

# Evaluering av modulert kavitasjon i vannkraftturbiner

**Kristin Tessem Kolsaker**

Master i energi og miljø

Innlevert: juni 2013

Hovedveileder: Torbjørn Kristian Nielsen, EPT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for energi- og prosessteknikk



EPT-M-2013-70

## MASTEROPPGAVE

for

Stud.techn. Kristin Tessem Kolsaker

Våren 2013

### Evaluering av modulert kavitasjon i vannkraftturbiner

*Evaluation of modulated cavitation in hydroturbines*

#### Bakgrunn og målsetting

I kandidatens prosjektoppgave ble det simulert trykksvingninger i vannkraftverk og evaluert betingelsene for at det oppstår kavitasjon i et transient forløp. Kraftverket ble modellert i programmet FlowMaster.

Modulert kavitasjon er et tema av stor forskningsmessig interesse og mangler eksperimentell analyse. På Vannkraftlaboratoriet har det lenge vært planer om å bygge opp en kavitasjonstunnel hvor bla. dette fenomenet kan undersøkes nærmere i detalj.

#### Oppgaven bearbeides ut fra følgende punkter

- 1 Beskrive spesifikasjoner for en kavitasjonsmodell med utgangspunkt tilsvarende kavitasjonstunneler ved andre universitet
- 2 Komplette opptegning av kavitasjonstunnelen tilpasset Vannkraftlaboratoriet
- 3 Beskrive nødvendig instrumentering
- 4 Utarbeide prisoverslag

” \_ ”

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

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

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

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

Risikovurdering av kandidatens arbeid skal gjennomføres i henhold til instituttets prosedyrer. Risikovurderingen skal dokumenteres og inngå som del av besvarelsen. Hendelser relatert til kandidatens arbeid med uheldig innvirkning på helse, miljø eller sikkerhet, skal dokumenteres og inngå som en del av besvarelsen. Hvis dokumentasjonen på risikovurderingen utgjør veldig mange sider, leveres den fulle versjonen elektronisk til veileder og et utdrag inkluderes i besvarelsen.

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

Besvarelsen leveres digitalt i DAIM. Et faglig sammendrag med oppgavens tittel, kandidatens navn, veileders navn, årstall, institutt navn, og NTNUs logo og navn, leveres til instituttet som en separat pdf-fil. Etter avtale leveres besvarelse og evt. annet materiale til veileder i digitalt format.

- Arbeid i laboratorium (vannkraftlaboratoriet, strømningsteknisk, varmeteknisk)
- Feltarbeid

NTNU, Institutt for energi- og prosesseteknikk, 14. januar 2013

---

Olav Bolland  
Instituttleder

---

Torbjørn K. Nielsen  
Faglig ansvarlig/veileder

Medveileder: Morten Kjeldsen, FDB

# Forord

Denne masteroppgaven er skrevet på Vannkraftlaboratoriet på NTNU våren 2013. I oppgaven blir det prosjektert en kavitasjonsrigg i Vannkraftlaboratoriet. Oppgaven har vært meget lærerik og interessant med en bratt læringskurve.

Jeg vil gjerne takk min hovedveileder Torbjørn K. Nielsen og medveileder Morten Kjeldsen. Uten veiledning hadde jeg ikke kommet noen vei. Jeg vil også takke teknikerne som jobber på Vannkraftlaben, og spesielt Bård Brandåstrø for hjelp av valg med teknisk utstyr til kavitasjonsriggen.

Til slutt vil jeg også takke Ph.Dene for hjelp og oppmuntringer, og ikke minst de andre studentene som satt på laben sammen med meg dette året. Samholdet og trivselen på kontoret har gjort hverdagen litt lettere.

Trondheim 10. juni 2013

*Kristin Tøsse Kolsaker*

Signatur



# Sammendrag

Det har lenge vært ønskelig å bygge en kavitasjonsrigg ved Vannkraftlaben for å forske på modulert kavitasjon på vingeprofil. Formålet med oppgaven er å prosjektere en slik rigg, samt beskrive nødvendig instrumentering og utarbeide et prisoverslag.

Det ble først hentet inn bakgrunnstoff fra andre kavitasjonsrigger rundt om i verden for å ha et grunnlag for hvordan riggen på Vannkraftlaben skulle utformes. Etter at dimensjonerende størrelser som volumstrøm og størrelse på testseksjon ble fastslått, er utregning av størrelser som høyde og lengde på hele riggen bestemt. Komplette optegning i 3D av en ideell kavitasjonsrigg ble deretter laget.

Etter at to alternativer for plassering av riggen i laben ble undersøkt, ble det bestemt at alternativ nummer to var det beste. Ved alternativ to skal pumpen og motoren til kavitasjonsriggen stå foran trykktanken til Francis-riggen. Denne plasseringen var mest hensiktsmessig med tanke på plass i laben, og vil gi mist konflikter i fremtiden med tanke på en eventuell utbygging. Plasseringen var også litt mer hensiktsmessig med tanke på rørlegging opp til galleriet, da man unngår konflikt med traverskrana som strekker seg over store deler av laben, med unntak av et par meter nede ved kortveggen mot sør.

En ny 3D-modell av riggen tilpasset Vannkraftlaben ble så tegnet i Inventor. Modellen avviker fra ideell geometri grunnet punktene nevnt ovenfor.

En vurdering av nødvendig instrumentering er blitt presentert og diskutert. Det er blitt konkludert med at en PC, flowmeter, trykksensorer, oksygenmåler, høyhastighetskamera og PIV er nødvendig i kavitasjonsriggen.

Til slutt ble det utarbeidet et prisoverslag for kavitasjonsriggen. Total pris er estimert i underkant av NOK 2 500 000. I denne prisen inngår ikke et høyhastighetskamera da dette allerede er tilgjengelig på Vannkraftlaben.





# Summary

For some time now there has been plans to build a cavitation tunnel at NTNU. The main objective for the cavitation tunnel is research on modulated cavitation from different airfoils. This master thesis presents such a tunnel with the instrumentation needed. The total cost is also presented.

First some background information from other cavitation tunnels were used as a foundation for the setup of this tunnel. After main dimensions like flow and size of the test section were fixed, calculations of the height and length of the tunnel were done. A full 3D drawing of the cavitation tunnel is provided.

Two alternatives for placements were discussed. The conclusion states that the second alternative is more suitable. The pump was to be placed by the pressure tank of the Francis rig. This option was the most suitable one with regards to space available in the lab. Here one avoids the overhead travelling crane.

A new 3D drawing was then presented with the cavitation tunnel being modified to fit in the lab. The modifications are due to reasons mentioned above.

A consideration of the needed instrumentation is presented and discussed. It concludes that a PC, flowmeter, pressure sensors, oxygen meter, high speed camera and a PIV is necessary instrumentation.

In the end the price of the cavitation tunnel was estimated. The total cost is NOK 2 500 000. This price does not include a high speed camera due to the fact that there already is one at the Waterpower Laboratory.



# Innhold

<b>1</b>	<b>Introduksjon</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Teori</b>	<b>3</b>
2.1	Kavitasjon . . . . .	3
2.2	Kavitasjonsnummer . . . . .	4
2.3	Strouhalnummer . . . . .	4
2.4	NPSH . . . . .	4
2.5	Modulert kavitasjon . . . . .	5
2.6	U-rørssvingninger . . . . .	6
2.7	Trykklinjer . . . . .	8
2.8	Tap i rør . . . . .	10
2.8.1	Tap i bend . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Andre kavitasjonslaber</b>	<b>13</b>
3.1	SAFL/ UNH High Speed Water Tunnel . . . . .	13
3.2	Australian Maritime College (AMC) AMC Cavitation Research Laboratory . . . . .	15
3.3	Kavitasjonstunnelen ved NTNU (Tyholt) . . . . .	18
3.4	Universitetet i Lausanne (EPFL) sin kavitasjonstunnel . . . . .	19
3.4.1	Kommentarer/lærdom av de forskjellige labene som ble nevnt	20
<b>4</b>	<b>Kavitasjonstunnel ved Vannkraftlaben (NTNU)</b>	<b>23</b>
4.1	Spesifikasjoner for kavitasjonsmodell med utgangspunkt i tilsvarende kavitasjonstunneller ved andre universiteter/ steder . . . . .	23
4.1.1	Overordnede størrelser . . . . .	23
4.2	Frittstående rigg eller kobling til eksisterende anlegg . . . . .	24
4.3	Fremgangsmåte ved design av kavitasjonsrigg . . . . .	25
4.4	Elementer i riggen . . . . .	26
4.4.1	Rør . . . . .	26
4.4.2	Bend . . . . .	26
4.4.3	Bend med kaskader . . . . .	26
4.4.4	Dyse . . . . .	27
4.4.5	Diffusor . . . . .	28
4.4.6	Pumpe . . . . .	28

4.4.7	Kuppel . . . . .	28
4.4.8	Testseksjon . . . . .	29
4.4.9	Svingetanker . . . . .	30
4.4.10	Akkumulator . . . . .	30
4.5	Flyt i riggen . . . . .	31
4.6	Tilpassing av rigg ved plassering i Vannkraftlaben . . . . .	32
<b>5</b>	<b>3D-Tegninger</b>	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>Instrumentering</b>	<b>39</b>
6.1	Nødvendig instrumentering . . . . .	39
6.1.1	Testobjekt og oppsett i testseksjonen . . . . .	39
6.1.2	Mekanisk vippe . . . . .	39
6.1.3	Hull til måleutstyr . . . . .	40
6.1.4	Flowmeter . . . . .	40
6.1.5	Ventiler . . . . .	40
6.1.6	Trykksensorer . . . . .	40
6.1.7	Måling av oksygeninnhold . . . . .	40
6.1.8	PIV . . . . .	40
6.1.9	Høyhastighetskamera . . . . .	41
<b>7</b>	<b>Dynamikk i vannveien</b>	<b>43</b>
<b>8</b>	<b>Prisoverslag</b>	<b>47</b>
8.1	Rør, bend og løsflenser . . . . .	47
8.2	Akkumulator . . . . .	48
8.3	Svingetanker . . . . .	48
8.4	Testseksjon . . . . .	48
8.5	Instrumentering . . . . .	48
8.6	Pumpe, motor og frekvensomformer . . . . .	49
8.7	Stativ til riggen . . . . .	49
8.8	Ventiler . . . . .	49
8.9	Annet . . . . .	49
8.10	Totalt . . . . .	49
<b>9</b>	<b>Resultater</b>	<b>51</b>
9.1	Frittstående rigg eller kobling til eksisterende anlegg . . . . .	51
9.2	Plassering av kavitasjonsriggen i laben . . . . .	51
9.3	3D-tegninger av kavitasjonsriggen . . . . .	51
9.4	Spesifikasjoner for kavitasjonsriggen . . . . .	54
9.5	Instrumentering . . . . .	54
9.6	Prisoverslag . . . . .	55
<b>10</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>57</b>
10.1	Tilpassing av rigg ved plassering i Vannkraftlaben . . . . .	57
10.2	Instrumentering . . . . .	57

10.3 Frittstående rigg eller kobling til eksisterende anlegg . . . . .	58
10.4 Diskusjon av resultatene . . . . .	59
<b>11 Konklusjon</b>	<b>61</b>
11.1 Konklusjon . . . . .	61
<b>12 Videre arbeid</b>	<b>63</b>
<b>A Datablader</b>	<b>I</b>
<b>B Maskintegninger</b>	<b>XI</b>
<b>C Pris på komponenter</b>	<b>XXIII</b>



# Figurer

2.5.1	Modulert kavitasjon . . . . .	5
2.6.2	Skisse av u-rør . . . . .	6
2.7.3	Trykklinjje . . . . .	9
3.1.1	Skjematisk tegning av tunnel ved SAFL . . . . .	14
3.2.2	Skjematisk tegning av tunnel ved AMC . . . . .	16
3.2.3	3D tegning av tunnel ved AMC . . . . .	17
3.3.4	Testseksjonen ved kavitasjonstunnelen på Tyholt . . . . .	18
3.4.5	3D tegning av tunnel ved EPFL . . . . .	19
3.4.6	Alternative snitt ved ny testseksjon . . . . .	20
3.4.7	Normalisert kontraksjonsprofil . . . . .	21
4.2.1	Illustrasjon av Vannkraftlaben på NTNU . . . . .	24
4.4.2	3D-tegning av kaskadebend . . . . .	27
4.4.3	Maks vinkeløkning i diffusor . . . . .	28
4.4.4	Testseksjon . . . . .	29
4.5.5	Flyt i riggen . . . . .	31
4.6.6	Plassering av ny rigg i vannkraftlaben . . . . .	32
4.6.7	Plassering av ny rigg i vannkraftlaben . . . . .	33
5.0.1	Full tegning av riggen i 3D . . . . .	36
5.0.2	Full tegning av riggen i 3D . . . . .	37
5.0.3	U-rørsoppsett . . . . .	38
5.0.4	U-rørsoppsett . . . . .	38
7.0.1	Dynamikk i vannveien . . . . .	43
7.0.2	Blokkdiagram av dynamikken i u-røret . . . . .	45
9.3.1	3D-tegning av kavitasjonsrigg plassert i Vannkraftlaben . . . . .	52
9.3.2	3D-tegning av kavitasjonsrigg plassert i Vannkraftlaben . . . . .	53
11.1.1	3D-tegning av kavitasjonsrigg plassert i Vannkraftlaben . . . . .	62
12.0.1	Testseksjon . . . . .	64





# Tabeller

4.3.1 Tap i komponentene i riggen . . . . .	25
8.1.1 Prislister rør, bend og løslenser . . . . .	47
9.6.1 Komponentvis prisoverslag . . . . .	55

## Symboler

$A_{Tank}$	- Areal tank [ $m^2$ ]
$A_{TS}$	- Areal testseksjon [ $m^2$ ]
$d$	- Diameter [m]
$f$	- Frekvens til virvelavløsning [1/s]
$g$	- Tyngden akselerasjon [ $m/s^2$ ]
$h_b$	- Barometertrykk [ bar ]
$h_f$	- Trykktap grunnet friksjon [ mVs ]
$h_m$	- Trykktap grunnet singulærtap [ mVs ]
$h_{to}$	- Trykktap grunnet testobjekt [ mVs ]
$h_{va}$	- Damptrykk [ bar ]
$\Delta h_{tot}$	- Totalt trykktap [ mVs ]
$H_S$	- Nødvendig dykking [ m ]
$K$	- Tapskoeffisient [ - ]
$K_{fr}$	- Friksjonstap [ mVs ]
$K_{loc}$	- Lokale tap [ mVs ]
$L$	- Karakteristisk lengde [ m ]
$NPSH_A$	- Net Positive Suction Head (Available) [ - ]
$NPSH_R$	- Net Positive Suction Head (Required) [ - ]
$p_{ref}$	- Referansetrykk [ bar ]
$p_v$	- Damptrykk [ bar ]
$St$	- Strouhalnummer [ - ]
$V$	- Vannhastighet [ m/s ]
$\rho$	- Tettheten til vann [ $kg/m^3$ ]
$\sigma_v$	- Kavitasjonsnummer [ - ]

## Konstanter for utregning av form på dyse

$a_C b_C$	- koeffisienter av polynomet som beskriver formen til dysen []
$L_C$	- lengden på dysen [m]
$x_C$	- avstand nedstrøms innløpet på dysen [m]
$X_L$	- normalisert lengde nedstrøms airfoil[]
$y_C$	- radiell avstand fra senterlinje ut til $x_C$ [m]
$y_{CI}$	- radiell avstand fra senterlinje til ytterkant ved innløpet [m]
$y_{CO}$	- radiell avstand fra senterlinje til ytterkant ved utløpet [m]

## **Forkortelser**

<i>UNH</i>	- University of New Hampshire
<i>SAFL</i>	- Saint Anthony Falls Laboratory
<i>NTNU</i>	- Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet
<i>CAD</i>	- Computer Aided Design
<i>LDV</i>	- Laser Doppler Velocimeter
<i>PIV</i>	- Particle Image Velocimeter
<i>PTV</i>	- Particle Tracking Velocimeter
<i>TS</i>	- Testobjekt



# Kapittel 1

## Introduksjon

Det har i lengre tid vært planlagt å bygge en kavitasjonsrigg ved Vannkraftlaboratoriet på NTNU. Formålet med oppgaven er å prosjektere en slik rigg ment til forskningsformål.

En kavitasjonsrigg brukes for å teste dykkede strukturer innen for eksempel skipsfart, marin og andre hydrauliske maskiner. Det er i denne oppgaven prosjektert en rigg som skal kunne teste for modulert kavitasjon på forskjellige vingeprofilene som skal kunne tas inn og ut av en testseksjon. Riggeren skal stå på Vannkraftlaboratoriet ved NTNU hvis hensikt er å forske på modulert kavitasjon, kavitasjon som oppstår grunnet dynamikk i systemet. Denne lærdommen kan overføres til turbiner i vannkraftverk og vil få en betydelig verdi da dagens vide kjøremønstre ikke er optimal med tanke på teknisk utstyr. Det blir derfor viktig å teste for kavitasjon i et vidt spekter.

Det spesielle med denne riggeren i forhold til andre kavitasjonsrigger er muligheten for u-rørssvinginger gjennom testseksjonen. Med toppmoderne utstyr som PIV og høyhastighetskamera vil modulert kavitasjon undersøkes nærmere. Forskning på kavitasjonsforløpet skal studeres. Hvor lenge etter hver puls lever kavitasjonen og hvor intens er den, er temaer en vil kunne undersøke nærmere.

Kavitasjon var tradisjonelt interessant for hydrauliske og hydrodynamiske systemer, men en ser nå at bruksområdet er stort og variert. I moderne forskning brukes kunnskapen om kavitasjon også innen fagfelt som biokjemi og medisin.



# Kapittel 2

## Teori

### 2.1 Kavitasjon

Kavitasjon er et fenomen som forekommer i hurtige væskestrømmer. Synker det statiske trykket i en væske under damptrykket, dannes dampbobler. Når dampboblene så kommer tilbake til et område med høyere trykk vil de implodere, slik at svært lokale, heftige trykkøkninger skapes. Sammenklappingen kan høres som en sterk rasling i vannrør. Kavitasjon kan forårsake hurtig opptæring av metaller dersom den skjer mot overflaten av metallet. Dette er problematisk for blant annet vannturbiner og hurtiggående propeller. Oksygenet, som først var løst i vann og senere frigjort med dampen, blir under implosjonen presset inn i metallet. Dette fører til korrosjon og er svært alvorlig. I ekstreme tilfeller vil biter av metall bli slitt av.

Det vil undersøkes hvordan en periodisk trykkpuls som dannes pga. u-rørssvingninger kan skape kavitasjon i pulsasjoner og se hvordan disse forløper seg. Vil det kavitere i samme takt som pulsene, eller vil det "henge igjen" lenge etterpå for hver puls.

## 2.2 Kavitasjonsnummer

Graden av kavitasjon kan karakteriseres ved en dimensjonsløs størrelse, kavitasjonstallet her gitt ved sigma som definert i "Fluid Dynamics of Cavitation and Cavitating Turbopumps". [1]

$$\sigma_v = \frac{p_{ref} - p_v}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (2.2.1)$$

$p_{ref}$  er referansetrykket i et gitt punkt i strømmingen, mens  $V$  er farten til fluidet. Begge parametre velges typisk oppstrøms testobjektet der strømningsforholdene er uniforme.

