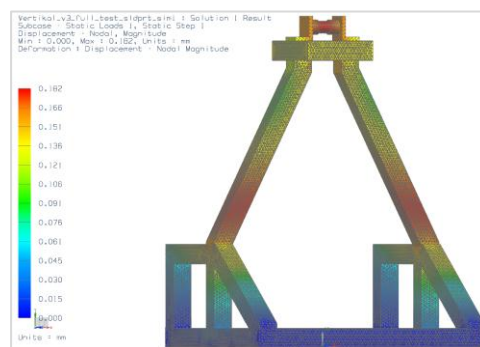
Figur 3.24: Versjon 2 vertikalramme



Figur 3.25: Versjon 2, horisontalramme



Figur 3.26: Versjon 2 vertikal, spenning



Figur 3.27: Versjon 2 vertikal, deformasjon

### 3.2.4 ENDELIG DESIGN

Alle komponenter som skulle monteres på testriggen ble lagt til modellen for å kontrollere at alt passet (Figur 3.28). Den endelige modellen bærer flere likhetstrekk med legomodellen den var inspirert av.



Figur 3.28: Sammensatt modell

### 3.3 PRODUKSJON AV TESTRIGG

Testriggens ramme og alle festeordninger måtte produseres (Figur 3.29). Mål på de nødvendige rørstykkene ble hentet ut fra modellen i SolidWorks. Rørstykkene ble kuttet i riktige lengder med riktige vinkler og sveist sammen.



Figur 3.29: Arbeid i verkstedet

For oppheng av hydrauliske sylindre og montasje av lastceller og sugeskopp, måtte egne festeordninger produseres. Til den vertikale sylindren ble det produsert enkle braketter, sagt til fra en 10 mm stålplate og gjennomboet med 25 mm bor. Brakettene ble sveiset fast på toppen av den vertikale rammen (Figur 3.30).



**Figur 3.30: Braketter for vertikalsylinder**

Det var ønskelig å ha mulighet for høydejustering på den horisontale sylindere. Brakettene ble sagt ut fra en 10 mm stålplate, og spor frest ut med 25 mm bredde. Disse ble sveiset fast til baksiden av horisontalrammen (Figur 3.31).



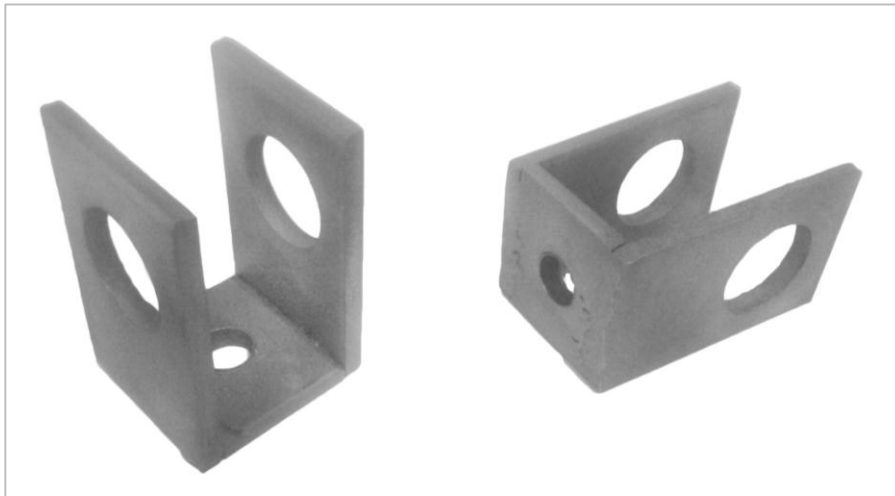
**Figur 3.31: Braketter for horisontalsylinder**

Gjennom disse brakettene skulle en boltaksling holde den hydrauliske sylindere. En stang med 25 mm diameter ble sagt til passende lengde og gjenget med M24 i begge ender (Figur 3.32).



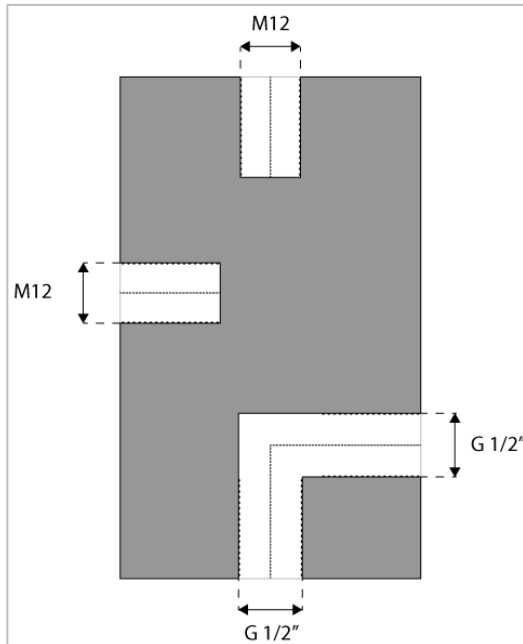
**Figur 3.32: Bolt**

For å feste hver sylinder til en lastcelle ble det konstruert u-braketter, sveiset sammen av tre 4 mm platestykker (Figur 3.33). Sylindrerne ble festet med M24 skruer og lastcellene med en M12 skrue.



Figur 3.33: U-brakett

Et solid stykke stål med dimensjonene 40x60x100 mm, ble boret fra undersiden og baksiden for å skape en gjennomgående vinkelrett kanal (Figur 3.34). Hullene ble gjenget til G $\frac{1}{2}$ " og innsatt ansatsnipler for tilkobling til henholdsvis sugekopp og vakuumslange. To hull ble boret og gjenget på toppen og framsiden for tilkobling av lastceller med M12 skruer. Det ferdige festet kan sees i (Figur 3.35).



Figur 3.34: Feste til sugekopp, skisse



Figur 3.35: Feste til sugekopp

### 3.3.1 TESTBASSENG

En del av forsøkene gikk ut på å undersøke hvordan vakuumsystemet oppfører seg når sugekoppene står nedsenket i vann. Vi måtte derfor lage et basseng. Dette måtte være stort nok til å romme testrigger og stålplatene det skulle testes på. Det viste seg at en europall var stor nok, og denne ble brukt som bunn i bassenget. En palleramme ble plassert oppå pallen, og rammen ble trukket med en vanntett presenning.



**Figur 3.36: Testbasseng**

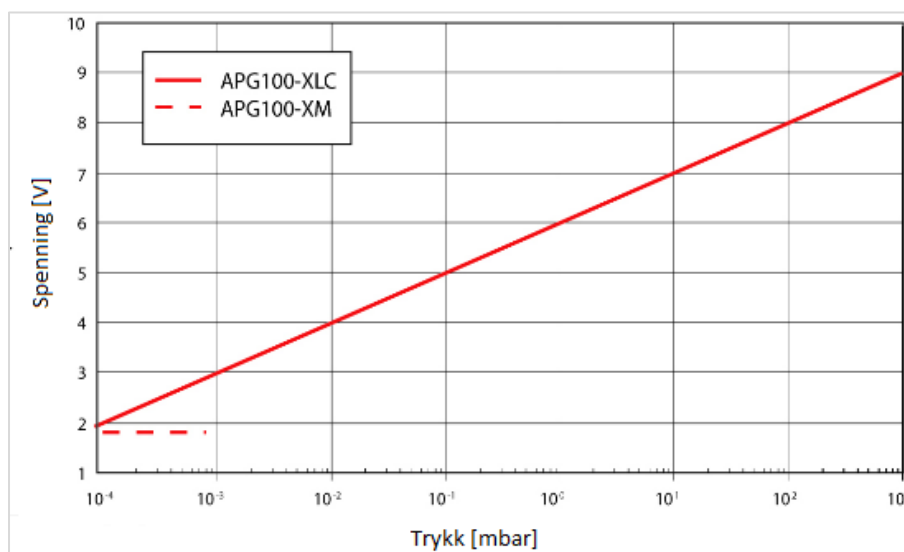
## 3.4 INSTRUMENTERING & MÅLEDATA

### 3.4.1 TRYKKMÅLER

Edwards APG100-XM (Figur 3.37) er en trykkmåler som kan måle trykk ned til  $10^{-3}$  mbar. Den benytter prinsippet om varmeledningsevne, der raten av varmetap fra et oppvarmet filament er avhengig av trykket til den omkringende gassen [R.1.13]. Outputet fra måleren er et lineært spenningsignal, som ved hjelp av sammenhengen  $P=10^{(V-6)}$ , der V er spenningen, gir oss trykket P (Figur 3.38). Signalet sendes til en A/D konverter av typen Hottinger Spider8, og omregnes og logges i programmet catman®Easy. Sensoren ble koblet til vakuumsystemet med en DN16 flens.