Det ses av likningen at kavitasjon unngås ved store kavitasjonstall. Vanligvis vil store kavitasjonstall samsvare med store verdier på referansetrykket. Det antas derfor at  $p_{ref}$  hele tiden vil ligge over fordampingstrykket,  $p_v$  og at det derfor ikke vil være noen fare for kavitasjon. Kavitasjonstallet er kun relevant når kavitasjon er tilstede. Det kan ses på som en skaleringsparameter som måler graden av kavitasjon globalt.

## 2.3 Strouhalnummer

Strouhalnummeret er et dimensjonsløst tall som beskriver oscillerende mekanismer og er definert som

$$St = \frac{fL}{V}$$

der  $f$  er frekvensen av virvelavløsningen,  $L$  er karakteristisk lengde (her: hydraulisk diameter) og  $V$  er hastigheten til fluidet.

## 2.4 NPSH

Ved hjelp av Bernoullis likning finnes grensen for når kavitasjon vil oppstå. Denne grensen kalles NPSH (Net Positive Suction Head) og gir det minste trykket før kavitasjon oppstår. Faren oppstår idet trykket synker under damptrykket for den gitte vanntemperatur. Utledningen finnes i sin helhet i Brekkes "Pumper & Turbiner" [4]. Likningen er basert på absolutte trykk.

$$NPSH_A = -H_s + h_b - h_{va} > NPSH_R \quad (2.4.2)$$

$$NPSH_A > NPSH_R \quad (2.4.3)$$



der:

$NPSH_A$  - Tilgjengelig trykkehøyde [m]

$NPSH_R$  - Nødvendig trykkehøyde [m]

$H_s$  - Nødvendig dykking [m]

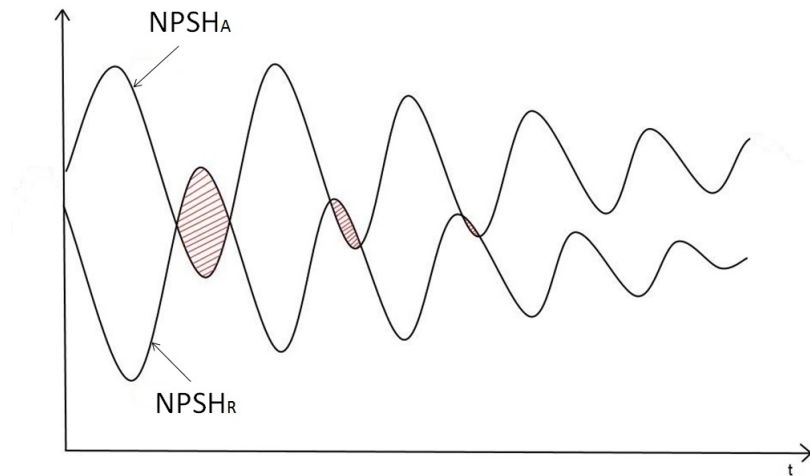
$h_b$  - barometertrykk [bar]

$h_{va}$  - damptrykk [bar]

Den tilgjengelige NPSH, ( $NPSH_A$ ) må hele tiden ligge over den nødvendige trykkehøyden, ( $NPSH_R$ ) for at kavitasjon skal unngås.

## 2.5 Modulert kavitasjon

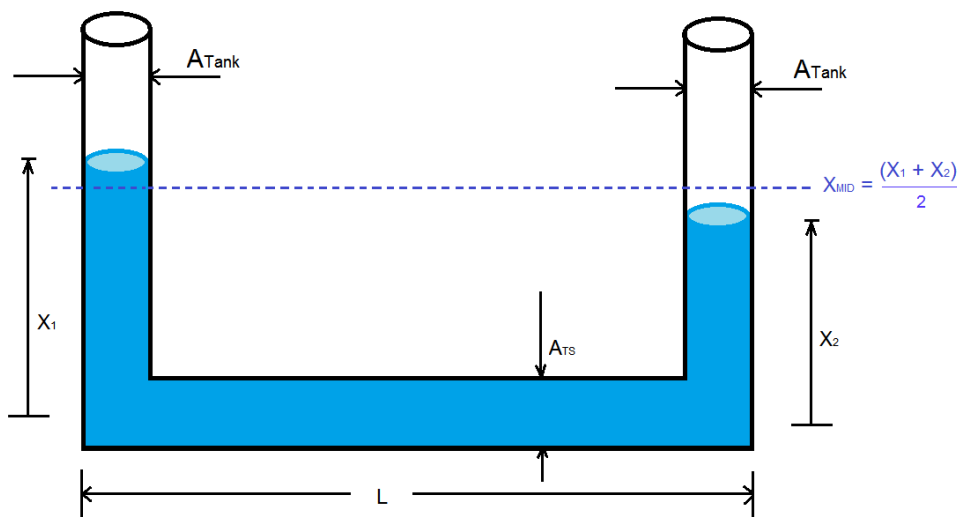
Modulert kavitasjon er kavitasjon som varierer i intensitet grunnet trykksvingninger som har oppstått andre steder i systemet. Kavitasjon oppstår idet  $NPSH_A$  synker under  $NPSH_R$ . Dette er illustrert i grafen under.



Figur 2.5.1: Illustrasjon modulert kavitasjon som oppstår idet  $NPSH_A$  synker under  $NPSH_R$ . Det aktuelle området er skravert med rødt.

## 2.6 U-rørssvingninger

Innføres to lukkede svingesjakter i systemet som vist i figur 2.6.2 vil sjaktene og testseksjonen danne et masse-fjær-system som vil settes i svingninger når volumstrømmene endres av en mekanisk vippe installert rett før inngangen til røret høyre (nede i det horisontale rørstrekket). Det horisontale rørstrekket symobiliserer testseksjonen. Se figur under.



Figur 2.6.2: Skisse av u-rør ved testseksjonen i riggen

Den generelle dynamikken for en slik strømning vil i følge Newtons andre lov og Hookes lov bli:

$$\begin{aligned} F_x &= ma_x \\ -kx &= m \frac{d^2x}{dt^2} \end{aligned} \quad (2.6.4)$$

Likningen er da på formen

$$m\ddot{x} - kx = 0 \quad (2.6.5)$$

og egenfrekvensen er

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.6.6)$$

Frekvensen for u-røret mellom de to tankene og gjennom testseksjonen (TS) blir derfor

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

$$f = \sqrt{\left(\frac{k}{m}\right)} \frac{1}{2\pi}$$
(2.6.7)

For strømmingen i u-røret i testsløyfen kan kontinuitetslikningen brukes og sammenhengen mellom tankene og testseksjonen som vist under:

$$u_{Tank} A_{Tank} = u_{TS} A_{TS}$$

$$u_{tank} = \frac{dx_1}{dt} = u_{TS} \frac{A_{TS}}{A_{Tank}}$$
(2.6.8)

Dette settes så tilbake i Newtons andre lov, og det oppnås et uttrykk for kraften i u-røret

$$F = ma$$

$$= \left[ \rho (x_1 + x_2) A_{Tank} \frac{d^2 x_1}{dt^2} \right] + \left[ \rho L A_{TS} \frac{A_{Tank} d^2 x_1}{A_{TS} dt^2} \right]$$

$$= \rho A_{Tank} (x_1 + x_2 + L) \frac{d^2 x_1}{dt^2}$$
(2.6.9)

der  $\rho$  er massetettheten til vannet,  $x_1$  og  $x_2$  er avstanden opp til vannspeilet hhv. i tank 1 og tank 2, og L er lengden på testseksjonen. Setter vi inn i Hookes lov fås;

$$F = -kx$$

$$= \rho g A_{Tank} 2 (\Delta x)$$
(2.6.10)

der  $\Delta x$  er den avstanden vannet i tankene tilsammen har blitt forskjøvet i forhold til  $x_{mid}$

$$\frac{d^2 \Delta x}{dt^2} = 2 \frac{d^2 x_1}{dt^2}$$
(2.6.11)

Likningen for u-rørsstrømmingen i de to tankene og testseksjonen innsatt blir:

$$F = -kx = ma$$

$$= \rho g A_{Tank} \Delta x = \frac{1}{2} \rho A_{Tank} (x_1 + x_2 + L) \frac{d^2 \Delta x}{dt^2}$$

$$= 2g \Delta x = (x_1 + x_2 + L) \frac{d^2 \Delta x}{dt^2}$$
(2.6.12)

Som er på den kjente formen

$$m\ddot{x} - kx = 0 \tag{2.6.13}$$

og resonansfrekvensen til strømmingen i u-røret blir:

$$f_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{(x_1 + x_2 + L)}} \tag{2.6.14}$$

## 2.7 Trykklinjer

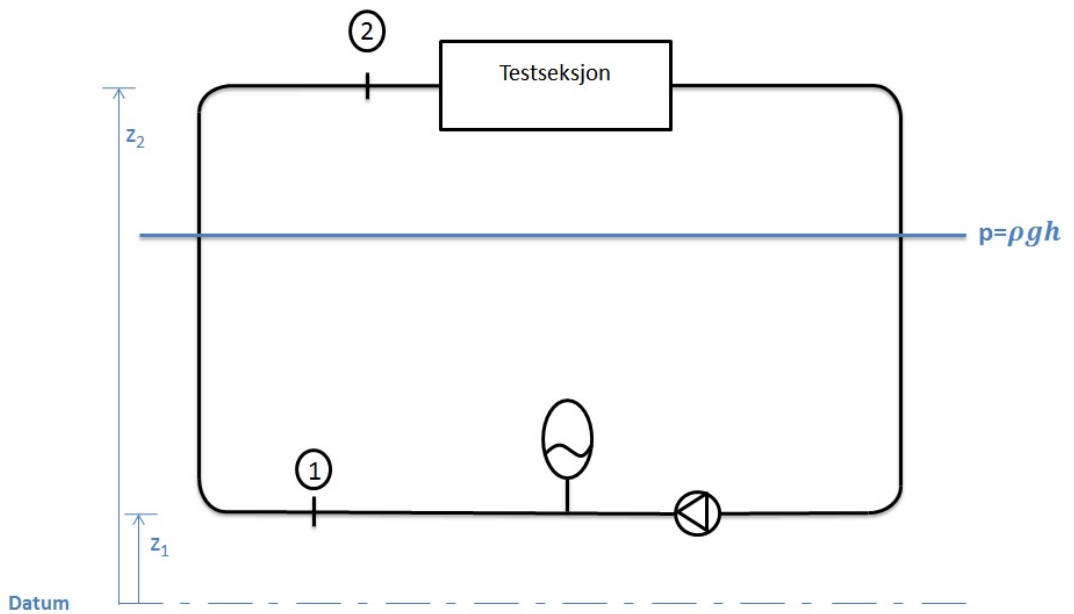
Figuren under er en illustrasjon av trykklinjer i en lukket rørsløyfe. Mellom punktene 1 og 2 gjelder Bernoullis likning. Tapene er neglisjert.

$$\begin{aligned} p_1 + \rho g z_1 + \frac{1}{2} \rho c_1^2 &= p_2 + \rho g z_2 + \frac{1}{2} \rho c_2^2 \\ c_1 &= c_2 \\ p_2 &= p_1 + \rho g (z_1 - z_2) \end{aligned} \tag{2.7.15}$$

Ved hjelp av akkumulatoren settes trykket i sløyfen slik at negativt trykk ved testseksjonen oppnås. For maks fleksibilitet ønskes testseksjonen er i størrelsesorden 10 m over pumpen.

Legg spesielt merke til differansen ( $z_1 - z_2$ ) er negativ, slik at man vil få et undertrykk oppe ved testseksjonen. Trykklinjen vil dog endre posisjonen vertikalt ettersom volumstrømmen (og dermed farten) gjennom testseksjonen endres.

Dersom trykket i utgangspunktet ligger på grensen til at kavitasjon oppstår i testseksjonen, vil de påtvungne volumstrømsendringene gjennom testseksjonen føre til at man vil bevege seg inn og ut av område for kavitasjon. Det er dette som igjen fører til den pulserende kavitasjonen som illustrert i delkapittel 2.5



Figur 2.7.3: Illustrasjon av trykklinje i kavitasjonsrigg med testseksjon, svingesjakter, pumpe og akkumulator

## 2.8 Tap i rør

I tillegg til komponenter som er installert rundt om i sløyfen, vil tap også oppstå grunnet friksjon i bend, rør, samt ekspansjon og kontraksjon av tverrsnittareal. Disse tapene vil føre til tap i det statiske trykket, men tapene er også avhengige av hastigheten på vannet i.e. det dynamiske trykket. Det er kun endring i vannhastigheten som fører til endringer i det dynamiske trykket ref. kontinuitetslikningen. Tapene kan summeres sammen og uttrykkes i mVs.[13]

$$\Delta h_{tot} = h_f + \sum h_m \quad (2.8.16)$$

$h_f$  gir trykktapet i sløyfen.  $\sum h_m$  gir summen av singulære tap grunnet f.eks. bend, ventiler, arealendringer etc. Formlene for  $h_f$  og  $h_m$  er gitt under.

$$h_f = f \frac{L V^2}{d 2g} \quad (2.8.17)$$

$$h_m = \frac{V^2}{2g} \sum K \quad (2.8.18)$$

K er tapskoeffisient for det spesifikke rørstykket og finnes i litteratur som tabulerte verdier eller empiriske formler. Skrevet fullt ut blir uttrykket for tap i rør gitt ved

$$\Delta h_{tot} = \frac{V^2}{2g} \left( \frac{fL}{D} + \sum K \right) \quad (2.8.19)$$

der  $f$  er Darcys friksjonsfaktor,  $L$  er lengden på røret,  $D$  er hydraulisk diameter,  $V$  er hastigheten på fluidet,  $K$  er tapskoeffisient og  $g$  er tyngdens akselerasjon. Tapene må regnes ut separat for hver rørdel da tverrsnittsarealet i rørene varierer, i.e. farten  $V^2$  endres. Tapene grunnet de forskjellige geometriene finnes fra funksjoner eller tabulerte verdier.  $K$  er generelt gitt som summen av friksjonskoeffisienter  $K_{fr}$ , og lokal motstand,  $K_{loc}$  som vist under.

$$K = K_{loc} + K_{fr} = \frac{\Delta p}{\rho c^2 / 2} \quad (2.8.20)$$

### 2.8.1 Tap i bend

De lokale tapene i bend  $K_{loc}$  er gitt ved

$$K_{loc} = A_1 B_1 C_1 \quad (2.8.21)$$

Koeffisienten  $A_1$  inkluderer effekten av vinkelen på bendet. Er vinkelen  $90^\circ$  blir  $A_1 = 1,0$ . Koeffisienten  $B_1$  tar til hensyn den relative krumningen på bendet, og kan finnes ved hjelp av empiriske formler.  $C_1$  er for bend med kvadratisk eller sirkulært tverrsnitt lik 1.0 [6]

Uttrykket for friksjonstap blir gjennom bend blir beskrevet på denne måten

$$K_{fr} = 0.0175 \frac{R_0}{D_h} \delta f \quad (2.8.22)$$

der  $R_0$  er radien på bendet fra senterlinjen av røret, og  $D_h$  er den hydrauliske diameteren som for et sirkulært rør vil være det samme som diameteren  $D$ .  $\delta$  er antall grader bendet dreies og  $f$  er den vanlige friksjonsfaktoren.





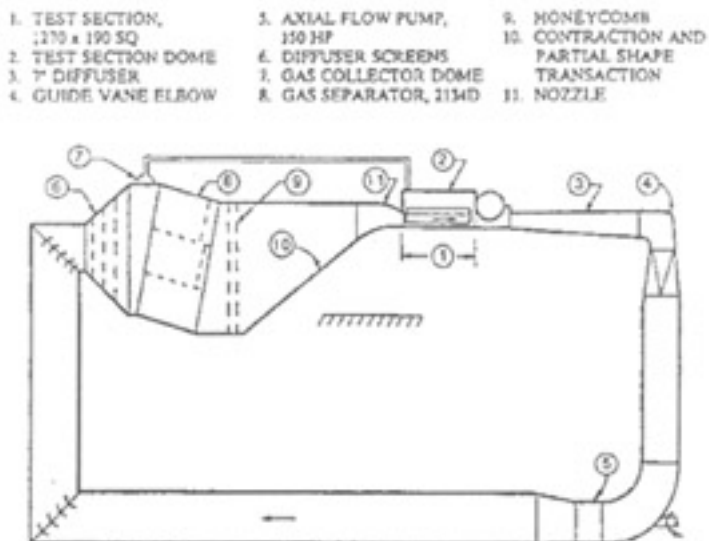
# Kapittel 3

## Andre kavitasjonslaber

### 3.1 SAFL/ UNH High Speed Water Tunnel

Kavitasjonslaben ved University of Minnesota i USA ved St. Anthony Falls Laboratory (SAFL) ble bygget i 1948 [10] og har flere ganger vært utbedret (senest april i 2012). Laben har vært, og er, en av de fremste hva gjelder testing av kavitasjon. Et vingeprofil kan installeres i testseksjonen. Det testes det for kavitasjon og lift og drag på testobjektet måles. Kavitasjonslaben pumper vann i høy hastighet gjennom en lukket sløyfe og over testobjektet. Testseksjonen er instrumentert med trykkuttak og hydrofoner (mikrofoner brukt under vann for å ta opp lyder under vann). Testseksjonen er også utstyrt med plexiglass på tre av flatene slik at visuell tilgang til forsøkene blir enkelt. Vinduene er enkle å montere av og på slik at forskjellige testobjekter (hydrofoils etc) kan installeres etter ønskelig forsøk. Annet eksperimentelt utstyr som strobe fotografi og Laser Doppler Velocimeter (LDV) og Particle Image Velocimeter (PIV) er også installert. Riggen er spesialdesignet for å fjerne luft som kan blir injisert inn i testseksjonen under eksperimenter. Nedenfor følger en kort oppsummering av spesifikasjonene til laben[9].

- Høy hastighet på vannet,  $>20$  m/s
- Testseksjon 0,19m bred x 0,19m dyp
- Lukket sløyfe
- Regulering av absoluttrykk
- Teste for et bredt spekter av strømningsforhold
- Laserbasert optiske instrumenter til å måle kavitasjon (high-speed PIV, LDV, PDA) Forklare disse uttrykkene
- High-speed bilde- og video, måling av kraftbalanser (lift- og drag)



Figur 3.1.1: SAFL water tunnel [9]

På midten av 90-tallet ble ikke laben brukt i St. Anthony lengre, og i 2008 ble den demontert og flyttet til University of New Hampshire (UNH) av Prof. Martin Wosnik.

Ivaylo Nedyalkov skrev sin masteroppgave ved Chalmers University of Technology i 2012 der han beskrev oppussingen av denne riggen da den ble installert ved UNH. Det ble beskrevet hvordan moderne utstyr som LDV-system ble implementert. Selve testseksjon endret også utforming fra sirkulært til oktagonal tverrsnitt med optiske glassvindu. Dette krevde modifikasjoner av rørene både før og etter testseksjonen. [8]

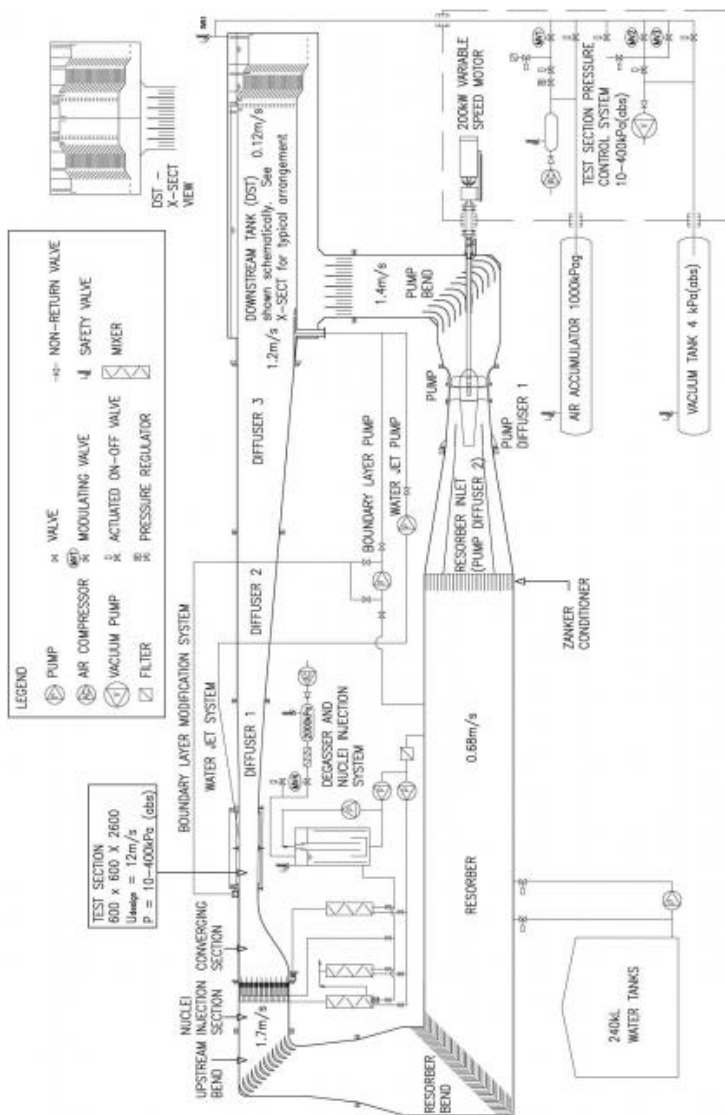
## 3.2 Australian Maritime College (AMC) AMC Cavitation Research Laboratory

Australian Maritime College holder til på øya Tasmania sør for Melbourne, Australia. Denne laben har et tett samarbeid med Defence Science and Technology Organization (DSTO), en del av forsvaret til Australia. Laben ble åpnet 1. oktober 2009 og minner om skipsmodelltanken på Tyholt hva gjelder forskning på skip. Kavitasjonstunnelen blir oppfattet som en av de mest sofistikerte mellomstore tunnelene internasjonalt. Den er utviklet både for grunnleggende og anvendt forskning innen marine plattformer, hurtiggående fartøy og fluidmekanikk generelt.

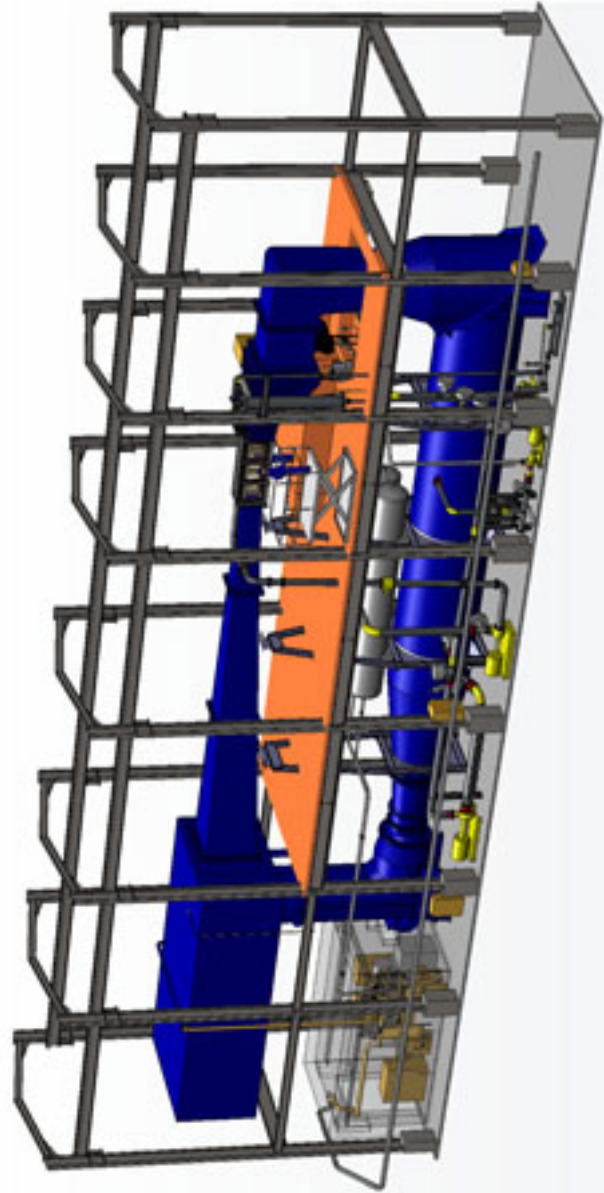
En av dens viktigste funksjoner inkluderer presis kontroll av oppløst og fri gass, noe som er kritisk for kavitasjon. Tunnelen er derfor utstyrt med utstyr for å kontrollere mengden oppløst gass. Dette gjøres ved hjelp av en hurtig-avgasser som gjør at man i løpet av 2 timer får redusert gassinnholdet til 20 % av atmosfærisk metning.

Vann blir pumpet over objekter i en lukket sløyfe for å teste for kavitasjon. Testobjektet vil hele tiden kunne observeres da det er fritt innsyn gjennom et plexiglassvindue på forsiden og baksiden. Hastigheten og antall bobler som oppstår og hvordan disse utvikles vil kunne observeres. Da denne laben er ledende hva gjelder kontroll av oppløst gass, vil denne være av stor interesse å se på når en kavitasjonsrigg planlegges ved Vannkraftlaben på NTNU. Nedenfor følger en kort oppsummering av spesifikasjonene til laben ved AMC [2]

- Max vannhastighet 12 m/s
- Lukket sløyfe
- Trykkområde 4-400 kPa absoluttrykk
- Testseksjon 0,6 x 0,6 x 2,6 m
- Kavitasjonsnummer fra 0,7 til 200
- Avgasser/degasser - 20 % metning av atm på 2 timer
- 2 dynamometere
- Pumpemotor 200 kW



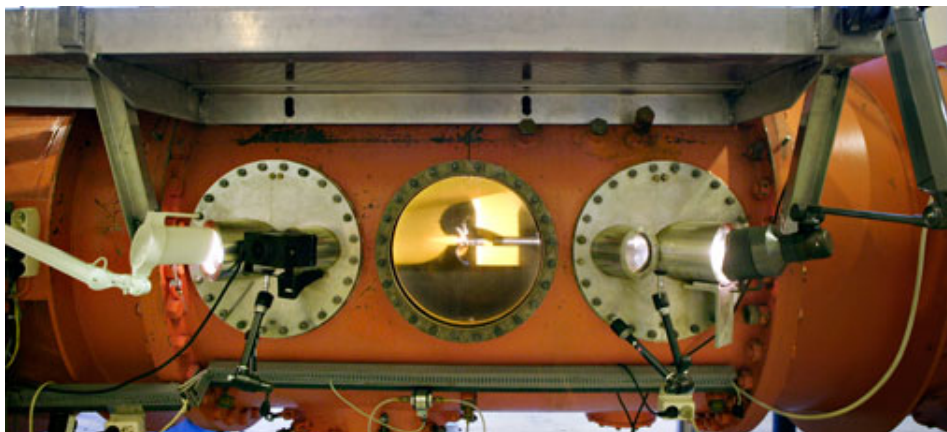
Figur 3.2.2: Skjematisk tegning av kavitasjonstunnel og kontrollutstyr av kavitasjonsrigg ved AMC [2]



Figur 3.2.3: 3D-tegning av kavitasjonsrigg ved AMC [2]

### 3.3 Kavitasjonstunnelen ved NTNU (Tyholt)

Kavitasjonstunnelen på Marinteknikk brukes til å undersøke den hydrodynamiske yteevnen til ulike typer skipsskrog, drivsystemer og andre hydrodynamiske enheter. Propellerinduserte trykksvingninger og støy så vel som kavitasjon undersøkes ved hjelp av målinger og observasjon med høyhastighetsvideo. Krefter og momenter som virker på propellerakser og individuelle propellerblad kan måles med avanserte egenutviklede miniatyrinstrumenter, i tillegg til standard målinger av trykkraft og dreiemoment [7]. Under følger et bilde av testseksjonen på Marinteknikk, samt en kort oppsummering av spesifikasjonene til kavitasjonstunnelen.



Figur 3.3.4: Testseksjonen ved kavitasjonstunnelen på Marin [7]

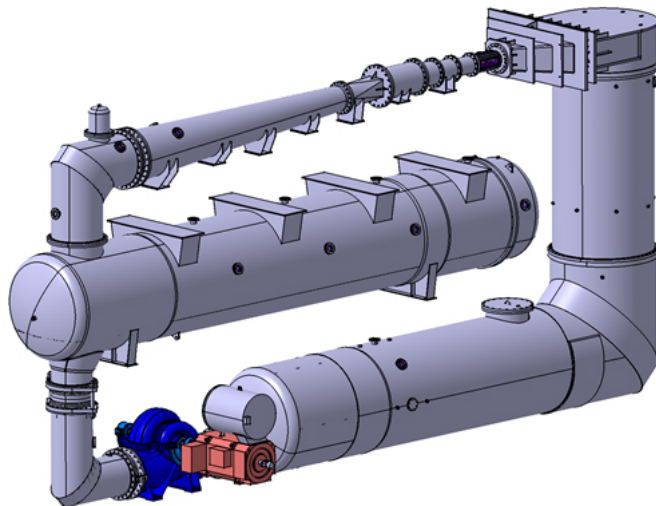
- Diameter testseksjon 1.20 m
- Lengde testseksjon 2.08 m
- Lukket sløyfe
- Max
- Testseksjon 0,6 x 0,6 x 2,6 m
- Kavitasjonsnummer fra 0,7 til 200
- Avgasser/degasser - 20 % metning av atm på 2 timer
- 2 dynamometere
- Pumpemotor 200 kW

### 3.4 Universitetet i Lausanne (EPFL) sin kavitasjonstunnel

Universitetet École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Hovedaktivitetene ved laben er undervisning og forskning innen hydrodynamikk og roterende maskineri som turbiner, pumpeturbiner og skipspropeller. Det er mulighet for testing ved høye vannhastigheter og visualisering av kavitasjonsfenomener ulike steder på testobjektet.

Nedenfor følger en kort oppsummering av spesifikasjonene til laben ved EPFL [5].

- Testseksjon 0,15 x 0,15 x 0,75
- Max vannhastighet 50 m/s
- Trykkområde  $\leq 16$  bar
- Lukket sløyfe
- Konvergens ratio 46 (hva nå enn det skal bety)
- Pumpekapasitet 500 kW



Figur 3.4.5: EPFL kavitasjonsrigg

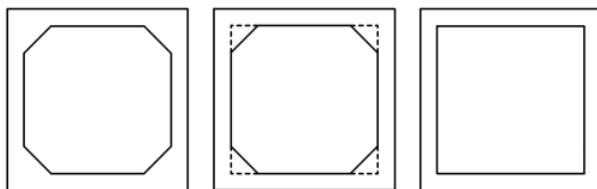
### 3.4.1 Kommentarer/lærdom av de forskjellige labene som ble nevnt

Kavitasjonsriggen ved UNH er tatt med da denne likner mye på kavitasjonsriggen som er tenkt bygd på NTNU. Riggen ved UNH tjener i stor grad de samme formålene som er tenkt ved riggen som planlegges ved NTNU. Når det gjelder hastigheten gjennom testseksjonen, vil denne ligge noe under NTNUs område, men riggen hos UNH det er et fin startpunkt med tanke på utforming av testseksjon og utforming av riggen således. En kort oppsummering av lærdom og spesifikasjoner av denne er gitt under.

#### Kavitasjonstunnelen ved UNH

UNH valgte å endre på tverrsnittarealet av selve testseksjonen da denne ble oppgradert i 2012. Den daværende testseksjonen var oktagonal (for å hindre corner cross-flows og secondary flows i dysen skulle bli redusert). Et oktagonalt tverrsnitt, et kvadratisk tverrsnitt med avtagende hjørner samt et rent kvadratisk tverrsnitt ble vurdert.

Analysen gav at en uniform kvadratisk testseksjon var det beste valget. Dette for best mulig visuell oversikt over testene og målinger som gjøres nærme veggen. Dette er i tillegg den enkleste løsningen ved konstruksjon av riggen rent praktisk. Under vises et bilde over de tre alternativene som ble vurdert som optimalt tverrsnitt på testseksjon. For en testseksjon med konstant tverrsnitt vil en trykkgradient oppstå på grunn av grensesjiktet langs veggen. Kompensasjonen for dette vil være et oktagonalt tverrsnitt eller det kvadratiske med hjørner, men dette vil bare fungere for en gitt testhastighet. [12]



Figur 3.4.6: Tre alternativer for valg av ny testseksjon ved UNH da de skulle oppgradere riggen. Fra venstre mot høyre: oktagonalt, kvadratisk med hjørner og kvadratisk tverrsnitt [8]

Testseksjonen ble i tillegg gjort mindre da dette ga mulighet for økt hastighet gjennom testseksjonen som igjen gav rom for et bredere spekter av kavitasjonstill å teste for.

Det ble også laget et rammeverk for å støtte selve tunnelen. Dvs et rammeverk av stål som riggen står på og som forsterker riggen. Dette vil være viktig ved maksimal



kjøring.

Dysen i riggen ble modellert numerisk ved hjelp av en ikke-viskøs Eulerlikning. Denne tar hensyn til ikke-uniform inngangshastigheten ved forskjellige contraction ratios. Toppen av dysen var flat, mens sideveggene og bunnen har en S-form, hvis form bestemmes av 5-gradspolynomet under. [? ]

$$y_c = y_{CI} - (y_{CI} - y_{CO}) [a_C X_C^5 + b_C X_C^4 + c_C X_C^3 + d_C X_C^2 + e_C X_C + f_C] \quad (3.4.1)$$

hvor:

$X_C$  -  $x_C/L_C$  er normalisert lengde nedstrøms

$x_C$  - avstand nedstrøms innløpet på dysen

$y_C$  - radiell avstand fra senterlinje ut til  $x_C$

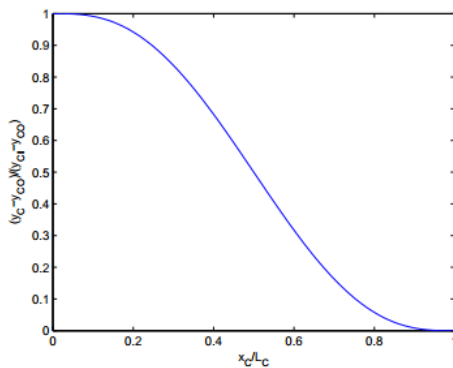
$y_{CI}$  - radiell avstand fra senterlinje til ytterkant ved innløpet

$y_{CO}$  - radiell avstand fra senterlinje til ytterkant ved utløpet

$a_C, b_C, \dots$  - koeffisienter av polynomet som beskriver formen til dysen

$L_C$  - lengden på dysen

Figur 3.4.7 viser kontraksjonsprofilen normalisert på lengden  $L_C$  på x-aksen og differansen mellom radiallengdene  $y_{CL} - y_{CO}$  ved inn- og utløp på y-aksen.



Figur 3.4.7: Normalisert kontraksjonsprofil.[8]

For nærmere utregninger se masteroppgaven til Ivaylo Nedyalkov [8] samt arbeider av Wetzel og Arndt. [12]

### Kavitasjonstunnelen ved Tyholt

Kavitasjonstunnelsen på Tyholt er mye større enn den som tenkes bygd på Vannkraflaben. Testobjektene er små modeller av skrog, og ikke rene bladprofiler. Allikevel finnes det nyttige erfaringer å ta med seg. Enkel montering og skifting av testobjekt er viktig. Per dags dato brukes det i snitt en halv arbeidsdag på å skifte testobjekt på Tyholt. Grunnen til det er at man må snike inn skroget i et hull som ligger oppstrøms selve testseksjonen. Vinkelen for å få dette til er ikke så stor, og det trengs flere folk for å utføre skifte av testobjekt.

Et annet viktig aspekt er å ha hull til målinger nokså lett tilgjengelig. Det er tungvint å ha måleuttakene på undersiden av testseksjonen dersom de heller kunne vært plassert på toppen eller på sidene. I tillegg kan det være lurt å lage flere slike hull til måleinstrumenter enn hva først antatt. Det hender ofte at man finner ut senere at det hadde vært lurt med flere målinger eller andre type målinger.

## Kapittel 4

# Kavitasjonstunnel ved Vannkraftlaben (NTNU)

### 4.1 Spesifikasjoner for kavitasjonsmodell med utgangspunkt i tilsvarende kavitasjonstunneller ved andre universiteter/ steder

Med utgangspunkt i nevnte kavitasjonstunneler rundt om i verden er det kommet frem til omtrentlige spesifikasjonene for en ny kavitasjonstunnel ved Vannkraftlaboratoriet på NTNU:

#### 4.1.1 Overordnede størrelser

**Dimensjoner rigg:** Omtrent 12 m lang, 10 m høy

**Dimensjoner rør:** Indre diameter  $d_i = 250$  mm, godstykkelse 3 mm

**Dimensjoner testseksjon:** 130 mm x 180 mm x 0,8 m

**Flow:**  $Q = 0,4212 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow$  Max 18 m/s gjennom testseksjonen

**Pumpe:** 55 kW (74 hp)

**Trykk:** 0,4 bar - 6 bar

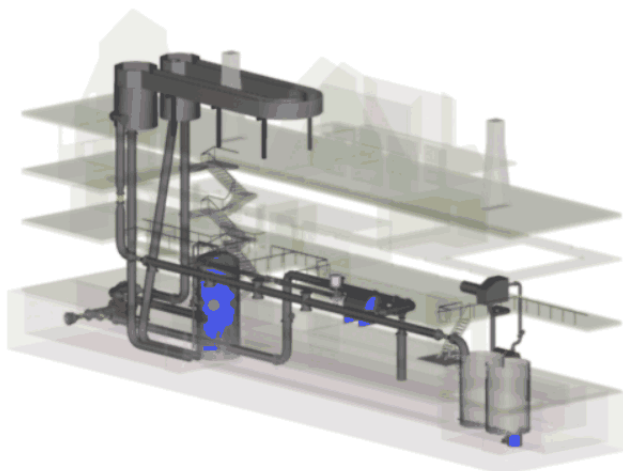
Riggen består av en testseksjon med to svingetanker ved siden av. Én rett før testseksjonen og én umiddelbart etterpå. En mekanisk vippe vil være montert i

gulvet ved utgangen av testseksjonen for å sette i gang u-rørssvingninger i testseksjonen mellom de to tankene. En grundigere forklaring av flyten i riggen er gitt i underkapittelet 4.5 ”Flyt i riggen”

## 4.2 Frittstående rigg eller kobling til eksisterende anlegg

Før testseksjonen kan planlegges og designes, må det bestemmes om det skal være et system som skal kunne kobles på eksisterende anlegg, eller om det skal være frittstående rørsløyfe. På vannkraftlaben er det allerede en stor Francisrigg det er mulighet for å koble seg til eksisterende rørsystem.