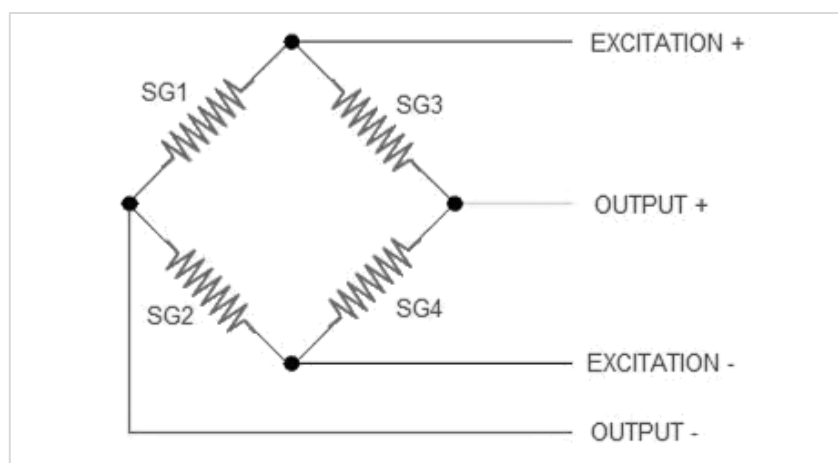
Figur 3.37: Edwards APG-100-XM



Figur 3.38: Signalspenning – målt trykk

### 3.4.2 LASTCELLER

En lastcelle er en transducer som brukes til å konvertere en kraft til et elektrisk signal. Denne konverteringen skjer i to stadier. Gjennom et mekanisk arrangement deformerer den påsatte kraften en tøyingsmåler. Tøyingsmåleren konverterer deformasjon (tøyning) til elektriske signaler. En lastcelle består vanligvis av fire strekkklapper i en Wheatstone bro konfigurasjon med fire kontakter: positiv og negativ eksitasjon, samt positiv og negativ outputkontakter. Eksitasjonskontaktene er koblet til en strømkilde, mens output gir ut en spenning som kan gjøres om til en kraftmåling basert på kalibreringsfaktorer av den spesifikke transduceren. Det elektriske signalet er vanligvis i størrelsesordenen millivolt og krever forsterkning av en instrumenteringsforsterker før den kan brukes. Outputen av transduceren behandles av en algoritme for å beregne kraften [R.1.14].



Figur 3.39: Wheatstone bro konfigurasjon

Et galvanometer er koblet mellom utgangsterminalene, og brukes til å overvåke strøm fra en spenningsdeler til en annen. Hvis de to spenningsdelerne har nøyaktig samme forholdet,

$$\frac{SG1}{SG2} = \frac{SG3}{SG4}$$

er broen balansert og fører ikke strøm gjennom galvanometeret. Hvis en av motstandene endrer verdi, vil broen bli ubalansert og strøm vil flyte gjennom galvanometeret.

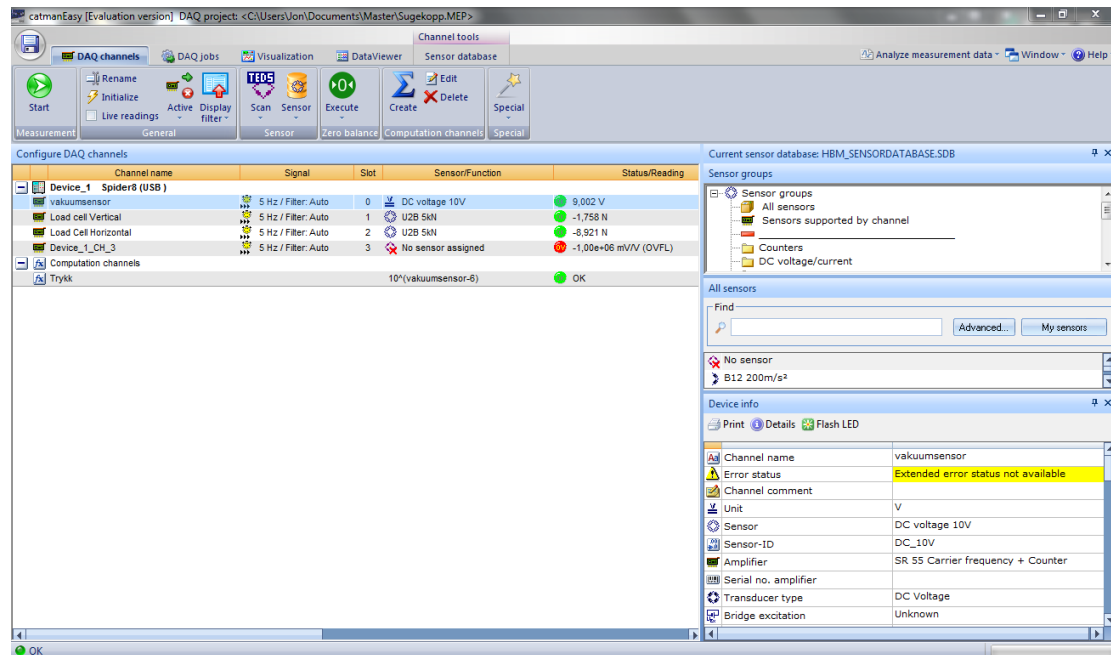


Figur 3.40: HBM U2b

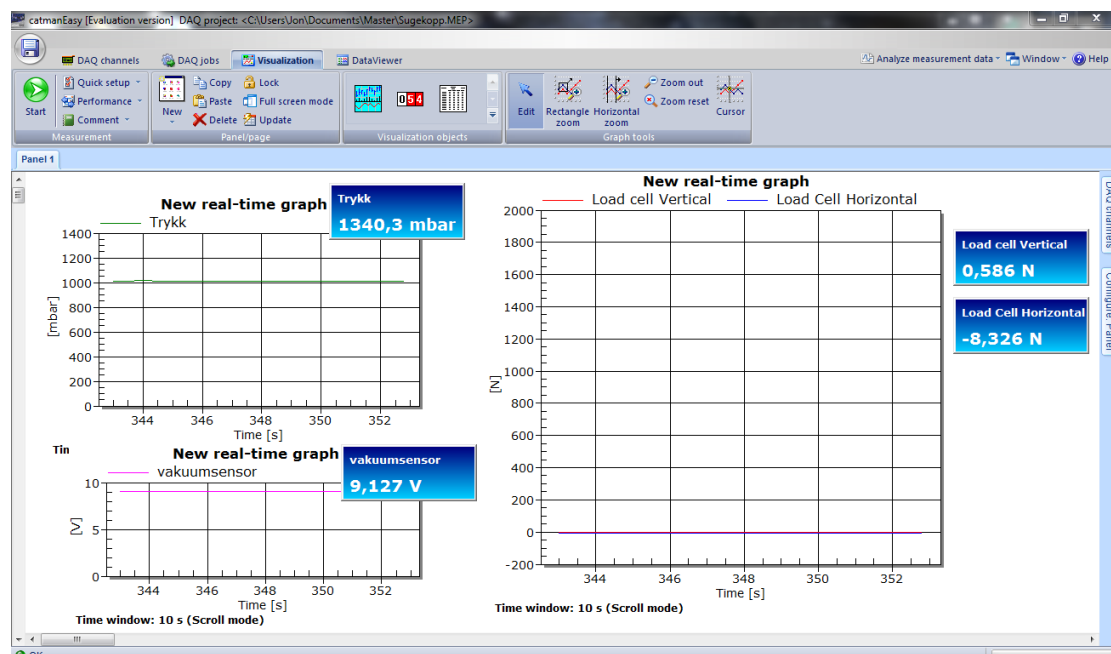
I oppgaven bruker vi to lastceller av typen HBM U2b. Begge lastcellene kobles til Hottinger Spider 8 enheten.