På vannkraftlaben er det flere rørsløyfer som er trykksatte ved hjelp av to sentrifugalpumper på 330 kW og med en kapasitet på 800 l/s hver, en trykktank med maksimalt 100 mVs trykk (10 bar), en 60 tonns kalibreringstank og en lukket rørsløyfe. Laboratoriet har en vannføringskapasitet på 1 m<sup>3</sup>/s ved 20 mVs. Maksimalt trykk er 100 mVs som oppnås ved å kjøre pumpene i serie gjennom trykktanken. Det er en testrigg for Francis, Kaplan og reversible pumpeturbiner, en testrigg for Pelton-turbiner, samt en minirigg for å teste mindre turbiner. Under ligger et bilde av testriggen for Francis, Kaplan og reversibel pumpe på Vannkraftlaben.



Figur 4.2.1: Illustrasjon av allerede eksisterende rørsløyfer ved Vannkraftlaben

Dersom en frittstående rigg velges, vil det være enklere å drive riggen. Det trengs ikke tas hensyn til andre tester som kjøres parallelt i samme rørsløyfe. Det vil også kunne velges en pumpe som er bedre egnet til den nye riggen. Valg av plassering i laben blir også noe friere.

Det spares inn på pumpekostnader om det blir bygget en rigg som kan kobles på det eksisterende anlegget på Vannkraftlaben. Det må vurderes om det er hensiktsmessig, slik at normal drift kan fortsette på eksisterende rigg, samtidig som det er tid til å kjøre den nye riggen. I tillegg er det antatt at det også vil være plassbesparende å koble på eksisterende anlegg.

### 4.3 Fremgangsmåte ved design av kavitasjonsrigg

Det ble først sett på andre laborer rundt om i verden. Den nye kavitasjonsriggen er tiltenkt å utøve formål som ved Universitetet i Minnesota, nemlig til generell forskning på NACA vingeprofil der modulert kavitasjon skal fremtvinges for å se hvordan kavitasjonen forløper. Det ble derfor naturlig å skjene til riggen ved SAFL/UNH da det gjaldt førsteutkast til dimensjoner og generell utforming.

Etttersom kavitasjonsriggen er et lukket system, er det ingen løftehøyder som må overvinnes, kun friksjonstap. Friksjonstapene i et rør øker med kvadratet av vannhastigheten. Derfor er det viktig å velge riktig dimensjoner på røret i forhold til vannhastigheten. Det ble bestemt hvor stor testseksjonen skulle være, og en foreløpig hastighet gjennom denne. Da er altså volumstrømmen  $Q$  satt, og rør og andre deler ble tegnet inn i 3D-modelleringsprogrammet Inventor. Rørene ble valgt til å ha indre diameter på 250 mm.

Deretter ble det gjort overslagsberegninger på tap i rørsøyfen grunnet friksjon. Tapene ble regnet ut ved hjelp av tapskoeffisienter funnet i Handbook of Hydraulic Resistance 3rd Edition [6] og er presentert i tabellen under. Det ses også hvor mye hver komponent bidrar til det totale tapet.

<b>Komponenter</b>	<b>Enhet/meter</b>	<b>Antall</b>	<b>Totalt</b>
Bend (90°)	0.8464 m	2 stk	2.5392 m
Bend (90°) - med kaskader	0.7510 m	2 stk	1.5020 m
Diffusor (før testseksjon)	0.9388 m	1 stk	0.9388 m
Testseksjon	1.1728 m	1 stk	1.1728 m
Diffusor (etter testseksjon)	2.8916 m	1 stk	2.8916 m
Dyse	0.6443 m	1 stk	0.6443 m
Sirkulære rør (d = 250 mm)	0.1648 m	28.5 m	4.6968 m
<b>Tap</b>			<b>11.8463m</b>

Tabell 4.3.1: Tap i komponentene i riggen

Resten av vannveiene er ikke med i oversikten da disse er små. De vil dog bli tatt hensyn til når man ganger med en god sikkerhetsmargin.

Tapene rundt i sløyfen setter betingelsene for hvor mye pumpen må kunne yte. Ved maks vannføring på 18 m/s gjennom testseksjonen vil tapene være på 11,8 m og pumpen må kunne overvinne dette.

## 4.4 Elementer i riggen

Elementene i riggen blir kjøpt fra produsenter som K.Lund (eies av Ahlsell) og Smith Stål. Andre deler må lages av teknikerne i laben for å få de rette delene som trengs.

### 4.4.1 Rør

Det er til kavitasjonsriggen valgt rør fra K. Lund AS. Vannkraftlaboratoriet ved NTNU har tidligere brukt rør fra denne leverandøren. Rørene som her er valgt finnes i Industrikatalogen [3] under kapittel 1D Rør og deler Hydrauliske rør - langsømsveiste rør. Røret av stål som her er valgt er rustfritt AISI 304 L. Utvendig diameter  $d_y = 256$  mm og godstykkelse 3 mm. Indre diameter blir da på  $d_i = 250$  mm. Vekt i [kg/m] er 19,0. Dette følger ISO-standard. Styrkefaktor: rørene leveres  $m/z = 1.0$ . Fabrikasjonslengder på hhv. 6 og 3 meter. Artikkelnummer på røret er 180 3014.

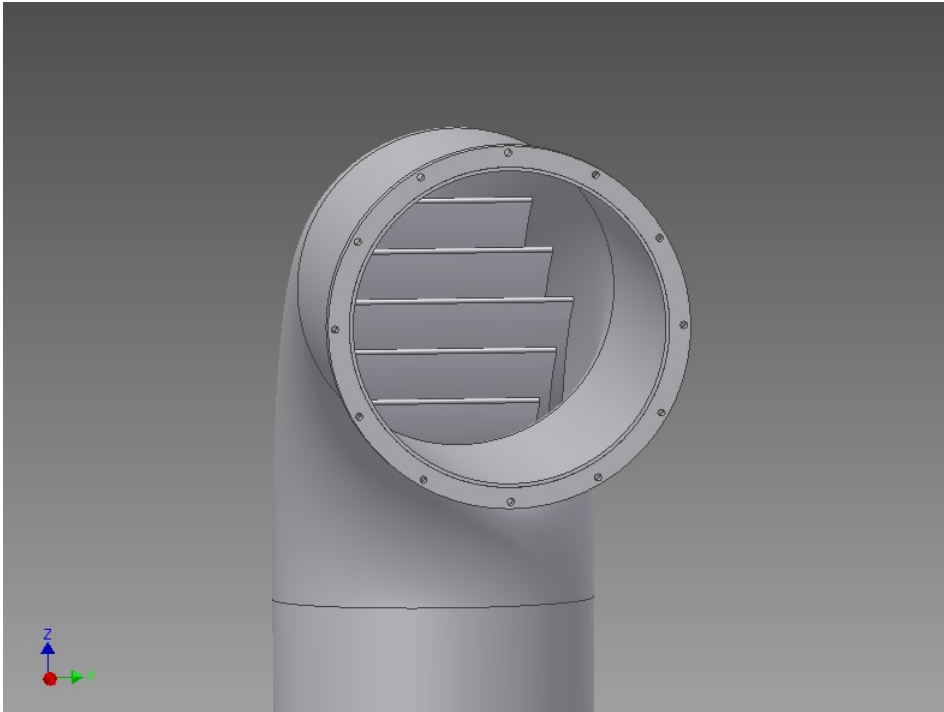
### 4.4.2 Bend

Det vil være behov for fire bend i riggen. Samtlige bend er like i størrelse og utforming. Bendet ved inngangen til pumpen og bendet oppstrøms testseksjonen vil også inneholde kaskader. K. Lund leverer bend med  $d_y = 256$  mm med en godstykkelse på 3 mm. Samme spesifikasjoner på stålet som de rette rørstykkene.

### 4.4.3 Bend med kaskader

Bend 2 (ved inngangen til pumpe) og bend 4 (oppstrøms testseksjonen) er hver utstyrt med fem kaskadebend for å rette ut strømmingen. Det er svært viktig at strømmingen inn på testseksjonen er så uniform som mulig. Etter bendet skal dessuten strømmingen akselereres opp, og det er viktig at strømmingen er så uniform som mulig før akselereringen begynner. Fem kaskadebend er satt horisontalt inn i bendet, der det midterste av dem er det lengste. Handbook of Hydraulic Resistance [6] ble brukt for å regne ut antall kaskader og størrelsen på disse. Det er

også viktig å rette ut strømmingen før den går inn på pumpa, så kavitasjon unngås grunnet ustødig strømming. Under følger et bilde av slik bendet med kaskader vil se ut tegnet i Autodesk Inventor 2011.



Figur 4.4.2: Tegning av kaskadebend

#### 4.4.4 Dyse

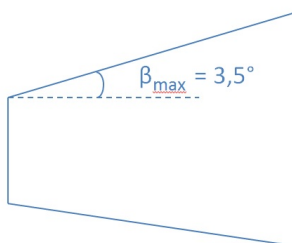
”Arealdifferansen (kontraksjonsrate) fra innløpet til utløpet på dysen bør være stor. Det bør helst være en rate på 6 eller mer.” jf. Luca Savio [11]

Flere nøkkelparametre når det gjelder design av dysen som kontraksjonsrate, lengde og form. Kontraksjonsrate setter fysiske dimensjoner når det gjelder flere andre deler av sløyfen. Stor kontraksjonsrate tillater store tverrsnittareal i vannveien, og dermed kan trykktap rundt om i sløyfen begrenses. Med høy kontraksjonsrate vil det også oppnås bedre og jevnere strømming inn på testseksjonen, samt lavere turbulensintensitet. En dyse bør ikke være for lang da dette vil kunne føre til grensesjikt og separasjon grunnet veldig brå trykkgradienter. [12]

Dyse kan modelleres med en ikke-viskøs Eulermetode, og kan ved hjelp av et femtegrads polynom.

#### 4.4.5 Diffusor

Diffusoren etter testseksjonen kan max ha en økning i tverrsnitt som tilsvarer en helning på  $7^\circ$  helning. Det vil si en halvvinkel på  $3,5^\circ$  som vist i illustrasjonen under. I beregningene for diffusor i ny testseksjon er  $\beta$  valgt til  $3^\circ$  for å være sikker på at ikke avløsning i strømmingen ved grenseskiktet oppstår.



Figur 4.4.3: Maks vinkeløkning i diffusor

#### 4.4.6 Pumpe

Etter at alle tapene er regnet ut gjennom sløyfen (grunnet ventiler, tap i rør, tap i bend) og man vet makshastigheten på vannet samt volumstrøm kan man finne ut hvor mye pumpen må kunne yte. Pumpen KSB RDLO 400-525 fra KSB Lindflaten AS skal benyttes. Det er en aksiell pumpe med head på 12 meter og 58,16 kW (78 hp). Mer informasjon om pumpen finnes i vedlegg. KSB kunne de tilby en pakke med pumpe montert på skidd, motor og frekvensomformer.

KSB har levert pumper og ventiler til det norske markedet i over 50 år og anses som et solid firma. De ble også valgt som leverandør til de nye pumpene på Vannkraftlaben da Francisriggen ble oppgradert.

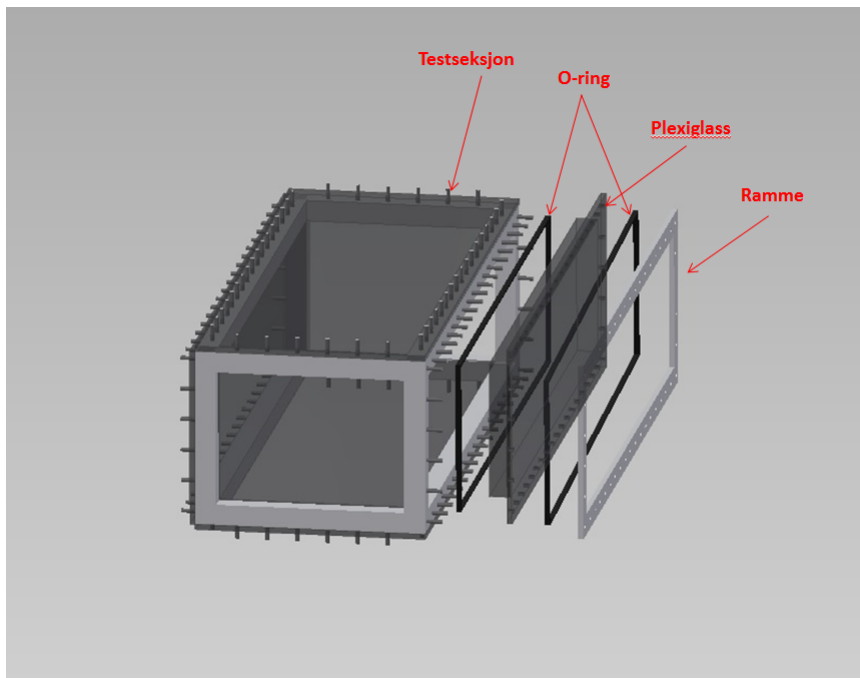
#### 4.4.7 Kuppel

En liten kuppel skal installeres umiddelbart etter bend 4 (se illustrasjoner i kapittel 5). Denne har til hensikt å kunne føre vekk den overflødige luften i rørsøyfen som dannes ved kavitasjon.



#### 4.4.8 Testseksjon

Testseksjonen er laget av en hul stålramme på 20 mm x 20 mm. De indre målene (minste avstand fra en ramme til en annen) på testseksjonen er 180 mm x 130 mm x 5 m. Topp- og bunnflaten er på 180 mm x 5m, mens sideflatene er på 130 mm x 5 m. Strømningen vil derfor ikke oppleve noe ” hopp ” idet den endrer testseksjonen. Det stikker bolter ut fra kantene av rammen slik at plexiglass kan festes både i bunn, topp og sideflater. Ved å ha plexiglass på alle sider av testseksjonen vil det være enkel, visuell tilgang til testobjektet og få inn tilstrekkelig med lys, noe som er viktig i forbindelse med en PIV . Mellom rammen og plexiglasset ligger en o-ring slik at det er helt tett. Det vil også ligge en o-ring mellom plexiglasset og en liten ramme som ligger utenpå for å feste plexiglasset. Se figur under 4.4.4. Boltene er av type M4. På sideplatene er det 19 bolter på langsiden og 4 bolter på kortsiden. På topp- og bunnplaten er det 17 bolter på langsiden og 6 på kortsiden. For nærmere tegninger se Appendix - maskintegning av testseksjonen. Plexiglassene er laget slik at de passer inni og rundt stålrammen. Strømningen vil da ikke oppleve noe ” hopp ” idet den entrer testseksjonen, da den vil ligge kant i kant med innsiden av rammen.



Figur 4.4.4: Oppsett estseksjon

Oppheng for testobjekt samt måling av lift og drag er beskrevet kort under kapittel 12 ” Videre arbeid ”.

#### **4.4.9 Svingetanker**

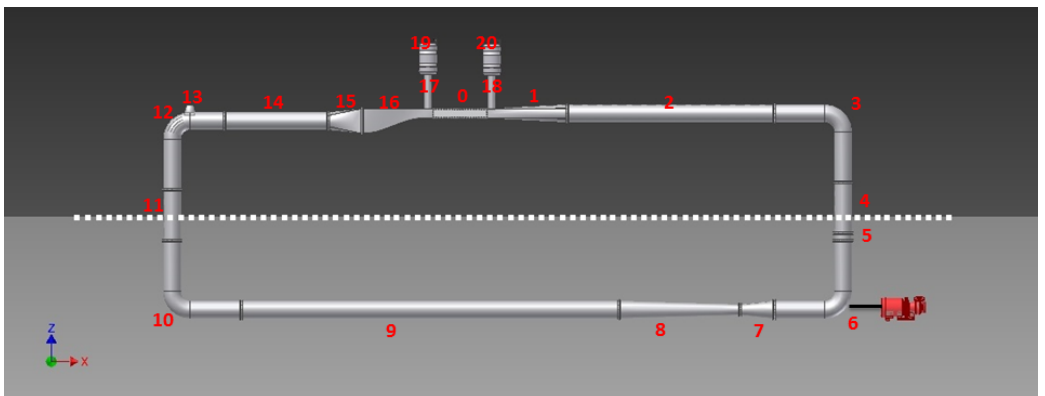
Det skal stå to tanker i rørsløyfa. Den ene rett før og den andre rett etter testseksjonen. Mellom disse tankene, og gjennom testseksjonen, skal en mekanisk vippe fremtvinge u-rørssvingninger. Det er også tenkt at man vil kunne ha anledning til å sette trykket ved hjelp av et trykk/vakum system i disse tankene.

#### **4.4.10 Akkumulator**

Trykket i rørsløyfen settes her. Akkumulatoren er også med på å dempe oscillasjoner forårsaket av pumpen. Da en kavitatsjonsrigg kan ha mange forskjellige typer tester, er det ikke alltid sikkert at tankene vil være med i forsøket for å skape u-rørssvingninger. Det vil da være ønskelig å stenge av vha. av kuleventiler. Trykket kan da ikke settes oppe ved tankene, så dette må gjøres et annet sted. En akkumulator nede ved pumpen vil derfor primært være der trykket settes.

## 4.5 Flyt i riggen

Kavitasjonsriggen består av 21 hovedkomponenter jf. figur 4.5.5. En testseksjon (del 0), en diffuser (del 1) som øker tverrsnittarealet og går fra rektangulært til sirkulært tverrsnitt med 3°-halv-vinkel diffusor som festes i et 90°-bend (del 3). Deretter går det rett ned med et rør på 6m og tverrsnittareal på 250 mm (del 4). Mellom dette røret og neste, er det en liten skjøt (del 5) for å få lengdene på begge sider like lange. Bend nummer 1 (del 3) vil nemlig ligge litt høyere enn bend nummer 4 (del 12) grunnet formen på dysen. Etter skjøten kommer bend nummer 2 (del 6). Dette inneholder kaskader for å rette ut strømmingen før den går inn i pumpen. Drivakselen fra pumpa går inn gjennom del 6 (bend 2) og strekker seg til del 7, røret etter bendet, der impelleren til pumpen står. Etter impelleren kommer igjen en diffuser (del 8). Videre går røret (del 9) videre til bend nummer 3 (del 10). Røret mellom bend 3 og 4, er identisk med del 4. Det siste bendet (del 12) ligger oppstrøms testseksjonen. Det har samme ytre dimensjoner som de andre bendene, men har som bend 2 kaskader innvendig. På toppen av bendet er det en kuppel som skal samle opp overflødig luft (del 13). Disse etterfølges av et rett rør (del 14), slik at strømmingen skal få tid til å rette seg opp igjen etter bendet. Deretter går det inn i en diffuser der arealet endres fra sirkulært til rektangulært. I tillegg har arealet blitt 6 ganger større enn arealet i testseksjonen. Dysen med den spesielle utforming (del 14) sørger for at strømmingen kommer mest mulig likt (uniformt turbulent) inn på testseksjonen. Rett før og rett etter testseksjonen er det to rør (del 15 og 16) med tilhørende tanker (del 17 og 18). Det er mellom disse tankene, og i testseksjonen, u-rørssvingninger skal fremprovoseres.



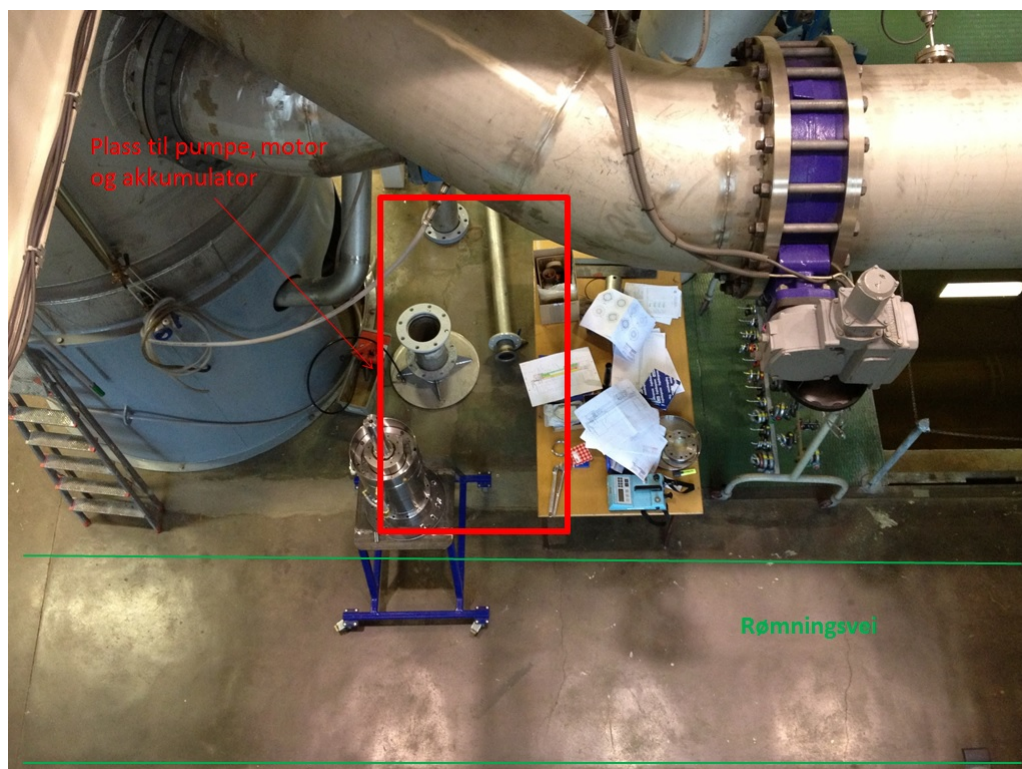
Figur 4.5.5: Flyt i riggen

## 4.6 Tilpasning av rigg ved plassering i Vannkraftlaben

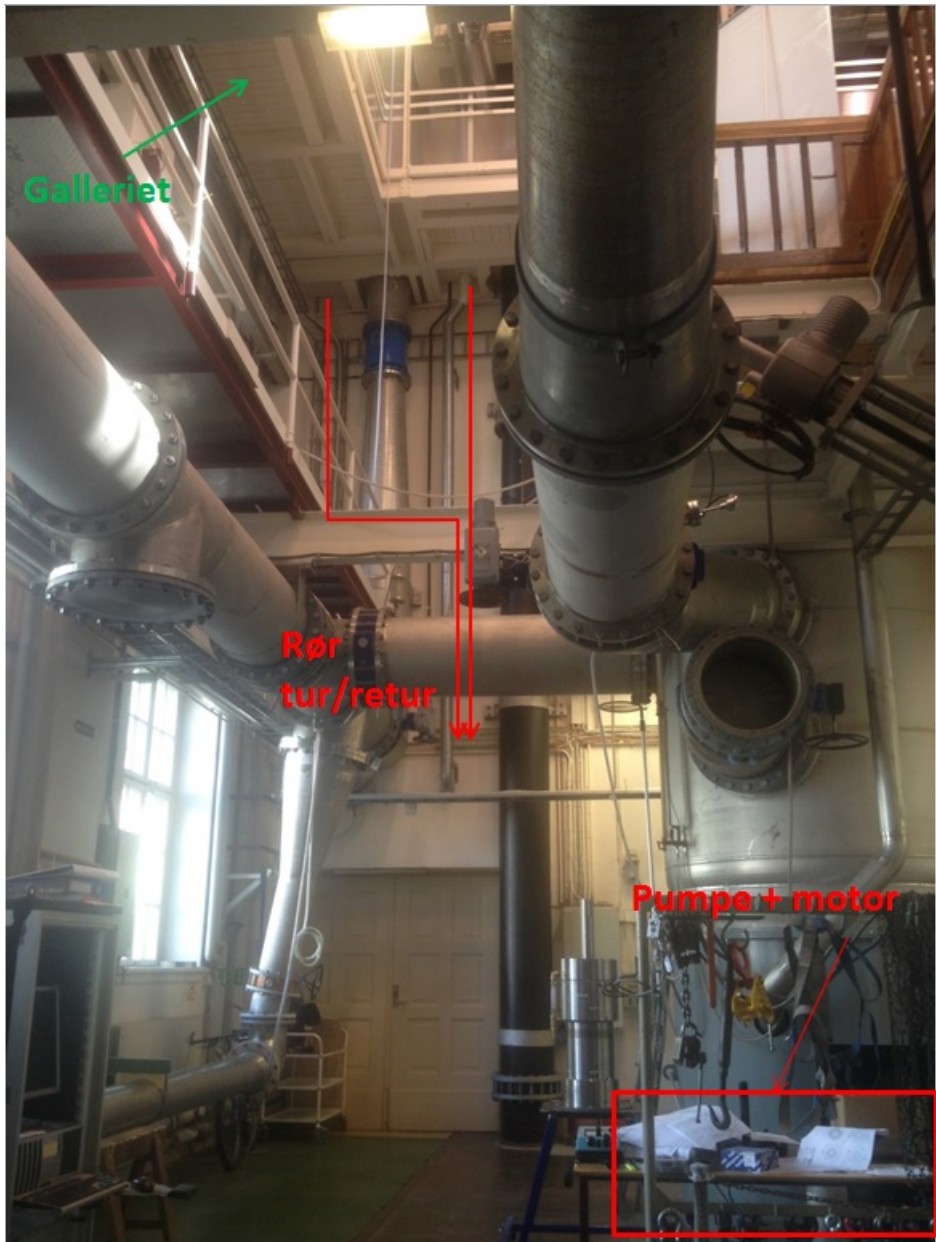
Fra dørken og opp til traverskrana er det ikke høyt nok opp til å bygge riggen uten modifikasjoner. Utifra dette ble to alternativer til plassering av riggen vurdert.

Det første alternativet var å plassere riggen langs veggen på østsiden av bygget. Pumpen og riggen vil da stå på dørken langs veggen, og rørene vil måtte føres på utsiden av traverskrana på vei opp til galleriet.

Alternativ to er å plassere pumpe og motor nede på dørken rett ved siden av trykk-tanken til Francis-sløyfa (se bildet under). Tur- og returrørene vil gå under 600mm røret på Francis-riggen, og bort mot kortveggen. Der vil de følge veggen helt opp til galleriet. Oppe på galleriet vil øvre del av riggen være som ved ideell geometri, 9 meter lang og med komponenter 13-20 samt 0-3 være som vist i figur 5.0.4



Figur 4.6.6: Plassering i Vannkraftlaben



Figur 4.6.7: Tilpasninger av rigg til Vannkraftlaben. Bildet viser hvor motor, pumpe og akkumulator skal stå, samt rør tur/retur galleriet

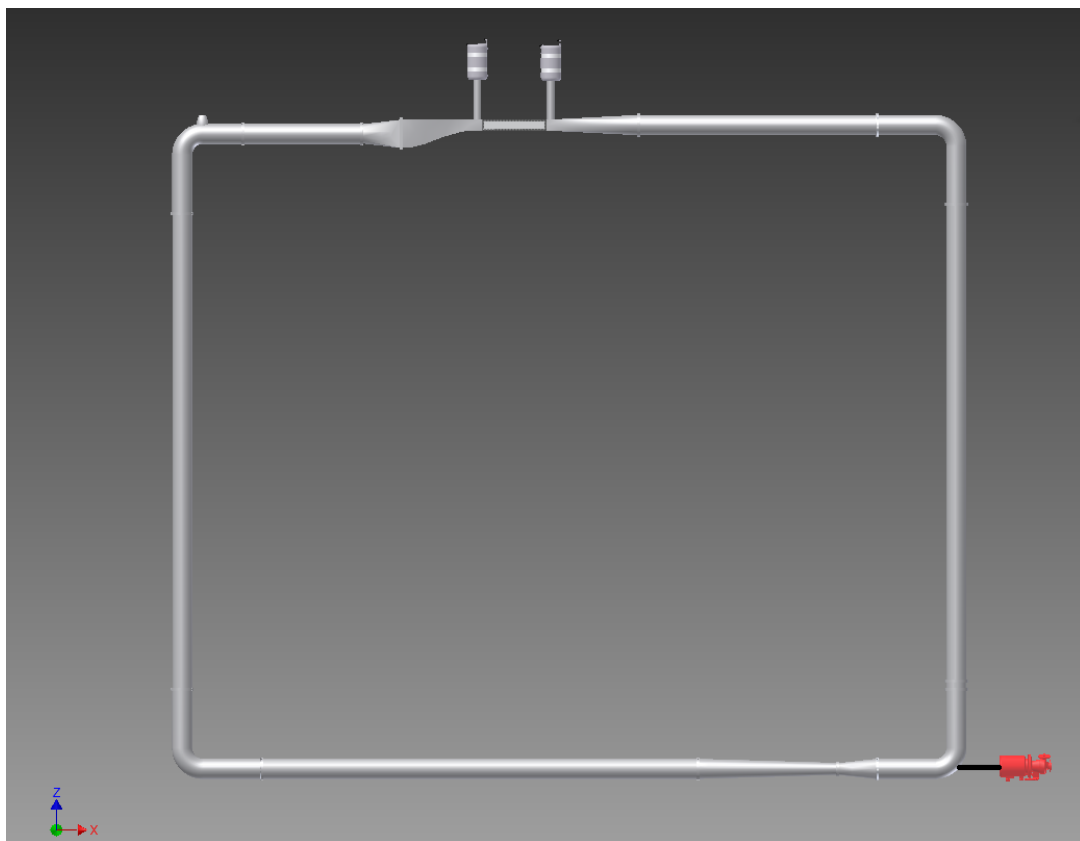


# Kapittel 5

## 3D-Tegninger

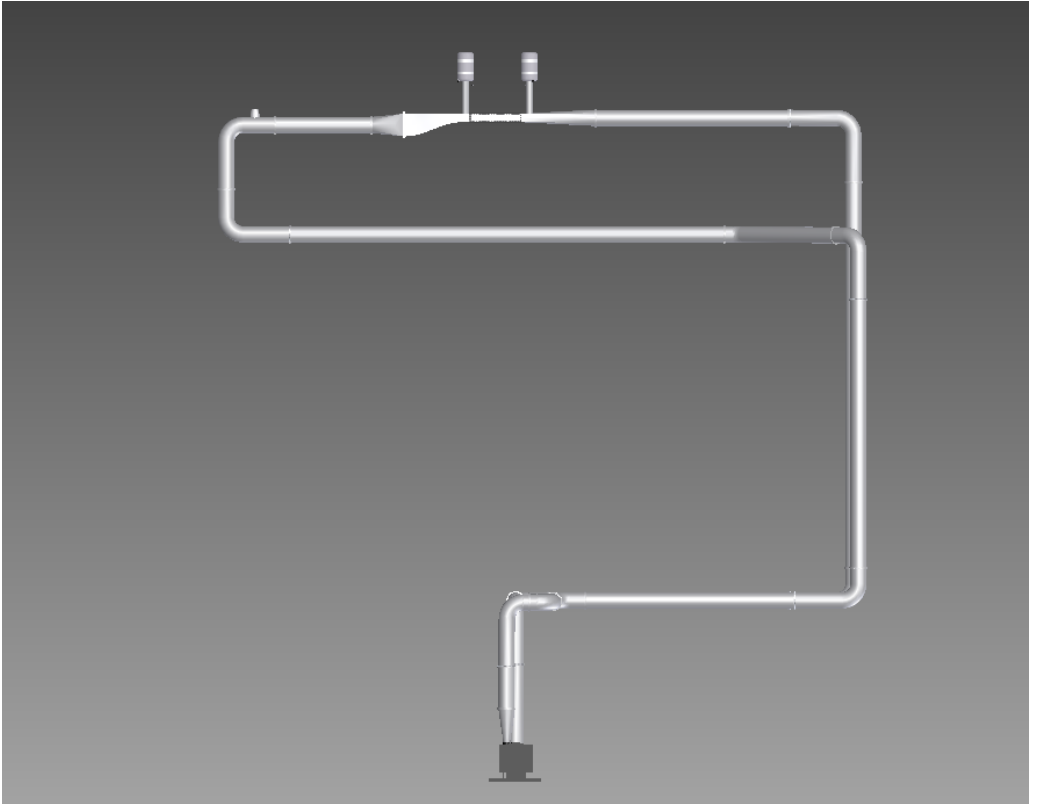
Det er blitt laget fullstendige tegninger av den nye testriggen i Autodesk Inventor 2011. Hvert element i riggen er tegnet i en "part"-fil'. Disse filene settes så sammen i en "assembly"-fil. Samtlige filer vil være tilgjengelige for senere bruk. Kandidaten hadde ingen forkunnskaper med 3D-modellering. Av den grunn var prosessen noe tidkrevende, men helt nødvendig da disse tegningene skal brukes videre (både i søknads-prosessen og til videre arbeider). Pumpe, motor og skidd er også tegnet inn. Rammeverk som riggen skal stå på er ikke tegnet inn. Under følger bilder av riggen både ved optimal geometri, samt etter at geometrien er justert for at riggen skal passe inn i Vannkraftlaben. For å få et mer helhetlig bilde av kavitatsjonsriggen, er den også tegnet inn sammen med allerede eksisterende rigger i Vannkraftlaben.

Bildet under viser tegning av riggen ved ideell geometri. Den vil være omtrent 12 meter lang og 10 meter høy. Den neste tegningen viser riggen etter tilpasninger til Vannkraftlaben. Den øvre delen av sløyfen vil være den samme som ved ideell geometri. Denne delen vil ligge oppe på galleriet i 3.etasje. Av praktiske årsaker er rørene lagt fra galleriet og langs med kortveggen i bygget, ned til 1. etasje i laben der pumpen skal stå. Geometrien på kavitatsjonsriggen vil derfor avvike en del fra ideell geometri. Proporsjonene i tegningene er korrekte. For mer detaljerte mål, se maskintegningene i Appendix.



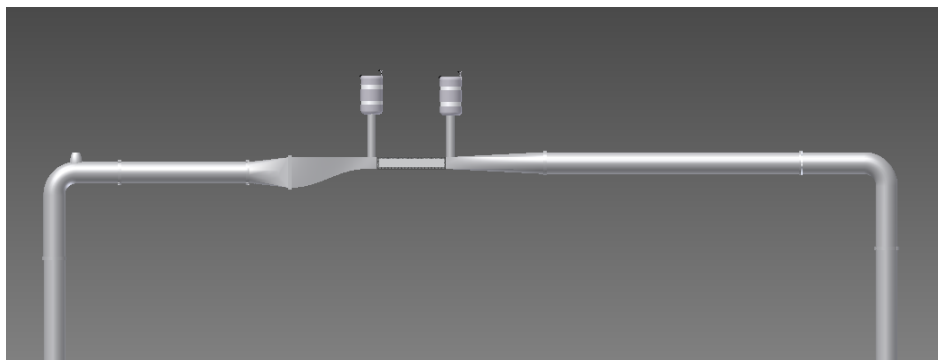
Figur 5.0.1: Full tegning av riggen i 3D ved ideell geometri.



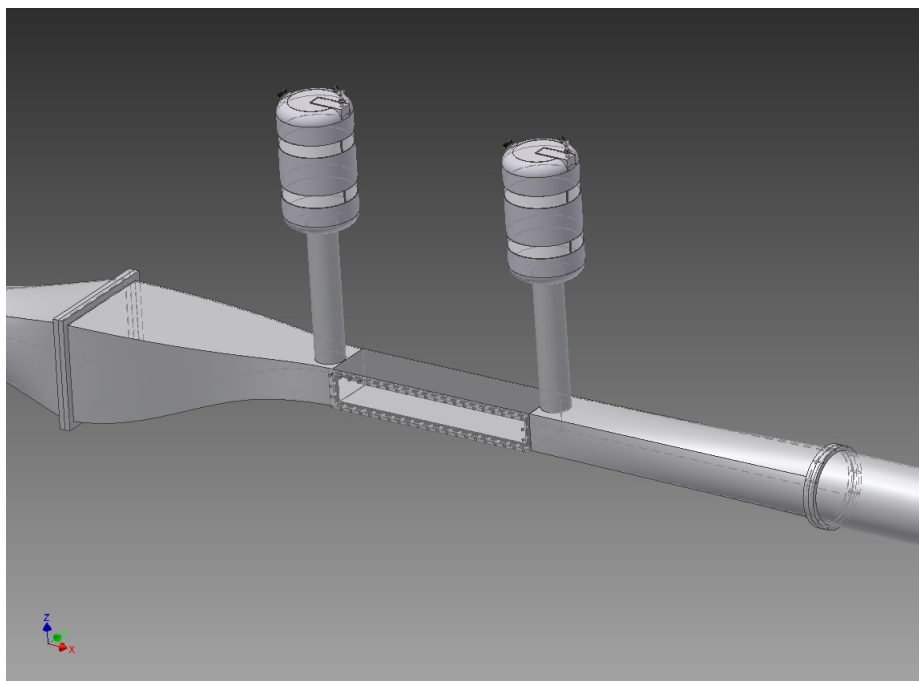


Figur 5.0.2: Full tegning av riggen i 3D tilpasset Vannkraftlaben

Under følger to bilder av riggen. De viser øvre del av rørsløyfen.



Figur 5.0.3: Øvre del av rørsløyfe



Figur 5.0.4: U-rørsoppsett og testseksjon.

# Kapittel 6

## Instrumentering

### 6.1 Nødvendig instrumentering

Det er viktig å ha kontroll over trykk og hastigheter, så det trengs trykksensorer både før og etter testseksjonen. I tillegg trengs et flowmeter for å måle volumstrøm. Annet utstyr som ventiler, oksygenmåler og høyhastighetskamera er også beskrevet. I tillegg til selve testobjekt trengs også et oppheng til testobjektet samt utstyr som kan måle lift og drag. En mekanisk vippe for å sette igang u-rørssvingningene er også nødvendig. Under følger en kort oversikt over instrumenteringen i kavitasjonsriggen. En Particle Image Velocimeter (PIV) er ikke nødvendig, men svært ønskelig å ha med. Den blir diskutert her da den bidrar til å gjøre riggen mer komplett.

#### 6.1.1 Testobjekt og oppsett i testseksjonen

Testobjektene er små vingeprofiler. NACA 0015 er et eksempel et profil som kunne vært tenkt å forskes på. For at profilet skal festes best mulig i testseksjonen tenkes det å konstruere et oppheng der en aksling tvers gjennom testseksjonen blir brukt for å holde testobjektet på plass. Det er ønskelig å holde testobjektet i korrekt posisjon uten å forstyrre strømmingen unødvendig, og dette synes å være den beste løsningen. For å bestemme angrepsvinkel på profilet er det mulig å vri på akselen manuelt. Det vil være festet en gradskive på akselen slik at man har kontroll på angrepsvinkelen.