### 3.4.3 BESKRIVELSE AV PROGRAMVARE

CatmanEasy er et dataprogram for logging, plotting og analyse av måledata (Figur 3.41 og Figur 3.42). Dette omgjør elektriske signaler fra Spider8 enheten til håndfaste tall og verdier. Vi fikk hjelp av Halvard Støver til innstilling og oppsett av programmet [R.2.6]. CatmanEasy kommer med de fleste sensorer ferdiginstallert. Vakuumsensoren måtte installeres som en spenningskilde som ble omregnet til trykk i sanntid (Figur 3.41 og Figur 3.42).



Figur 3.41: Input kanaler



Figur 3.42: Visualisering



## 4 TESTING



Figur 4.1: Testoppsett

Systemet ble montert i verkstedet ved IPM i henhold til vedlagt koblings skjemaet [V.5]. Før forsøkene ble satt i gang, utførte vi en trykktest for å utelukke lekkasjer. Vi oppdaget et betydelig trykkfall i systemet, og ved å åpne og stenge de forskjellige ventilene identifiserte vi en lekkasje i trykktanken. Den har totalt seks åpninger. Vi brukte derfor en lekkasjedetektor for å finne hvilken av inngangene som måtte tettes. Den aktuelle pluggen ble inspisert og påført en ny runde gjengetape.

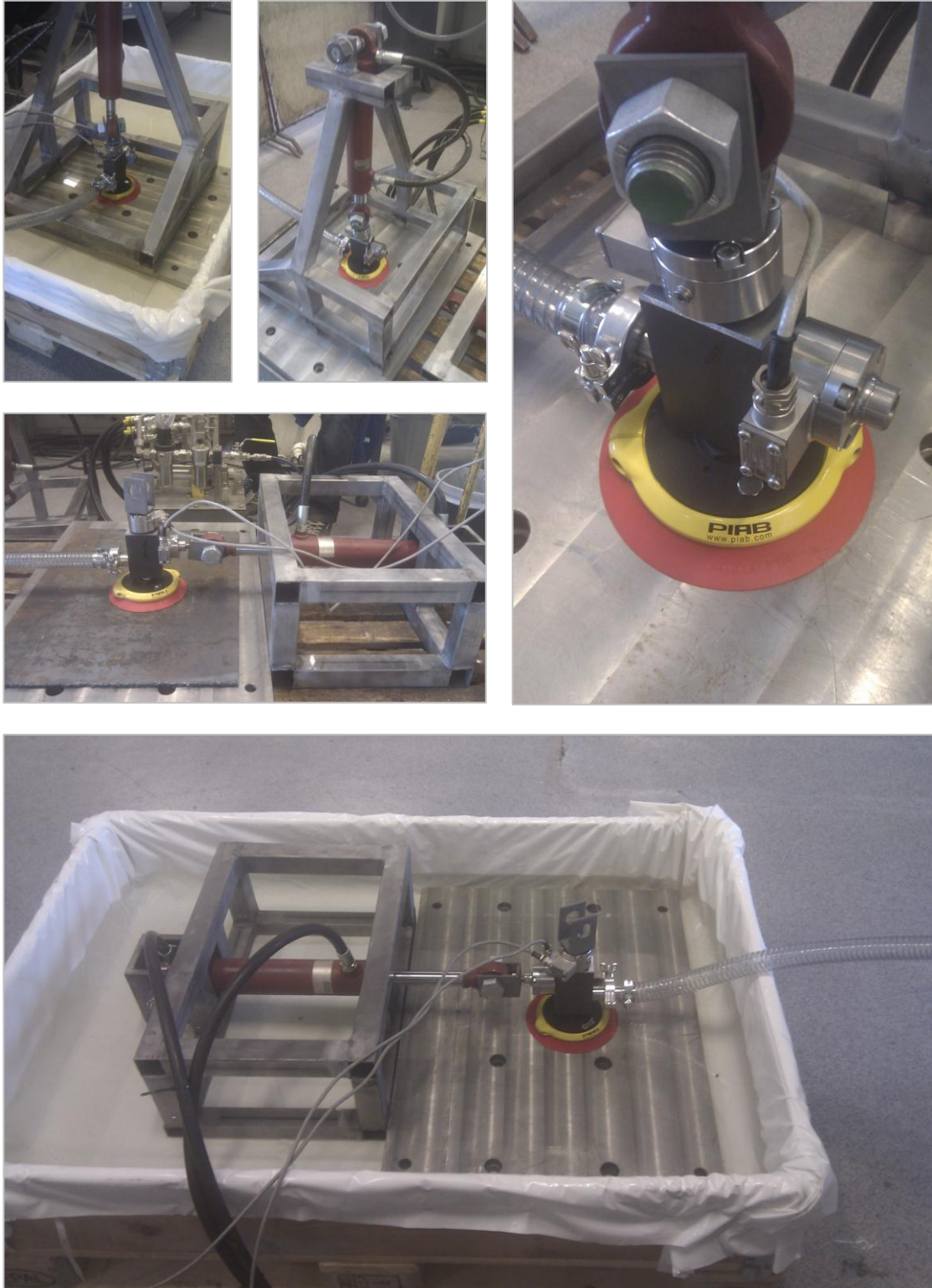
Væskeringspumpen fra Travaini ble levert 1. juni, så vi benyttet instituttets vakuumpumpe på noen av testene. Det er en Edwards E2M5 med lignende spesifikasjoner som E2M40 [3.1.2]. Denne kunne ikke benyttes for å gjennomføre tester som innebar kontakt med vann.

### 4.1 INNFESTINGSKAPASITET

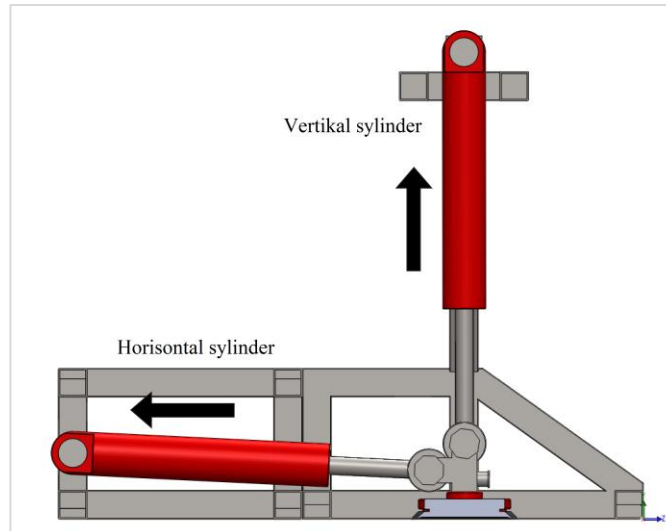
Vi ønsket å undersøke hvorvidt innfestingskapasiteten endres som følge av ruhet og vann på innfestingsflaten, og om innfesting er skalerbart.

Vannmolekyler er større enn de minste molekylene i luft, noe som kan gi bedre forsegling. Derimot kan friksjonen svekkes av en vannfilm som blir liggende mellom sugekoppen og underlaget. For å teste dette ble sugekoppen festet og påført en jevnt økende kraft, til sugekoppen løsnet fra underlaget. Testene ble utført i vertikal og horisontal retning, som vist på Figur 4.3.

Teoretisk sett skal innfestingskraften tilsvare trykkdifferanse ganger innfestingsareal,  $F = \Delta p A$ , for vertikal innfesting og trykkdifferanse ganger innfestingsareal og friksjonskoeffisient,  $F = \Delta p A \mu$ , for horisontal innfesting. Ved å variere innfestingstrykket ved konstant areal, og arealet ved konstant trykk, skal vi se om dette stemmer i praksis.



Figur 4.2: Bilder fra testing



Figur 4.3: Riggens kraftoverføring

## 4.2 VAKUUMTANK

For å undersøke nytteverdien av en vakuumtank så vi på innfestingshastigheten med og uten tank. Det skulle også undersøkes hvordan en vakuumtank kan påvirke trykket ved en eventuell lekkasje. Dette ble gjort ved å plassere sugekoppen over en sprekk i den ene platen og observere trykkfallet.

## 4.3 VANN I VAKUUMSYSTEMET

Når man har vann i et vakuumsystem med lavt trykk kan dette begynne å koke. Et eventuelt trykkfall skulle registreres.

## 4.4 LOGGING

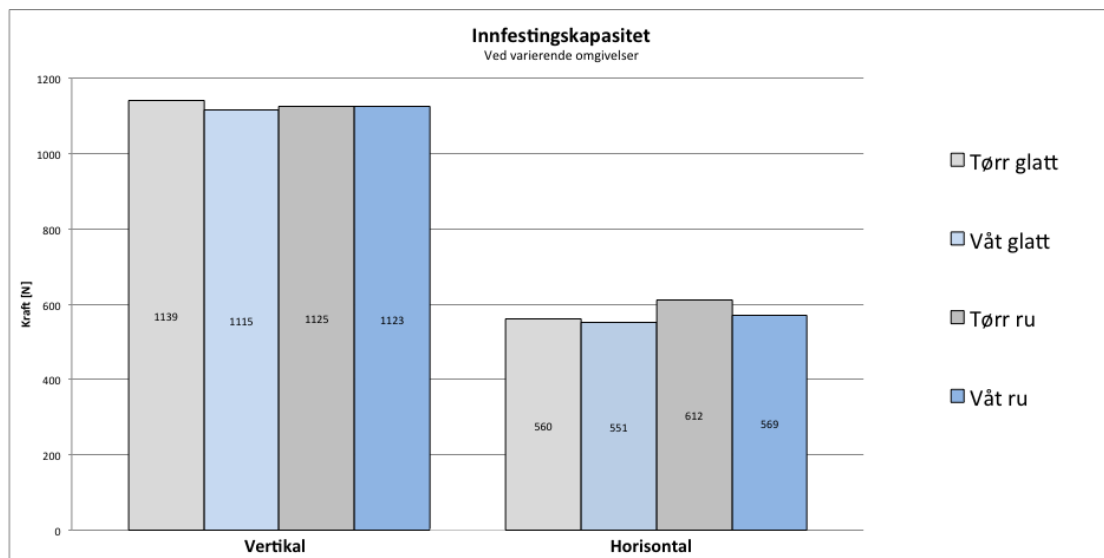
Alle måledata ble lagret og eksportert til Microsoft Excel for analyse. For å unngå målefeil ble testene gjentatt. En oversikt over forsøkene finnes i vedlegg [V.6].



## 5 RESULTATER

### 5.1 INNFESTINGSKAPASITET

Testing av innfestingskapasitet ble utført på to stålplater. Den ene var glatt, mens den andre hadde noe overflaterust og ujevnheter, og dermed høyere ruhet. Innfestingskapasiteten ble testet vertikalt og horisontalt, både tørt og i vann. Resultatet fra testene vises i Figur 5.1, og er basert på gjennomsnittsverdier fra flere målinger.

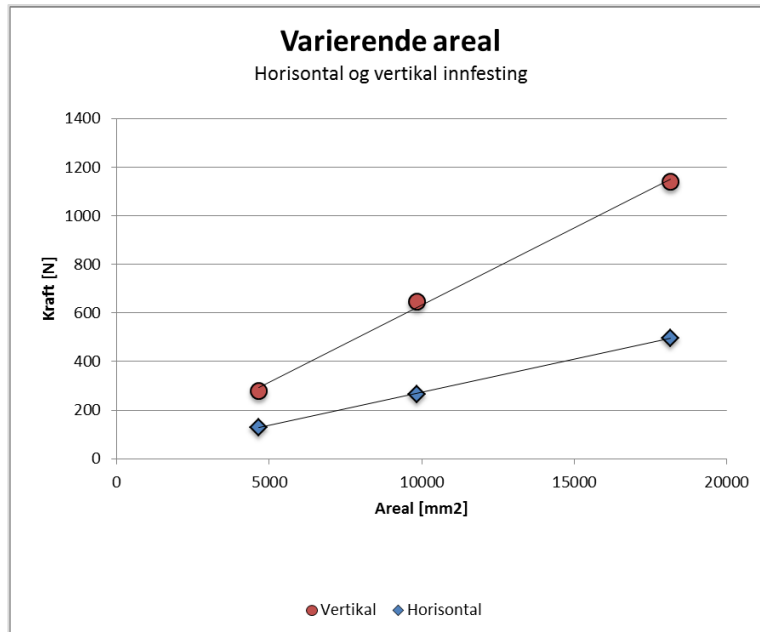


Figur 5.1: Innfestingskapasitet ved varierende omgivelser

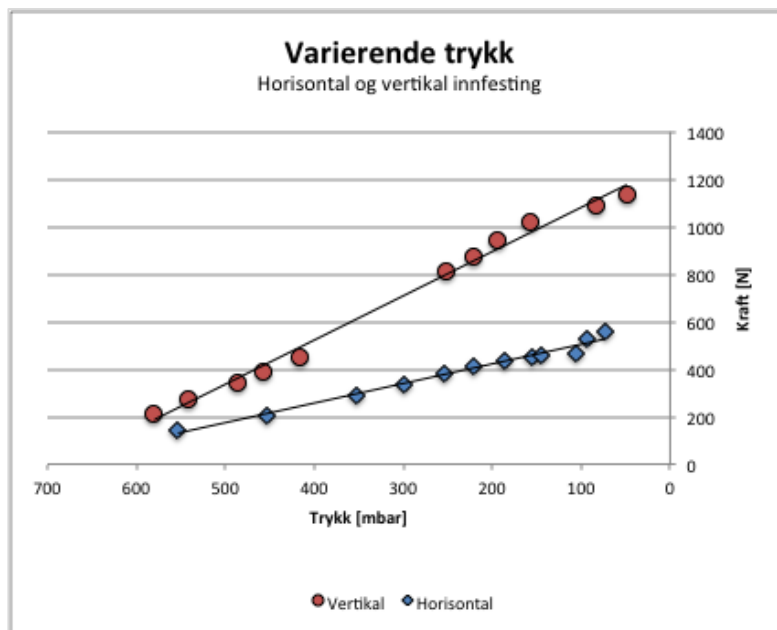
Resultatene viser at den vertikale innfestingskapasiteten blir noe redusert under testing på ru flate, men reduksjonen var mindre enn forventet. Samtidig ser man at vannet ikke øker innfestningen som antatt.