#### 6.1.2 Mekanisk vippe

I enden av testseksjonen vil det være montert en mekanisk vippe. Denne skal sette igang u-rørssvingningene. Utforming og installasjon av denne er ennå ikke utformet.

### 6.1.3 Hull til måleutstyr

Det kan være en idé å lage en del flere hull til måleutstyr i testseksjonen enn først planlagt. Dersom det ved et senere tidspunkt blir aktuelt å kjøre andre tester der det trengs flere målinger, vil det ikke være noe problem.

### 6.1.4 Flowmeter

For å holde kontroll på volumstrøm, vil et flowmeter være installert i langs et av de lange rørstrekene. Fortrinnsvis på et av rørene opp eller ned langs med kortveggen. Der er rørstrekene lange nok til å få i størrelsesorden 10 diametre i rørlengde både før og etter flowmeteret. Flowmeteret Optiflux 2000 med forsterker IFC 300 W er valgt.

### 6.1.5 Ventiler

Det trengs tre ventiler i riggen. En ventil ved pumpen samt to oppe ved testseksjonen, en på hver side. Da det er essensielt med en uforstyrret strømning ved testseksjonen er sluseventiler valgt. Disse er dyrere, men helt nødvendige. En sluseventil er også valgt ved akkumulatoren. Disse blir, i likhet med pumpe og motor, levert av KSB.

### 6.1.6 Trykksensorer

Trykket både før og etter testobjektet skal måles. Til dette trengs to trykksensorer (PTX-transmittere), slanger og sveisemuffer.

### 6.1.7 Måling av oksygeninnhold

Med en oskygenmåler måles oksygeninnholdet i vannet. Når det kaviterer øker oksygeninnholdet. Oksygen som før var løst opp i vannet, frigjøres ved fordamping. Mengden oksygen vil spille inn på hvor fort det vil kavitere. Det er derfor viktig å vite hvor mye oksygen det er i vannet til enhver tid.

Oksygenmåleren valgt her er fra WTW, og leveres av Christian Berner AS. Modell: TriOxmatic 700 IQ.

### 6.1.8 PIV

En PIV brukes for å måle hastighetsfeltet til en strømning. Strømningen blir tilsatt sporingspartikler. Antatt at disse sporingspartiklene følger strømningen trofast, vil PIV'en kunne gi et bilde av strømningsbildet til enhver tid.

Et typisk PIV-oppsett består av kamera (moderne digitalkamera med CCD-chip system), en strobe eller laser med optisk løsning slik at det opplyste område blir begrenset, synkroniseringsenhet som fungerer som en ekstern trigger for kontroll av laster og kamera, sporingspartikler og selve fluidet som skal undersøkes. PIV software brukes til post-prosessering av bildene.

### **6.1.9 Høyhastighetskamera**

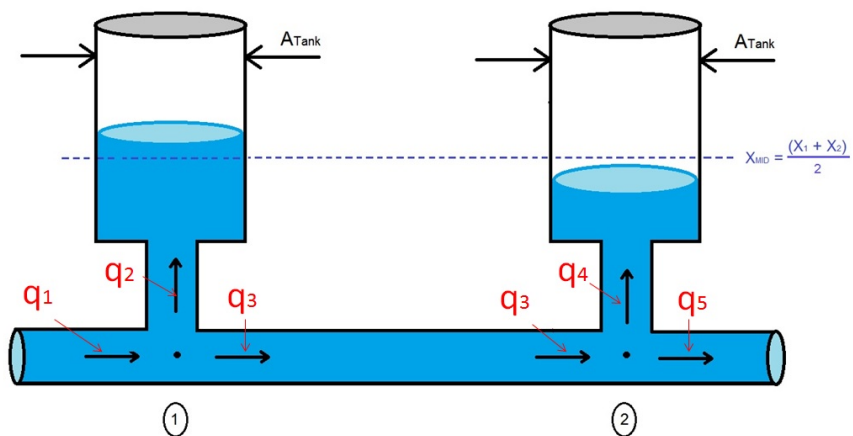
Ved hjelp av et høyhastighetskamera vil det være mulig å visuelt oppdage kavitasjon. Det er allerede et høyhastighetskamera ved Vannkraftlaben som kan brukes.



# Kapittel 7

## Dynamikk i vannveien

For å regne på dynamikken i systemet kan vi sette opp likninger for kontinuitet for u-røret slik som det ble gjort i kapitlet "Teori" på side 6. Under er et bilde av knutepunkt 1 og 2 der volumstrømmen inn er lik volumstrømmene ut.



Figur 7.0.1: Knutepunkt 1 og 2 og volumstrømmer  $q_1 - q_5$ .

$$\begin{aligned} q_1 &= q_2 + q_3 \\ q_3 &= q_4 + q_5 \end{aligned} \tag{7.0.1}$$

Da det er to tanker i enden av u-røret, vil det være luftputekammer i stedet for åpne svingesjakter. Luftputa fungerer i prinsippet som en åpen svingesjakt. Forskjellen er imidlertid at istedet for atmosfæretrykk over vannivået har vi i luftputa et volumavhengig trykk. Fjæra i systemet blir derfor stivere og ulinear. I stedet for atmosfæretrykk over vannivået i de to veiene opp, vil det være et volumavhengig trykk i luftputa. Dersom trykket regnes å ha et adiabatisk forløp kan likningen stilles opp:

$$p_p V^\kappa = p_{p0} V_0^\kappa \tag{7.0.2}$$

hvor:

$p_p$  - varierende trykk i luftputa (absoluttrykk)

$p_{p0}$  - initielt trykk i luftputa

$V_0$  - initiell luftmengde

$V$  - luftmengde

$\kappa$  - adiabatisk eksponent

Luftputa kan erstattes av en sjakt med et ekvivalent tverrsnitt gitt av:

$$A_{eq} = \left( \frac{1}{\frac{1}{A_l} + \frac{\kappa h_{p0}}{V_0}} \right) \approx \left( \frac{1}{\frac{\kappa h_{p0}}{V_0}} \right) \tag{7.0.3}$$

$A_l$  - arealet på vannspeilet i luftputa. Da leddet  $\frac{1}{A_l}$  er så lite i forhold til  $\frac{\kappa h_{p0}}{V_0}$ , neglisjeres det.

Frekvensen for u-tube-oscillasjonen blir derfor:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{2A_{eq} \sum \left(\frac{L}{A}\right)}} \tag{7.0.4}$$

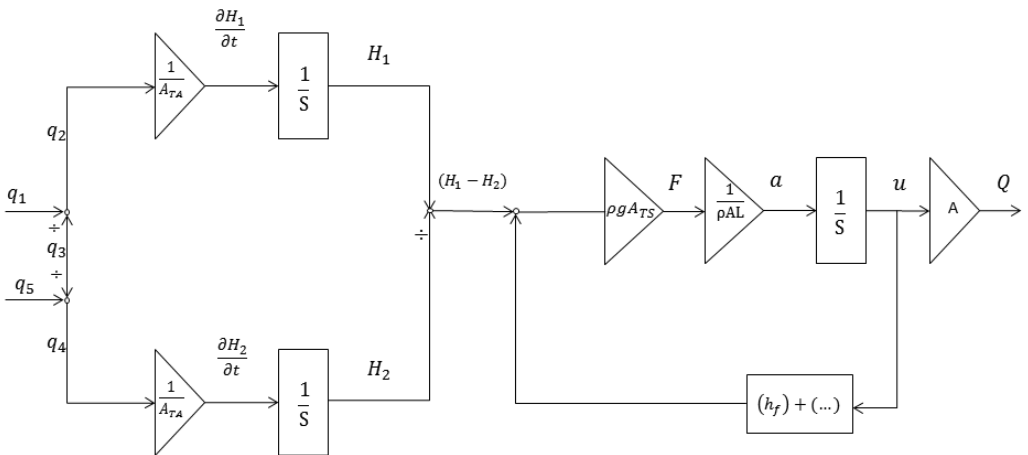
Uttrykket for kraftbalansen blir:



$$\begin{aligned}
 F &= ma \\
 \rho g (H_1 - H_2) 2A_{eq} &= \rho (L A_{TS}) \frac{dV}{dt} + h_f + h_{to} \\
 g (H_1 - H_2) 2A_{eq} &= L A_{TS} \frac{1}{A_{TS}} \frac{dQ}{dt} + h_f + h_{to} \\
 \Delta H &= \frac{L}{2gA_{eq}} \frac{dQ}{dt} + h_f + h_{to}
 \end{aligned}
 \tag{7.0.5}$$

der  $\rho$  er massetettheten til vann,  $g$  er tyngdens akselerasjon,  $H$  er trykkhøyden,  $A_{eq}$  er arealet av på vannspeilet i luftputa,  $A_{TS}$  er arealet av testseksjonen,  $L$  er lengden til testseksjonen,  $h_f$  er friksjonstap, mens  $h_{t.o.}$  er friksjon grunnet testobjektet.

I kombinasjon med kraftbalansen får vi et likningssett som kan representeres ved et blokkdiagram (se under):



Figur 7.0.2: Blokkdiagram av dynamikken i u-røret

Likningssystemet kan reduseres ytterligere, og vil kunne løses i for eksempel Excel. Modellen for utregning av svingefrekvenser ved forskjellig trykk og areal er påbegynt, men ble ikke ferdig og er satt til videre arbeid.



# Kapittel 8

## Prisoverslag

Prisene er hentet inn fra forskjellige leverandører der det er tilgjengelig. Det fremgår tydelig hvilke leverandører som er blitt brukt til prisinnhenting. Alle andre priser er anslått av teknikere som jobber på Vannkraftlaben, og vil derfor kun være omtrentlige priser.

### 8.1 Rør, bend og løsflenser

K. Lund: K.Lund AS og Smith Stål 50 000,- NOK

Artikkelnr	Beskrivelse	Enhetspris	Kvantum	Pris
SN52	256x3mm rør,304	615.00	24.00 m	14 760.0
SN52	256x3mm bend,304	1 680.00	4.00 stk	6 720.00
1927261	DN250/256, Sveisekrage 316L	521.00	28.00 stk	5 835.20
1836416	DN250/256, Løsflens PN10	703.00	28.00 stk	8 857.80
Pris				36 173.00
MVA				9 043.25
<b>Rør mm.</b>				<b>45 216.25</b>

Tabell 8.1.1: Prisliste rør, bend og løsflenser

## 8.2 Akkumulator

Antatt pris: omtrent 1 500,- NOK

<b>Akkumulator</b>	<b>1 500.00</b>
--------------------	-----------------

## 8.3 Svingetanker

Antatt pris: omtrent 3 000,- NOK per tank

<b>Svingetanker</b>	<b>6 000.00</b>
---------------------	-----------------

## 8.4 Testseksjon

Gitt at testseksjonen kan produseres lokalt på huset vil antatt pris være: 20 000,- NOK i materialkostnader. Arbeidstimer vil komme i tillegg.

<b>Testseksjon</b>	<b>20 000.00</b>
--------------------	------------------

## 8.5 Instrumentering

WTW Oksygenføler for vann (digital). Modell TriOxmatic 700 IQ. Størrelsesorden 20 000,- NOK

PIV: størrelsesorden 800 000,- NOK

PC til riggen: størrelsesorden 8 000,- NOK

Trykksensorer + installering (PTX-transmittere, rør/slanger og sveisemuffer): størrelsesorden 30 000,- NOK

Flowmeter og forsterker fra Krohne. Optiflux 2000 Forsterker IFC 300W: 39 000,- NOK

<b>Instrumentering</b>	<b>898 000.00</b>
------------------------	-------------------

## 8.6 Pumpe, motor og frekvensomformer

KSB Lindflaten AS kom med tilbud på pumpe, motor og frekvensomformer.

<b>Pumpe, motor og frekvensomformer</b>	<b>985 000.00</b>
---	-------------------

## 8.7 Stativ til riggen

Stativ til riggen vil ligge i størrelsesorden: 20 000,- NOK

<b>Stativ til rigg</b>	<b>20 000.00</b>
------------------------	------------------

## 8.8 Ventiler

KSB Lindflaten AS kunne tilby sluseventiler til 2998,- NOK stykk.

<b>Ventiler</b>	<b>8994.00</b>
-----------------	----------------

## 8.9 Annet

Det vil påregnes en sum til småting slik som skruer og muttere o.l.

<b>Annet</b>	<b>3 000.00</b>
--------------	-----------------

## 8.10 Totalt

<b>Totalpris på rigg (uten sikkerhetsfaktor)</b>	<b>1 986 710.00</b>
--	---------------------

<b>Totalpris på rigg (med sikkerhetsfaktor 1,2)</b>	<b>2 384 052.00</b>
---	---------------------



# Kapittel 9

## Resultater

### 9.1 Frittstående rigg eller kobling til eksisterende anlegg

Frittstående rigg er valgt til fordel for en rigg som kobles på Francis-riggen. Dette fordi kjøringen vil være uavhengig av når Francis-riggen kjøres, og en vil få komponenter som er bedre tilpasset riggen.

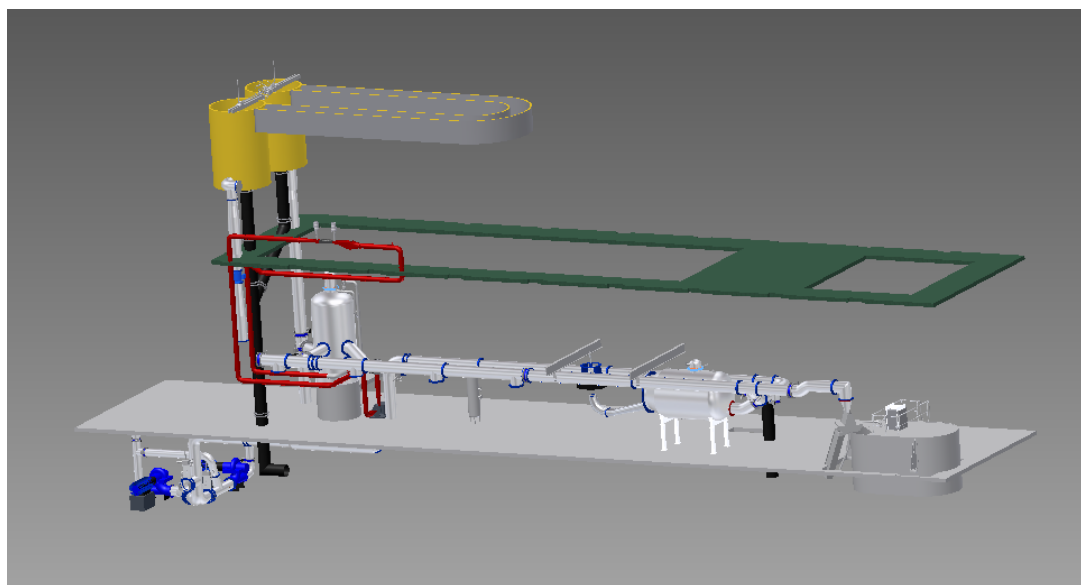
### 9.2 Plassering av kavitasjonsriggen i laben

To alternativer til plassering av riggen er funnet. Alternativ én er langs østveggen parallelt med Francisriggen. Utforming av riggen blir da meget nær optimal geometri, som vist i kapittel 5.

Alternativ to er å plassere pumpe og motor foran trykktanken til Francis-riggen. Derfra vil rørene legges bort til kortveggen av bygget, og opp til galleriet i 3. etasje. Øvre del av riggen vil være lik ideell geometri. Helhetlig vil utforming av riggen ved dette alternativet avvike noe mer fra ideell geometri enn ved alternativ én.

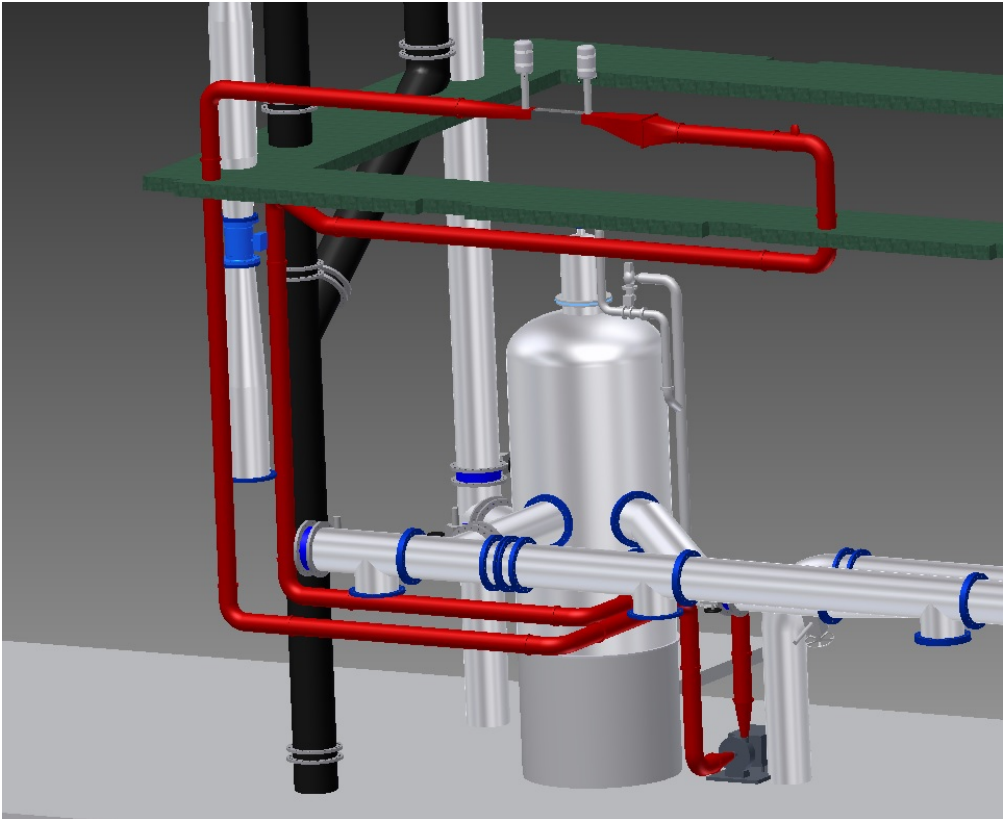
### 9.3 3D-tegninger av kavitasjonsriggen

Under følger to 3D-tegninger av riggen ved alternativ to, tegnet inn og vist i forhold til Francis-riggen ved Vannkraftlaben. Kavitasjonsriggen er illustrert i rødt. Pumpe og motor er plassert i 1. etasje i laben, og riggen strekker seg opp på galleriet (i 3. etasje).



Figur 9.3.1: 3D-tegning av kavitasjonsrigg plassert i Vannkraftlaben





Figur 9.3.2: 3D-tegning av kavitasjonsrigg plassert i Vannkraftlaben

## 9.4 Spesifikasjoner for kavitasjonsriggen

Kavitasjonsriggen vil være 10 meter lang, og testseksjonens senter ligger 9,8 meter over pumpen. Pumpen er fra KSB Lindflaten AS og har en head på 12 m og en effekt på 58,16 kW.

Testseksjonen har dimensjonene 180 x 130 x 800 mm. Maksimal hastighet gjennom testseksjonen er 18 m/s, noe som tilsvarer en volumstrøm på 0,42 l/s.