Den horisontale innfestingskapasiteten øker noe som følge av økt friksjon på den ru flaten. I den våte testen ble innfestingen redusert som antatt. Dette kan komme av vannfilmen som oppstår mellom friksjonsflatene. Også denne reduksjonen var mindre enn forventet.

For å teste skalering av sugekoppareal ble de tre sugekoppene festet med likt trykk til samme underlag. På Figur 5.2 ser man tydelig den lineære sammenhengen mellom areal og innfesting. Det samme ser man for varierende trykk (Figur 5.3).



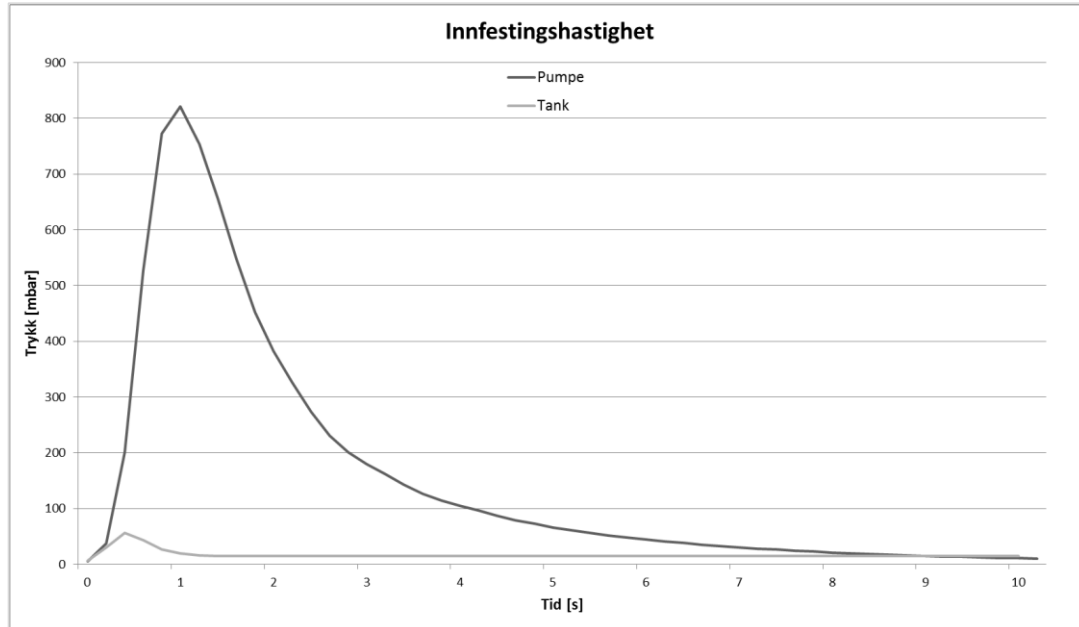
Figur 5.2: Varierende areal



Figur 5.3: Varierende trykk

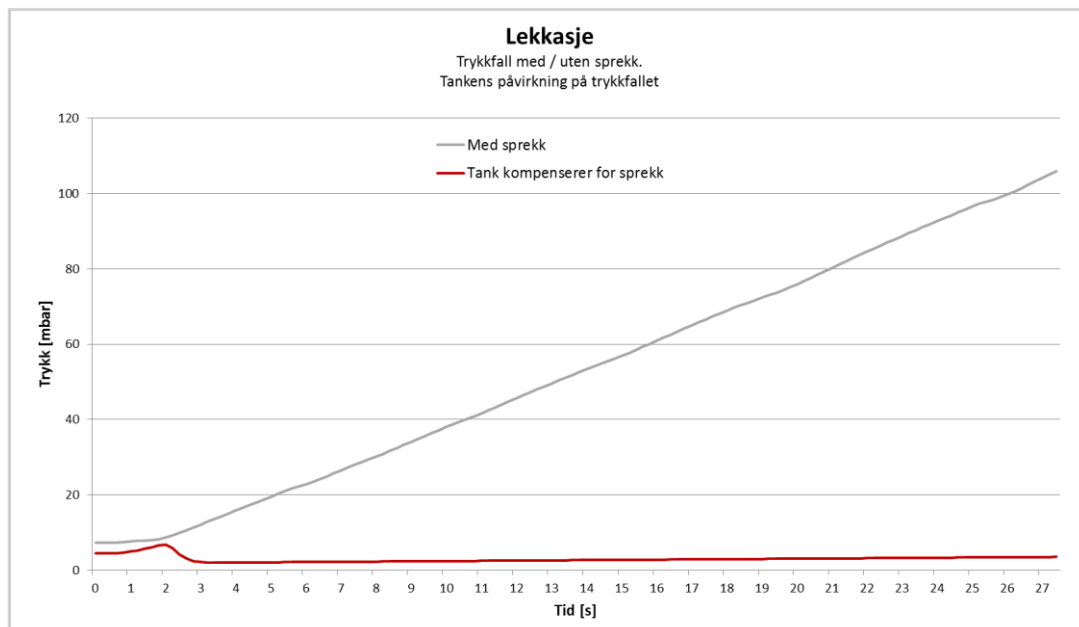
## 5.2 TRYKKAKKUMULATOR

Innfestingshastighet til sugekoppen på den glatte flaten ble logget, både med direktekobling mellom pumpe og sugekopp, og mellom trykktank og sugekopp (Figur 5.4). For å gi tanken og pumpen like forutsetninger, var systemet påsatt vakuum frem til samme punkt i systemet, der vakuumsensoren var plassert.



Figur 5.4: Innfestingshastighet

Grafen viser en tydelig forskjell i innfestingshastighet. Med tank tok det 0,8 s og med pumpe tok det 8,6 s å nå samme trykket.

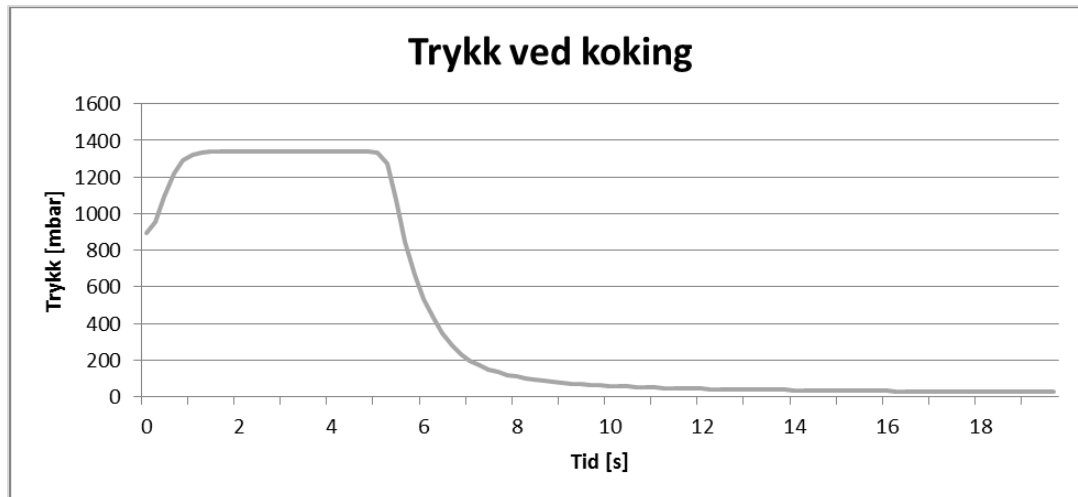


Figur 5.5: Lekkasje ved sugekopp

Trykkfallet i det lukkede systemet ble målt med lekkasje. Deretter ble tanken koblet på, og som man ser i Figur 5.5, bremset den trykktapet betraktelig. Massestrømmen fra lekkasjen er uendret, men det store volumet i tanken forårsaker saktere trykkendring.

### 5.3 VANN I VAKUUMSYSTEMET

For å forårsake koking i systemet, fylte vi 500 ml vann ved 70°C i kondensfangeren. Dette ble deretter påsatt undertrykk på 20 mbar. Det oppstod voldsom koking. Det målte trykket oversteg kapasiteten til vakuumsensoren, og fremstår dermed som en flat topp (Figur 5.6). Resultatet viser at koking forårsaker en trykkøkning i systemet. Trykkøkningen er midlertidig, og kan kompenseres av pumpe eller tank.



Figur 5.6: Trykk ved koking

### 5.4 FEILKILDER OG DISKUSJON

Vakuumsensoren ga gode målinger i tørr luft, men med vanndamp i systemet ble målingene ustabile, noe som kan skyldes kondens på filamentet i sensoren. Atmosfæretrykket ble målt til 1300 mbar. En kalibrering gjenopprettet dette til omlag 1000 mbar, men det sår likevel tvil om målingenes validitet. Testene av innfestingskapasitet anses likevel som sikre, da de ble utført ved pumpens laveste trykk, både i tørrtester og våttester. Måling av trykktap ved koking [5.3] kan være unøyaktig, men det var den generelle utviklingen i indre trykk som var det ønskede resultatet.

Ved måling av innfestingskapasitet i horisontalriggen, ble kraften påført ovenfor innfestingen til sugekoppene. De ble derfor utsatt for et moment i tillegg til skjærkraften, noe som kan ha påvirket friksjonen.

Resultatene for skalering ved variert trykk er ikke helt som forventet. Trendlinjene skulle gått mot null ved omlag 1000 mbar for å samsvare med formelen for innfesting og spesifikasjonene oppgitt på sugekoppene. Dette kan bety at vakuumsensoren har indikert feil trykk, eller at lastcellene har gitt unøyaktige målinger, men det virker som det er konsekvente feilmålinger, ettersom resultatene ble lineære.



---

## 6 KONKLUSJON

---

Arbeidet med testing av sugekopper og vakuumsystem har gitt resultater som kan hjelpe LBO med å komme et steg nærmere realisering av vakuuminnfesting offshore. Testene viser at vann ikke har en stor innvirkning på innfestingskapasiteten, men kan bidra til trykkfall dersom man får dette inn i systemet. Dette kan dog forhindres dersom man utvikler systemet videre, noe vi kommenterer i videre arbeid [7]. Sugekoppene kom med oppgitte data for innfestingskraft. Disse ble validert for vertikal innfesting. Under den horisontale testingen fikk vi et lite avvik til de oppgitte dataene, men dette skyldes i stor grad at kraften ble påført noen cm over innfestingen, slik at sugekoppene ble utsatt for et moment. Det anbefales derfor å bruke produsenters spesifikasjoner som bakgrunn for dimensjonering.

Innfestingskapasiteten ble bekreftet lineært, men vi fikk ikke påvist at den følger sammenhengen  $F=\Delta pA$ . Dette kan heller ikke avkreftes, da mulige målefeil kan ha påvirket resultatene.

Vi konkluderer med vakuumsystem som trykkakkumulator vil være en nyttig komponent, både for å oppnå hurtig innfesting, og for å redusere et eventuelt trykktap ved lekkasje.

Kokende vann i systemet vil forårsake en midlertidig trykkøkning. Dette er mindre problematisk da systemet fort gjenoppretter trykket. Dersom vannet er kaldt nok kan man også unngå dette.

I tillegg til å gi svar på noen av spørsmålene LBO hadde, har vi gjennom oppgaven tilrettelagt for videre arbeid med vakuuminnfesting offshore. Teststrategien og øvrig testutstyr kan benyttes til videreutvikling, og vi anbefaler LBO å gjennomføre ytterligere tester for å komme enda nærmere målet.



## 7 VIDERE ARBEID

Det gjenstår mye arbeid før vakuumsystemet kan tas i bruk under vann. Dette kapittelet skal gi noen forslag til mulige løsninger på problematikken som kan oppstå.

### 7.1 VAKUUMPUMPE

Vanlige vakuumpumper er laget for å arbeide i atmosfæriske omgivelser. Dersom en pumpe skal nedsenkes i sjøvann, er det flere faktorer som må utarbeides. Selve pumpehuset er forseglet for omgivelsene, men motoren som driver pumpen er vanligvis luftkjølt og åpen. Det produseres riktignok forseglede elektromotorer, som kan bli levert med pumpen.

Et annet alternativ vil være bygge pumpen inn i en tett beholder. Dette er vanlig praksis for elektronisk- og finmekanisk utstyr subsea. Beholderen fylles gjerne med olje slik at den inkompressible væsken opptar det eksterne trykket, samtidig som pumpen blir skjermet for korrosjon. Vakuumpumper har trykkkrav, både ved pumpens utløp og inntak. Det vil derfor være nødvendig å benytte egne pumper for å regulere dette trykket.

Det er også mulig å ha pumpen på dekket til en servicebåt eller lignende. En lengre slange vil føre til et høyere trykktap og dette må kompenseres ved å redusere volumet på tanken, eller ved å benytte en kraftigere pumpe.

### 7.2 VAKUUMTANK

For hver tiende meter man kommer under havoverflaten øker det hydrostatiske trykket med 1 bar. Det vil si at en tank må bygges sterkere enn den behøver å være på land. Den må kunne motstå et ytre overtrykk på minimum 2 bar for å kunne brukes under en FPSO.

Linjebygg har uttrykt et ønske om å integrere vakuumtanken i innfestingsverktøyets rammestruktur. Dimensjonering og analyser må utføres for å avklare hvorvidt dette er en brukbar metode.

### 7.3 SUGEKOPPER

Dersom en sugeskopp løsner under drift, og systemet er åpent inn til trykkakkumulator eller pumpe, vil det raskt strømme store mengder vann inn i systemet. Det bør benyttes ventiler i sugeskoppen, gjerne automatisk aktivert ved kontakt med underlaget, som stenges av ved en eventuell slipp.

### 7.4 VIDERE TESTING

Vi fikk ikke testet innfesting på en overflate med marin begroing, lignende det man finner under et båtskrog. Dette bør undersøkes, for å kunne fastslå hvilken grad av rengjøring som kreves for vakuuminntestning.



---

## REFERANSER

---

### R.1 LITTERATURREFERANSER

- R.1.1 Statoil ASA, tilgjengelig på  
<http://www.statoil.com/no/OurOperations/ExplorationProd/ncs/njord/Pages/default.aspx>, per 27.05.12
- R.1.2 Kristian Knutsen, E.J.S, *Konsept for turrettilkomst for flytende produksjonsinstallasjoner*, IPM NTNU 2010
- R.1.3 Bjarthe Holmgard & Jon Låstad, *Konsept for Innfesting av Fjernstyrte Undervannsverktøy på flytende produksjonsinstallasjoner*, IPM NTNU 2011, Digitalt vedlegg
- R.1.4 London South Bank University, *Water phase diagram*, tilgjengelig på  
<http://www.lsbu.ac.uk/water/phase.html>, per 19.05.12
- R.1.5 Piab ASA, *Vacuum automation*, tilgjengelig for nedlasting på  
<http://www.piab.com/en-gb/products>, per 27.05.12
- R.1.6 Edwards vacuum, *datablad E2M40*, tilgjengelig på  
[http://www.edwardsvacuum.com/Products/70077/overview/Product\\_Details.aspx](http://www.edwardsvacuum.com/Products/70077/overview/Product_Details.aspx), per 19.05.12
- R.1.7 Travaini, *væskeringspumpe brukermanual*, tilgjengelig på  
<http://www.travaini.nl/Manual/Vloeistofring/ManualeVuoto.pdf>  
Sisert 19.05.12
- R.1.8 Travaini, *datablad, TRMB 25-30*, tilgjengelig på  
<http://www.travaini.com/PDF/Datasheet/SingleStageVariPorted/TRMB%2025-30&32-50&75.pdf>, per 19.05.12
- R.1.9 Vac Lift AS, tilgjengelig på  
<http://www.vaclift.com/>, per 27.05.12
- R.1.10 <http://www.aratron.no/>
- R.1.11 <http://www.vakuum.no/>, per 08.06.12
- R.1.12 Wikipedia, *Vacuum Flange*, tilgjengelig på  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum\\_flange](http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum_flange), per 27.05.12