Riggen vil bestå av 35 meter rør i tillegg til 13 bend, der to av de vil være kaskadebend, ett før testseksjonen og ett før pumpen. Riggen vil også være utstyrt med en testseksjon, svingetanker, akkumulator, pumpe og motor montert på skidd, samt frekvensomformer.

Rørene har en indre diameter på 250 mm, og en rørtykkelse på 3 mm. De fleste komponentene til riggen bestilles fra diverse leverandører, og noen må lages selv, enten lokalt eller hos andre som kan utføre jobben. Komponentene dette gjelder vil være: kaskadebendene, overgang fra sirkulært til rektangulært tverrsnitt, dyse inn på testseksjonen og diffusor etter testseksjonen.

Riggen skal kunne kjøres mellom 0,4 og 6 bar.

## 9.5 Instrumentering

For å gjøre måling i forbindelse med forsøk der modulert kavitasjon skal studeres foreslås: en PC med passende post-prosesseringsverktøy, et flowmeter, en PIV, trykksensorer, oksygenmåler og et høyhastighetskamera.

## 9.6 Prisoverslag

Komponentene i riggen er priset som følger:

<b>Komponent</b>	<b>Pris (NOK)</b>
Rør mm.	45 216,-
Akkumulator	1 500,-
Svingetanker	6 000,-
Testseksjon	20 000,-
Instrumentering	898 000,-
Pumpe, motor mm.	985 000,-
Stativ til riggen	20 000,-
Ventiler	8 994,-
Annet	3 000,-
Sikkerhetsfaktor	397 342,-
<b>Totalt</b>	<b>2 384 052,-</b>

Tabell 9.6.1: Komponentvis prisoverslag



# Kapittel 10

## Diskusjon

### 10.1 Tilpassing av rigg ved plassering i Vannkraftlaben

Forskjellige plasseringer ble vurdert før en endelig beslutning ble tatt. Utfordringene innebærer blant annet å ikke hindre fremtidige utvidelser av laben, samt rene plassproblemer.

Ved alternativ en må rørene (rør 4 og 11) bygges om slik at de går på utsiden av traverskrana, mellom kran og vegg. Til det må tverrsnittet på rørene gå fra sirkulært til rektangulært. Dette fordi det er så liten plass mellom kran og vegg. Fra traverskrana går rørene videre opp til galleriet der testseksjonen vil stå. Dette er et godt alternativ så lenge det er nok plass til pumpe og motor nede i 1. etasje, fordi det kreves lite ombygging i forhold til ideell geometri. Forutsatt at det også er plass å legge rørene mellom veggen og traverskrana. Dersom rømningsveier blir blokkert av pumpe og motor, vil dette ikke lenger være et alternativ.

Ved alternativ to plasseres pumpe og motor foran trykktanken til Francis-riggen. Her vil ikke pumpe og motor komme i konflikt med rømningsveien. Traverskranen stopper noen meter fra kortveggen, og vil ikke være begrensende med tanke på legging av rør opp til galleriet. Dette alternativet innebærer mer ombygging enn i det første alternativet da rørene må legges annerledes opp til galleriet enn ved ideell geometri. For nærmere forklaring se bilde 4.6.7 i kapittel 4

### 10.2 Instrumentering

For å undersøke kavitasjon vil det være essensielt å ha kontroll over trykk og volumstrøm. Trykksensorer og flowmeter er derfor høyst nødvendig utstyr i en

slik rigg. Kvaliteten på resultatene blir mye mer nøyaktige om en PIV er blitt brukt, i stedet for et flowmeter. PIVen vil kunne gjengi et mer nøyaktig bilde av hastighetsfeltet til strømmingen, og vil være kritisk for hvor god forskningen blir ved en slik rigg. En PIV er derfor tatt med i utregningen av pris for en slik rigg. Det kan være en fordel å ha et flowmeter, da ikke alle typer forsøk krever en PIV. Et høyhastighetskamera anses heller ikke som absolutt nødvendig, men av samme årsaker kan være greit å ha ved en topp moderne rigg. Vannkraftlaben har et høyhastighetskamera tilgjengelig, så dette er ikke medregnet i total pris på riggen. Måling av oksygeninnhold er viktig da dette spiller inn på hvordan kavitasjonsforløpet. En oksygenmåler anses derfor som nødvendig i riggen. En PC til å styre rigg og annet utstyr er også høyst nødvendig.

### 10.3 Frittstående rigg eller kobling til eksisterende anlegg

Dersom riggen kobles til eksisterende anlegg vil den bli en del billigere. Midler blir spart da en slipper å kjøpe pumpe. Noen rørstrekker vil også være i Francis-riggen, slik at materialkostnader for rør blir noe mindre.

Dersom en frittstående rigg velges, vil en slippe å ta hensyn til kjøring av Francis-riggen. Riggen vil dermed kunne kjøres uavhengig av andre tester som måtte pågå i laben. Pumpekostnader og en litt høyere kostnad for rør vil oppstå, på den annen side vil en pumpe bedre egnet til kjøring i kavitasjonsriggen velges. Valg av plassering i laben blir også noe friere.

## 10.4 Diskusjon av resultatene

Det vil alltid være mulig å prosjektere både en billigere og en dyrere versjon av riggen, alt ettersom hvilke instrumenter som anses nødvendig. Forskningsmessig vil instrumenteringen kunne utgjøre forskjeller, så instrumentene medregnet i prisen her er nøye utvalgt.

Prisen vil være noe usikker da ikke alle komponenter er priset fra leverandører. Usikkerheten vil ligge på noen tusen kroner, så summen gitt i resultatet gjenspeiler et temmelig riktig bilde.

Utforming av riggen i forhold til ideell geometri vil avvike noe, men strømningsforholdene inn på testseksjonen er bevart, og endringer i geometrien er kun av plassmessige hensyn.

For begge alternativene gjelder også plassproblemer på galleriet i forhold til svingetankene. Høyden under taket oppe på galleriet er 1,80 meter, så for å få plass til svingetankene må det lages plass til disse gjennom taket på galleriet. Det lar seg fint gjøre, da det er trelemmer noen steder i taket man kan gå opp gjennom. Det må også rives noen hyller som står på galleriet.

Det vil i begge alternativer være plass til flowmeter i rørstrekket som ligger før testseksjonen (horisontalt under testseksjonen).

Riggen vil primært hente vann fra sumpen i kjelleren (rett under pumpen), og det vil også være mulighet for å etterfylle med kommunalt vann fra en kran langs veggen noen meter lengre borte. Kranen brukes allerede for å etterfylle sugerøret i Francis-riggen, og ved å installere et T-bend på kranen vil man kunne lage et opplegg for at kavitajonsriggen også skal få etterfylt vann fra samme kran.

Det må også være mulighet for å koble riggen til veietanken i andre enden av laben. Dette for at flowmeteret skal kunne kalibreres. Fysisk løsning av dette er satt til videre arbeider.





# Kapittel 11

## Konklusjon

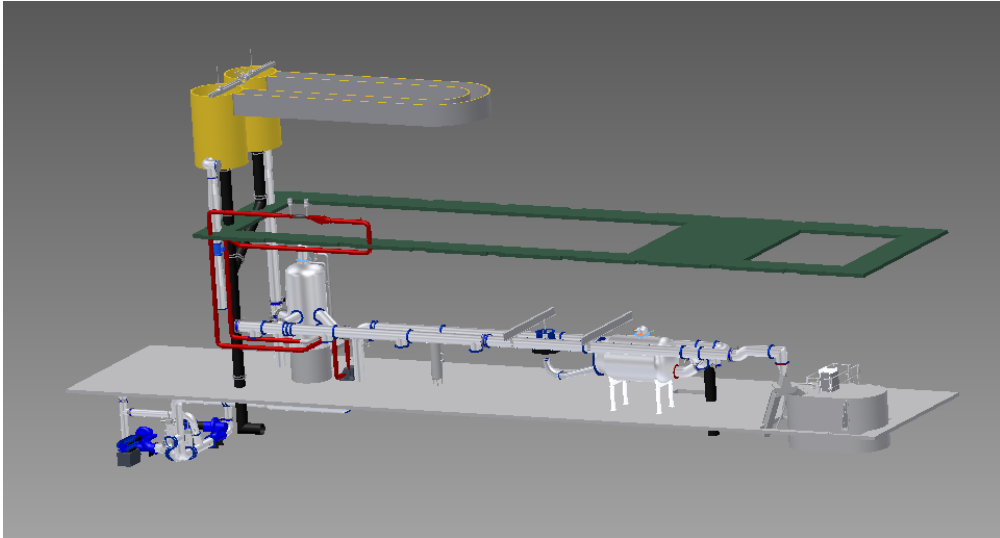
### 11.1 Konklusjon

Ettersom pumpen og motoren montert på skidd vil ta for stor plass ved alternativ 1, er alternativ 2 det eneste gjennomførbare.

Utforming av riggen i Vannkraftlaben avviker derfor fra ideell design grunnet punktene nevnt ovenfor. Det er dog beholdt en fin og jevn strømming gjennom testseksjonen, det er kun av plassmessige hensyn designet ser annerledes ut.

Kavitasjonsriggen er 10 meter lang, og senteret i testseksjonen ligger 9,8 meter over pumpen. Testseksjonen har dimensjonene 180 x 130 x 800 mm. Maksimal hastighet gjennom testseksjonen er 18 m/s, noe som tilsvarer 0,4212 l/s. Trykket i riggen settes ved en akkumulator nede ved testseksjonen. Det skal også være mulig å kjøre forsøk der trykket settes i de to svingetankene når disse er i bruk. Riggen skal kunne kjøres mellom 0,4 og 6 bar.

Komplett opptegning av kavitasjonsriggen tilpasset Vannkraftlaben ligger under:



Figur 11.1.1: 3D-tegning av kavitasjonsrigg plassert i Vannkraftlaben

Følgende instrumentering er ansett å være nødvendig:

PC	- styring av rigg og utsyr
PIV	- til å finne hastighetsfeltet til strømmingen
Flowmeter	- måle volumstrømmen
Trykksensorer	- måle trykket både før og etter testobjektet
Oksygenmåler	- måle oksygeninnholdet i vannet
Høyhastighetskamera	- studere kavitasjonsforløpet

Bygget på en del forutsetninger er riggen er estimert til å koste i underkant av NOK 2 500 000.

# Kapittel 12

## Videre arbeid

Det vil fortsatt være behov for å regne på hvor stor en støtte til riggen må være. I tillegg trengs det finregning på detaljer slik som muttere og liknende.

Det vil være høyst interessant å gjennomføre CFD på dysen før testseksjonen for å verifisere formene på denne.

Tilkobling av riggen til sumpen for vanntilgang og kranen for etterfylling av vann er kun nevnt, og videre planlegging er nødvendig. Tilkobling til veietanken er ikke tegnet inn i 3D-tegningene og vil også være nødvendig for kalibrering av flowmeteret.

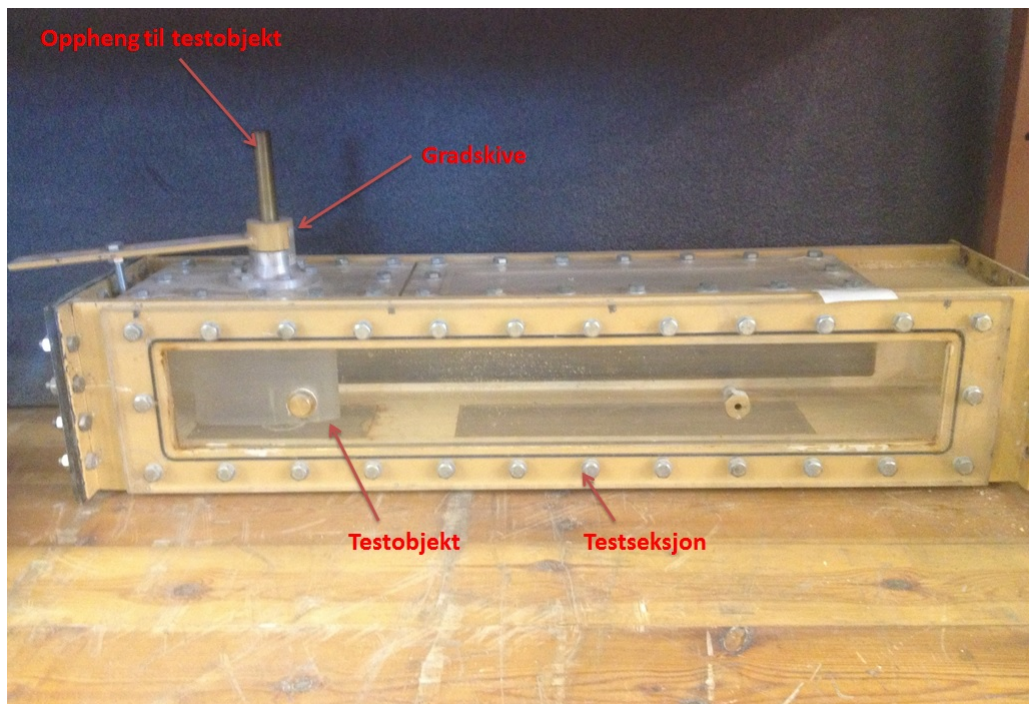
Den mekaniske vippen som setter igang u-rørssvingningene er ikke designet i oppgaven. Det må kunne styres fra kontroll PC-en slik at det er mulig å velge frekvensen den skal ”vippe” med.

Det er ennå ikke konstruert en enkel måte å skifte ut testobjektene på, men kandidaten kunne tenke seg noe å la en testseksjon som allerede finns i Vannkraftlaben, men som ikke er i bruk. Prinsippet er det samme som allerede forklart før i oppgaven, i tillegg til at det er blitt bygget et sirkulært lite vindu på hver side av testseksjonen med o-ringer og plexiglass som må skrues opp hver gang et testobjekt skal byttes. Se bilde på neste side.

Det er en aksel som går tvers gjennom testseksjonen og gjennom disse vinduene. I denne akselen festes testobjektet, og angrepsvinkel styres manuelt med denne akselen fra utsiden, der en gradskive er montert på. Utstyr til å måle lift og drag vil være montert i opphenget til testobjektet.

Vibrasjon og støy i systemet er ikke undersøkt, og bør undersøkes nærmere.

Modellen for utregning av svingefrekvensene i de lukkede svingetankene ble påbegynt, og må utvikles videre.



Figur 12.0.1: Forslag til oppheng av testobjekt, samt styring av angrepsvinkel. Strømningen vil her gå fra venstre mot høyre. I tillegg ligger testseksjonen på siden.

# Bibliografi

- [1] L. Agostino and M.V. Salvetti. *Fluid Dynamics of Cavitation and Cavitating Turbopumps*. CISM International Centre for Mechanical Sciences. Springer-Verlag Vienna, 2008.
- [2] 2013 AMC and UTASL. Cavitation research laboratory, Februar 2013.
- [3] K.Lund AS. *Industrikatalog*. K. Lund, Trondheim, 1999.
- [4] H. Brekke. *Pumper og Tubiner*. Vannkraftlaboratoriet NTNU, Norway, 2003.
- [5] EPFL. Cavitation research facility, Februar 2011.
- [6] I.E. Idelchik and O. Steinberg. *Handbook of Hydraulic Resistance*. Begell House, 3rd edition, Denver, 1996.
- [7] Norwegian Marine Technology Research Institute and SINTEF. Cavitation laboratory.
- [8] Ivaylo Nedyalkov. Design of cavitation, test section and diffuser for a high-speed water tunnel, 2012.
- [9] 2011 Regents of the University of Minnesota. Safl hifh speed water tunnel, November 2011.
- [10] 2012 Regents of the University of Minnesota. St. anthony falls laboratory - history, April 2013.
- [11] Luca Savio. Personlig kommunikasjon, marin teknikk på tyholt, Mars 2013.
- [12] J.M. Wetzel and R.E.A. Arndt. Hydrodynamic design considerations for hydroacoustic facilities: Part 1, flow quality. *Journal of luids Engineering*, 116(2), 1994.
- [13] F.M. White. *Fluid Mechanics, Sixth Edition*. McGraw-Hill, New York, 2008.

**Tillegg A**

**Datablader**

## Data sheet



Customer item no.:  
Order dated:  
Order no.:  
Quantity: 1

Number: ES 2370244  
Item no.: 100  
Date: 28/05/2013  
Page: 1 / 8

**RDLO 400-525 B GB P F**

Version no.: 1

### Operating data Point no. 1

Requested flow rate	1516.00 m <sup>3</sup> /h	Actual flow rate	1516.00 m <sup>3</sup> /h
Requested developed head	12.00 m	Actual developed head	12.00 m
Pumped medium	Water Clean water Not containing chemical and mechanical substances which affect the materials	Efficiency	85.5 %
Ambient air temperature	20.0 °C	Power absorbed	58.16 kW
Fluid temperature	20.0 °C	Pump speed of rotation	741 rpm
Fluid density	998 kg/m <sup>3</sup>	NPSH required	2.62 m
		NPSH 3%	2.12 m
		Discharge press.	1.17 bar.g
Fluid viscosity	1.00 mm <sup>2</sup> /s	Min. allow. mass flow for continuous stable operation	189.30 kg/s
Suction pressure max.	0.00 bar.g	Shutoff head	18.32 m
Mass flow rate	420.35 kg/s	Max. allow. mass flow	560.59 kg/s
Max. power on curve	58.26 kW	Design	Single system 1 x 100 %
Min. allow. flow for continuous stable operation	682.85 m <sup>3</sup> /h	Performance test	Yes

### Point no. 2

Requested flow rate	1516.00 m <sup>3</sup> /h	Actual flow rate	1593.99 m <sup>3</sup> /h
Requested developed head	10.30 m	Actual developed head	11.39 m
Ambient air temperature	20.0 °C	Efficiency	84.9 %
Fluid temperature	20.0 °C	Power absorbed	58.25 kW
Fluid density	998 kg/m <sup>3</sup>	Pump speed of rotation	741 rpm
Fluid viscosity	1.00 mm <sup>2</sup> /s	NPSH required	2.71 m
Suction pressure max.	0.00 bar.g	NPSH 3%	2.21 m
Mass flow rate	441.89 kg/s	Discharge press.	1.11 bar.g
Max. power on curve	58.26 kW	Min. allow. mass flow for continuous stable operation	189.30 kg/s
Min. allow. flow for continuous stable operation	682.85 m <sup>3</sup> /h	Max. allow. mass flow	560.59 kg/s
Shutoff head	18.32 m	Design	Single system 1 x 100 %

## Data sheet



Customer item no.:  
Order dated:  
Order no.:  
Quantity: 1

Number: ES 2370244  
Item no.: 100  
Date: 28/05/2013  
Page: 2 / 8

**RDLO 400-525 B GB P F**

Version no.: 1

### Design

Pump standard	KSB axially split volute casing pump	Impeller diameter	468.0 mm
Design	Pump and motor on common Baseframe (3E)	Minimum impeller diameter	442.0 mm
Orientation	Horizontal	Full impeller diameter	530.0 mm
Suction flange (AS) according to	EN 1092-2 / DN 500 / PN 10 21A / FF	Direction of rotation from drive	Clockwise
Discharge flange (AD) according to	EN 1092-2 / DN 400 / PN 10 21A / FF	Bearing seal driver side	V ring
Shaft seal	Gland packing	Bearing type driver side	Anti-friction bearings
Manufacturer	KSB	Lubrication type driver side	Grease
Type	RT-P	Bearing sealing end side	V ring
Sealing plan	PE Gland packing (external circulation)	Bearing type end side	Anti-friction bearings
Clean water operation: Pumped liquid with max. 50 mg/l solids.		Bearing lubrication end side	Grease
Wear ring	Casing wear ring	Temperature measurement tapping	with
Wear ring type	Standard design	Temperature sensor PT100 motor side	Without
		Vibration measurement tapping with Color	Ultramarine blue (RAL 5002) KSB-blue

### Driver, accessories

Manufacturer	Flender	Motor speed	741 rpm
Coupling type	Eupex N	Frequency	50 Hz
Nominal size	280	Operating voltage	400 V
Coupling guard type	Lightweight, not treadproof (ZN79)	Rated power P2	75.00 kW
Guard size	RDLEL400	available reserve	28.75 %
Guard material	Stainless steel 1.4301	Rated current	140.0 A
Baseplate type	Pump and motor on common baseframe (3E) – light execution	Starting current ratio	5.7
Baseplate size	RD3E05	Insulation class	F to IEC 34-1
Scope of mounting parts : Baseframe for pump set incl. foundation bolts		Motor enclosure	IP55
Features : Baseframe not suitable for pumpset transport / Without drip pan		Cos phi at 4/4 load	0.83
Delivery : Pump, Motor and baseframe separately		Temperature sensor	3 PTC resistors
Driver type	Electric motor	Terminal box position	0°/360° (top) Viewed from the drive
Drive standard	IEC	Motor winding	400 / 690 V
Model (make)	Siemens	Number of poles	8
Drive supplied by	Standard motor supplied by KSB - mounted by customer	Connection mode	Delta
Motor const. type	B3	Motor cooling method	Surface cooling
Motor size	315M	Motor material	Grey cast iron GG/CAST IRON
		Noise pressure level	57 dBa



## Data sheet



Customer item no.:  
Order dated:  
Order no.:  
Quantity: 1

Number: ES 2370244  
Item no.: 100  
Date: 28/05/2013  
Page: 3 / 8

**RDLO 400-525 B GB P F**

Version no.: 1

### Materials GB

#### Notes

general criteria for a water analysis: pH-value  $\geq 7$ ; chlorine content (Cl)  $\leq 250$  mg/kg. chlorine (Cl<sub>2</sub>)  $\leq 0.6$  mg/kg. Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)  $\leq 2$  mg/kg, free of H<sub>2</sub>S; Chlorine (Cl<sub>2</sub>)  $\leq 0.6$  mg/kg.