R.1.13 Edwards Vacuum, *user manual APG100-XM*, tilgjengelig på  
<http://usermanualfile.com/apg100-active-pirani-gauge.html>  
sisert 19.05.12

R.1.14 Wikipedia, *Load Cell*, tilgjengelig på  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Load\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Load_cell), tilgjengelig per 27.05.12

## R.2 PERSONREFERANSER

- R.2.1 Førsteamanuensis Bjørn Haugen ved Institutt for produktutvikling og materialer: Veileder for prosjekt og masteroppgave. Spisskompetanse innen numeriske metoder
- R.2.2 Senioringeniør Martin Hasle ved Linjebygg Offshore AS. Kontaktperson hos LBO.
- R.2.3 Thomas Fevåg ved Linjebygg Offshore AS, Lager- og logistikkansvarlig Dora/Subsea Testsenter. Kontaktperson ved bestillinger og lån av hydraulikkutstyr.
- R.2.4 Salgssjef Roar Haukenes ved Aratron AS. Kontaktperson ved bestilling av sugekopper.
- R.2.5 Daglig leder Rune Haug ved Vakuum-Service AS. Kontaktperson ved bestilling av vakuumentstyr.
- R.2.6 Avdelingsingeniør Halvard Støwer ved Institutt for produktutvikling og materialer. Fagområde innen elektronikk og måleteknikk. Veiledning ved testing og måleutstyr.
- R.2.7 Senioringeniør Nils-Inge Johan Nilsen ved SINTEF Materialer og kjemi. Veiledning ved oppsett av vakuumsystem.





## VEDLEGG

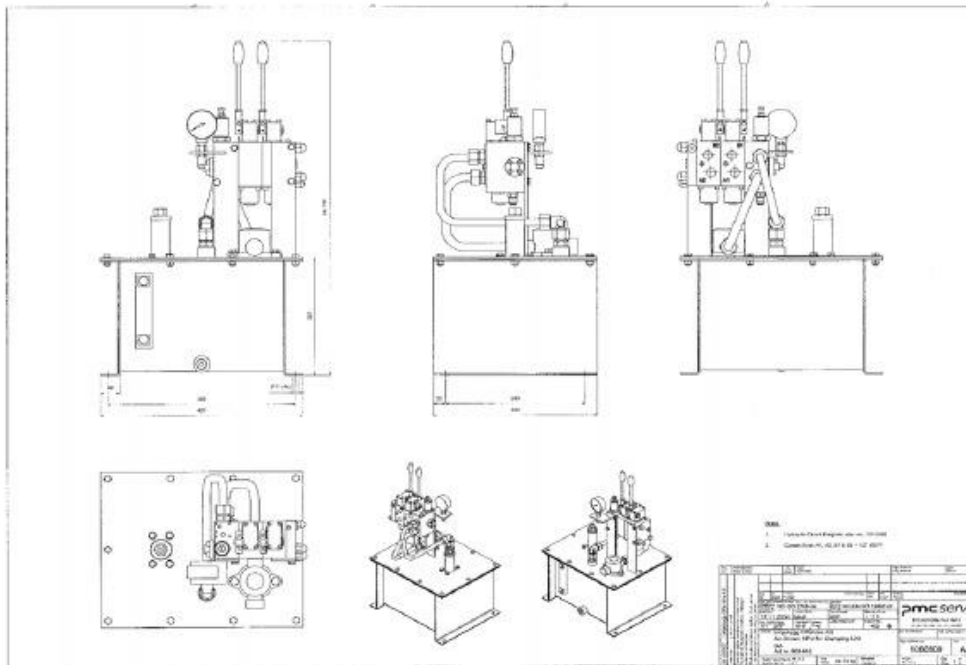
### V.1 MØTEREFERAT 19.01.12

<b>Møtereferat</b>	<b>E. C. Dahls 1, LBO</b>	<b>19.01.12</b> <b>13:00 - 14:00</b>
<b>Planleggingsmøte masteroppgave</b>		
Deltakere:		
Martin Hasle	Veileder, LBO	
Bjørn Haugen	Veileder, NTNU	
Bjarte Holmgard	Student	
Jon Låstad	Student	
<b>Punkt 1</b> Testing	<p>Studentene frambrakte sine ideer til testing av vakuumsystem. Dette inkluderte:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Test av vakuumpumpe i forskjellige medium (vann/luft)</li> <li>- Test av reell festekapasitet kontra kapasitet oppgitt av produsenter</li> <li>- Test av skalering (sammenheng trykk/holdkraft/festareal)</li> <li>- Test av problematikk rundt blanding vann/luft i systemet</li> </ul> <p>Veiledere frambrakte andre ønskede tema for testing/gransking:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Innfesting på forskjellige overflater med varierende ruhet (stål, betong, begrodd stål)</li> <li>- Problematikk rundt momentbelastning</li> <li>- Muligheter med redundans i.f.t lekkasje/utkobling</li> <li>- Integrasjon av trykktank for å spare vekt/plass</li> </ul>	
<b>Punkt 2</b> Ønsket sluttresultat	<p>Testing av vakuumsystem blir vurdert som første prioritet. LBO ønsker en "vakuumpakke/innfestingsmodul", struktur er mindre viktig.</p>	
<b>Punkt 3</b> Neste steg	<p>Det blir vedtatt at neste steg for oppgaven blir å frembringe</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Oppgavetekst</li> <li>- Fremdriftsplan (testplan)</li> <li>- Forslag til innkjøp av utstyr m/prisoverslag</li> </ul>	
		Skrevet av: Jon F. Låstad

**V.2 MØTEREFERAT 21.03.12**

<b>Møtereferat</b>	<b>E. C. Dahls 1, LBO</b>	<b>21.03.12</b> <b>12:00 - 13:00</b>
<b>Møte masteroppgave</b>		
Deltakere: Martin Hasle            Veileder, LBO Bjarte Holmgard        Student Jon Låstad                Student		
<b>Punkt 1</b> Progresjon masteroppgave	Vi ligger litt etter skjema grunnet mye venting på anbud fra de forskjellige leverandørene. Produksjon av testtrigg, kan begynne når vi får sylindere og hydraulikpakke. Leveringstid av resterende utstyr varierer, men vil ta ca 3 uker på det meste. Testresultater og detaljer rundt innfesting av sugekopper er det viktigste med oppgaven.	
<b>Punkt 2</b> Bestilling av utstyr	Anbud skrives i Excel og sendes Martin. Han videresender til Thomas ved verkstedet som bestiller. Vi vurderer å droppe kondensavskiller, men ble enige om å bestille dette for å kunne kontrollere mengden vann vi ellers ville fått inn i tanken.	
<b>Punkt 3</b> Befaring / henting av utstyr på Dora	To sylindere samt hydraulikpakke ble hentet på LBOs testsenter på Dora. Slinger og lignende etterbestilles av Thomas.	
		Skrevet av: Bjarte Holmgard

## V.3 HPU SPESIFIKASJONER



### Specifications

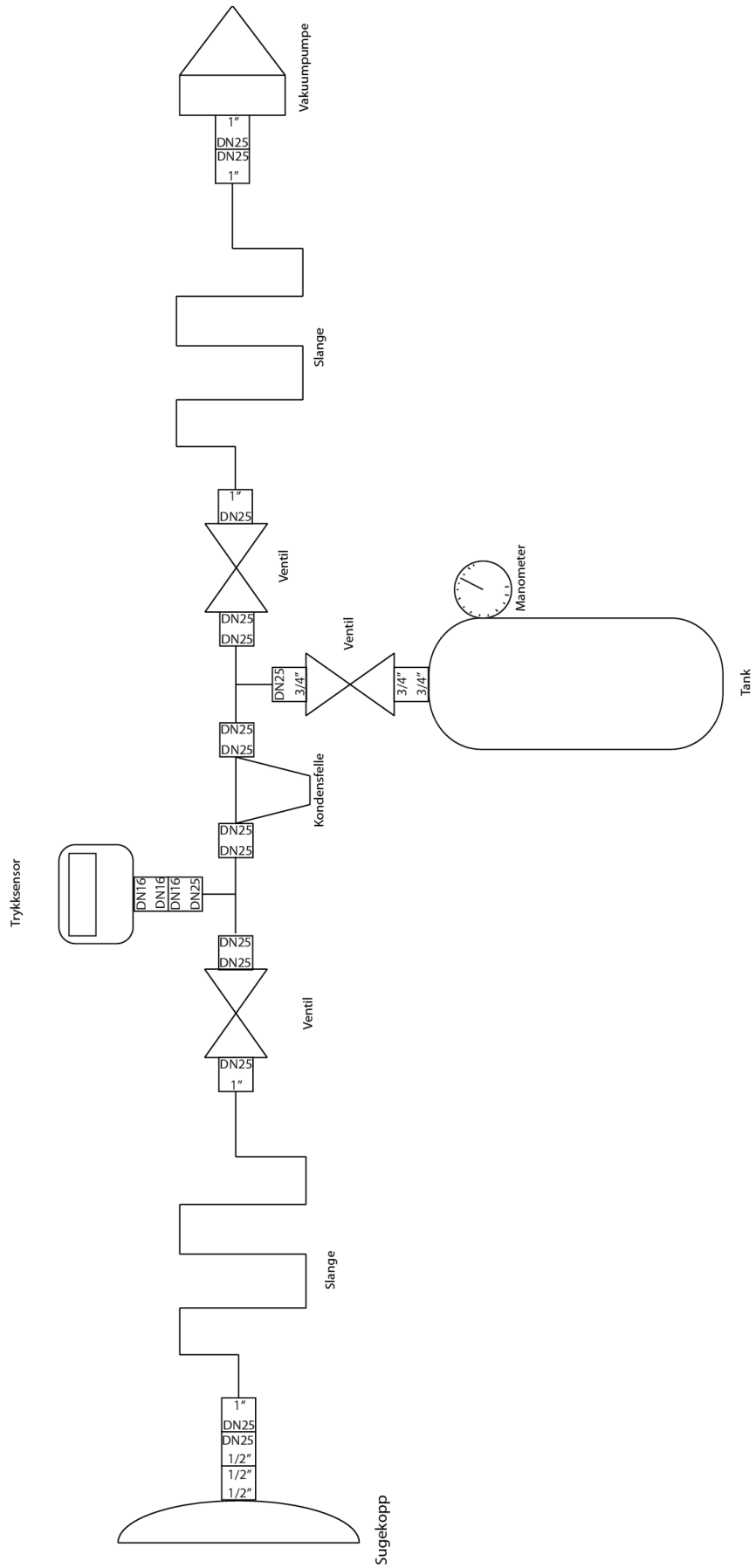
PMC Servi As Doc. No. 1134442 rev. A1

<b>Model:</b>	<b>Air Hydraulic Power pack. No. S6152607-13-1 HPU for Clamping Unit</b>
<b>Type:</b>	Air Driven
<b>Length:</b>	420 cm
<b>Width:</b>	340 cm
<b>Height:</b>	750 cm
<b>Weight:</b>	50 kg (Without oil in the reservoir)
<b>Oil Reservoir:</b>	20 litres
<b>Hydr. Fluid</b>	Shell Tellus 22
<b>Working Pressure</b>	100 bar.
<b>Pressure pump:</b>	Hawe Piston Pump LP125-25
<b>Air Driven</b>	Flow rate ca. 3,5 litres/min. P= 100 bar. (By air pressure 6 bar)
<b>Air Supply for Air Pump .:</b>	1600 litres/min.. Pressure 1,5 – 10 bar.
<b>Connection Hydraulic</b>	A1-A2-B1-B2 ½" BSPP
<b>Conn. Air Supply</b>	½" BSPP

## V.4 UTREGNING AV NØDVENDIG VOLUM PÅ TRYKKTANK

Utredning av nødvendig tankvolum		
$p'V' = p_1V_1 + p_2V_2$	Det er gitt at Og at (1 bar atm., 33mbar fra pumpe)	$V' = V_1 + V_2$ $p_2 = 0,033p_1$
$\frac{p'}{p_1} = \alpha = \frac{1}{V'}(V_1 + 0,033V_2)$	Vi setter $\alpha$ til virkningsgraden av trykkutligningen (gir prosent vakuum)	$\frac{p'}{p_1} = \alpha$
$\alpha(V_1 + V_2) = V_1 + 0,033V_2$		
$V_2 = V_1 \left( \frac{1 - \alpha}{\alpha - 0,033} \right)$	Formelen gir oss nødvendig størrelse på tanken ( $V_2$ )	Volumet på sugekopp ( $r=0,075\text{m}$ , $h=0,02\text{m}$ ) og slange til tanken ( $r=0,01\text{m}$ og $L=2\text{m}$ ) er ca 1 liter
For $\alpha=0,1$ : $V_2=13$ For $\alpha=0,05$ : $V_2=55$ For $\alpha=0,043$ : $V_2=95,7$		

## V.5 KOBLINGSSKJEMA



## V.6 UTFØRTE TESTER

Innfestingskapasitet, tørr/våt og overflateruhet			Utført 03.06.12
1.1	Plate 1	Tørr vertikaltest	
1.2		Tørr horisontaltest	
1.3	Plate 2	Tørr vertikaltest	
1.4		Tørr horisontaltest	
1.5	Plate 1	Våt vertikaltest	
1.6		Våt horisontaltest	
1.7	Plate 2	Våt vertikaltest	
1.8		Våt horisontaltest	

Fordeler med tank			Utført 27.05.12
2.1	Uten tank	Innfestingshastighet, glatt flate	
2.2	Med tank	Innfestingshastighet, glatt flate	
2.3	Uten tank	Overkomme lekkasje	
2.4	Med tank	Overkomme lekkasje	

Vann i vakuum			Utført 27.05.12
3.1	Uten vann	Måling av trykktap i lukket system	
3.2	Med vann	Måling av trykktap i lukket system, rask trykkutligning	
3.3	Med vann	Observasjon av vann i kondensfanger, gradvis vakuum	

Relasjon trykk/innfesting			Utført 02.06.12
4.1- 4.11	Variierende trykk	Vertikaltest	
4.12- 4.22	Variierende trykk	Horisontaltest	

Relasjon areal/innfesting			Utført 02.06.12
5.1	Sugekopp S	Vertikaltest	
5.2	Sugekopp S	Horisontaltest	
5.3	Sugekopp M	Vertikaltest	
5.4	Sugekopp M	Horisontaltest	
5.5	Sugekopp L	Vertikaltest	
5.6	Sugekopp L	Horisontaltest	