Volute casing (102)	Grey cast iron JL 1040
Pump shaft (211)	Chrome steel 1.4021+QT800
Double-entry impeller (234)	Tin bronze CC480K-GS

Bearing housing (350.1)	Grey cast iron JL 1040
Bearing housing (350.2)	Grey cast iron JL 1040
Shaft seal housing (441)	Grey cast iron JL 1040
Casing wear ring (502)	Tin Bronze CC493K
Shaft protecting sleeve (524.1)	GX120CRMO29-2 1.4138

### Certifications

#### Hydraulic performance test

Acceptance standard	ISO 9906 class 1B
Quantity meas. points Q-H	5
Certificate	Inspection cert. 3.1 to EN 10204
Test participation	Non-witnessed
Quantity, non-witnessed	1
Quantity, witnessed	0

#### Hydrostatic test (room temp.)

Range	Complete pump with shaft seal
Test pressure	2.33 bar.g
Test time	10.0 min
Certificate	Without
Test participation	Non-witnessed
Quantity, non-witnessed	1
Quantity, witnessed	0

#### Balancing test

Balancing grade	G 6,3
Part	Impeller
Certificate	Without
Test participation	Non-witnessed
Quantity, non-witnessed	1
Quantity, witnessed	0

#### Final visual inspection

Certificate	Without
Test participation	Non-witnessed
Quantity, non-witnessed	1
Quantity, witnessed	0

### Order documentation

The following documents will be supplied with the order:  
Technical data sheet  
Auxiliary connection plan  
Schematic drawing with allowable forces and moments  
Operating manual

Inspection reports/ certificates	
General arrangement drawing	
Performance curve	
Languages	English

# Performance curve

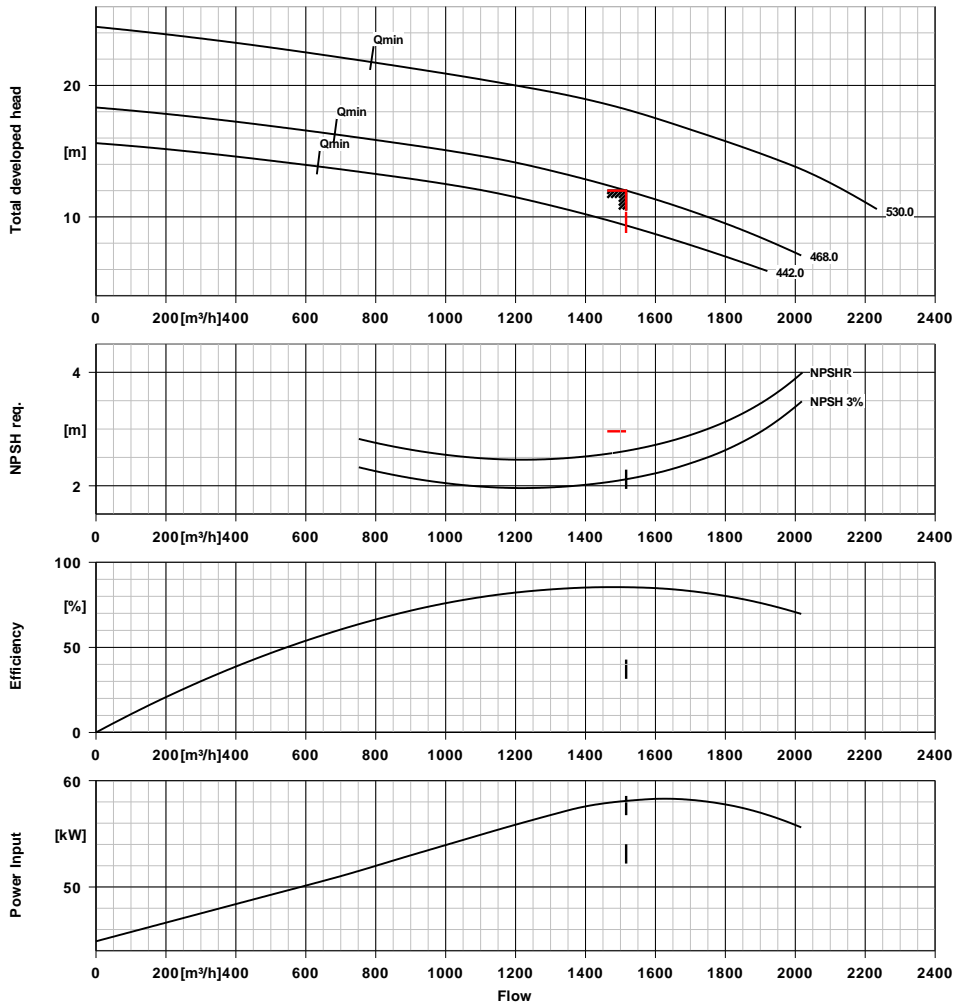


Customer item no.:  
 Order dated:  
 Order no.:  
 Quantity: 1

Number: ES 2370244  
 Item no.:100  
 Date: 28/05/2013  
 Page: 4 / 8

**RDLO 400-525 B GB P F**

Version no.: 1



## Curve data

Speed of rotation	741 rpm	Efficiency	85.5 %
Fluid density	998 kg/m <sup>3</sup>	Power absorbed	58.16 kW
Viscosity	1.00 mm <sup>2</sup> /s	NPSH required	2.62 m
Flow rate	1516.00 m <sup>3</sup> /h	NPSH 3%	2.12 m
Requested flow rate	1516.00 m <sup>3</sup> /h	Curve number	K1387.06
Total developed head	12.00 m	Effective impeller diameter	468.0 mm
Requested developed head	12.00 m	Acceptance standard	ISO 9906 class 1B

# Installation plan

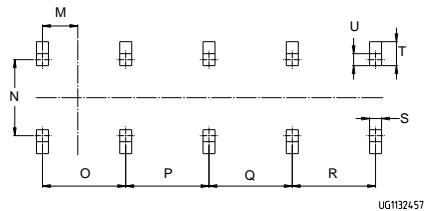
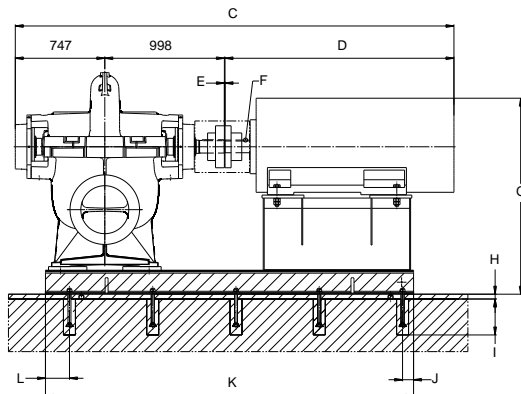
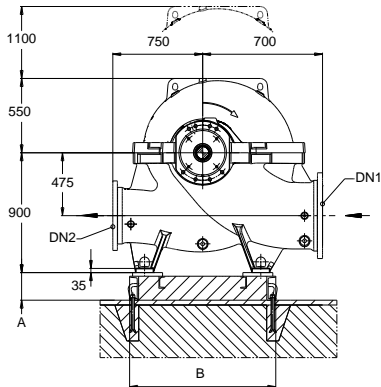


Customer item no.:  
 Order dated:  
 Order no.:  
 Quantity: 1

Number: ES 2370244  
 Item no.:100  
 Date: 28/05/2013  
 Page: 5 / 8

**RDLO 400-525 B GB P F**

Version no.: 1



*Drawing is not to scale*

*Dimensions in mm*

## Motor

Motor manufacturer	Siemens
Motor size	315M
Motor power	75.00 kW
Number of poles	8
Speed of rotation	741 rpm

## Connections

Suction flange (AS) according to	EN 1092-2 / DN 500 / PN 10
Discharge flange (AD) according to	EN 1092-2 / DN 400 / PN 10

## Baseplate

Design	Pump and motor on common baseframe (3E) – light execution RD3E05
Material	Steel ST
Leakage drain baseplate (8B)	Rp1, Without
Foundation bolts	M24x320

## Coupling

Coupling manufacturer	Flender
Coupling type	Eupex N
Coupling size	280
Spacer	0.0 mm

## Weight net

Pump	2600 kg
Baseplate	799 kg
Coupling	48 kg
Coupling guard	1 kg
Motor	745 kg
Total	4193 kg

**Connect pipes without stress or strain!**

Notes for dimensions:

**For auxiliary connections see separate drawing.**

## Installation plan



Customer item no.:  
Order dated:  
Order no.:  
Quantity: 1

Number: ES 2370244  
Item no.:100  
Date: 28/05/2013  
Page: 6 / 8

**RDLO 400-525 B GB P F**

Version no.: 1

Drawing is not to scale and only exemplary. Weights and dimensions shown are not binding. Binding arrangement drawing only on request and with submittal of binding motor dimension sheet.

Admissible tolerances for shaft height: DIN 747

Dimensions without tolerance indication: ISO 2768 CK

Dimensions without tolerance indication – Welded parts: ISO 13920 – B/F

Dimensions without tolerance indication – Cast parts: ISO 8062 – CT13 – RMA(H)

### General notes:

Piping must be connected free of stress. The pump must not be used as support for the piping (The pump is not an anchor point for the piping). The piping must be fixed in such a way that no forces, vibrations or the weight of the piping is transferred to the pump. Restrictions for forces and moments on suction and pressure nozzle must be considered. Connection by means of unrestrained expansion joints is not permitted!!

## Connection plan

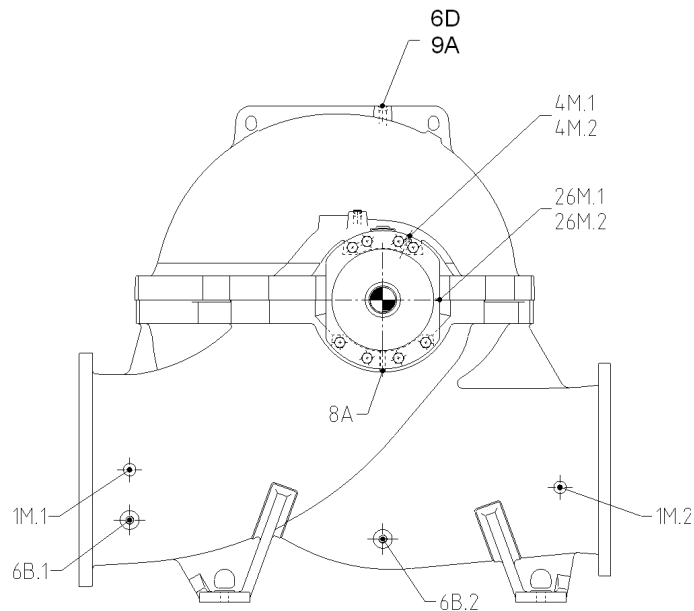


Customer item no.:  
Order dated:  
Order no.:  
Quantity: 1

Number: ES 2370244  
Item no.:100  
Date: 28/05/2013  
Page: 7 / 8

RDLO 400-525 B GB P F

Version no.: 1



### Connections

1M.1 Pressure gauge connection	G 1/2	Drilled and plugged.
1M.2 Pressure gauge connection	G 1/2	Drilled and plugged.
6B.1 Pumped liquid drain	G 1	Drilled and plugged.
6B.2 Pumped liquid drain	G 1	Drilled and plugged.
6D Pumped liquid vent	G 1	Drilled and plugged.
8A Leakage drain	G 3/4	Drilled
9A Sealing liquid outlet		Flexible pipe supplied with 'four way connector' for valve connection
26M.1 SPM sensor connection (driver side)	M 8	Drilled and plugged.
26M.2 SPM sensor connection (non-driver side)	M 8	Drilled and plugged.
4M.1 Temperature gauge connection (Suction side)	G 1/2	Drilled and plugged.
4M.2 Temperature gauge connection (Pressure side)	G 1/2	Drilled and plugged.

# Force and Moment Limits

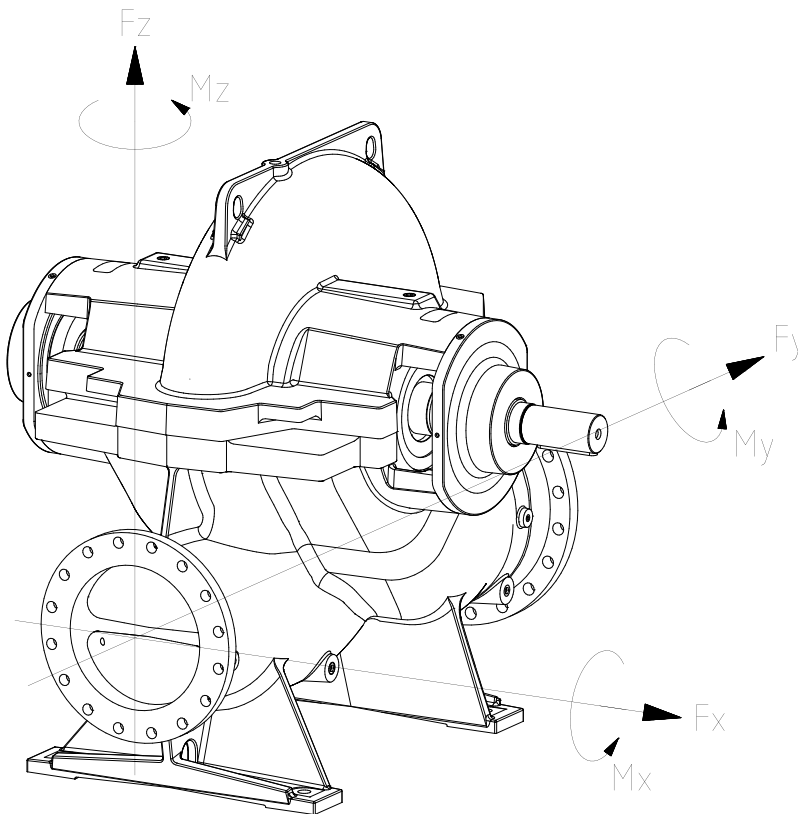


Customer item no.:  
Order dated:  
Order no.:  
Quantity: 1

Number: ES 2370244  
Item no.:100  
Date: 28/05/2013  
Page: 8 / 8

**RDLO 400-525 B GB P F**

Version no.: 1



*Drawing is not to scale*

## Force and Moment Limits

Suction flange  
 $F_x = F_y = F_z$  (suc) 6900 N  
 $M_x = M_y = M_z$  (suc) 3800 Nm  
Valid for temperature 20.0 °C

Discharge flange  
 $F_x = F_y = F_z$  (dis) 6900 N  
 $M_x = M_y = M_z$  (dis) 3800 Nm

The given force and moment limits are only applicable for static pipe loads.  
A computerized strength analysis is only available on special request.  
The values apply for installation on completely grouted baseplates bolted to a rigid, level foundation.



### Ordering data **1LE1601-3AD23-4AB4**

:

Client order no. / :  
Order no. / :  
Offer no. / :  
Remarks / :

Item no. / :  
Consignment no. / :  
Project / :

#### Electrical data / :

Rated motor voltage	(34) 400VD/690VY 50Hz, 460VD 60Hz					
Frequency	50 Hz		60 Hz			
Rated power	75,00 kW		90,00 kW			
Rated motor speed	738 1/min		888 1/min			
Rated motor torque	970,5 Nm		967,9 Nm			
Rated motor current (IE) :	VD	VY	VD			
	143,0 A	82,9 A	147,0 A			
Starting / rated motor current	5,8		5,6			
Breakdown / rated motor torque	2,6		2,4			
Starting / rated motor torque	2,2		2,1			
Efficiency class	-					
Efficiency %	4/4	3/4	2/4	4/4	3/4	2/4
	93,5	94,4	94,5	93,6	94,5	94,7
Power factor	0,81	0,77	0,68	0,82	0,79	0,71
Motor protection :	(B) 3 PTC Termistors - for Shut Down Standard					
Terminal box position :	(4) terminal box - on top					

#### Mechanical data / :

Sound pressure level 50 Hz/60Hz (load)	61.0 dB(A)	62.0 dB(A)
Moment of inertia	2,50 kg m <sup>2</sup>	
Bearing DE   NE :	6319 C3	6319 C3
Type of bearing	located bearing NDE (standard)	
Condensate drainage holes	Yes (standard)	
Regreasing device	Yes (standard)	
Lubricants	ESSO UNIREX N3	
Relubrication interval :	6000 h	40 g
External earthing terminal	Yes (standard)	
Coating	special finish in RAL 7030 stone gray (standard)	

#### Explosion protection / :

Type of protection without (Standard)

#### Environmental conditions / :

Ambient temperature	-20 °C - +40 °C
Altitude above sea level	1000 m
Standards and specifications	IEC, DIN, ISO, VDE, EN

#### General data / :

Frame size	315 M
Type of construction	(A) IM B3
Weight in kg, without optional accessories,	710.0
Frame material	cast iron
Degree of protection	IP55
Method of cooling, TEFC	IC 411
Vibration class	A (standard)
Insulation	155(F) to 130(B)
Duty type	S1
Direction of rotation	bidirectional

#### Terminal box / :

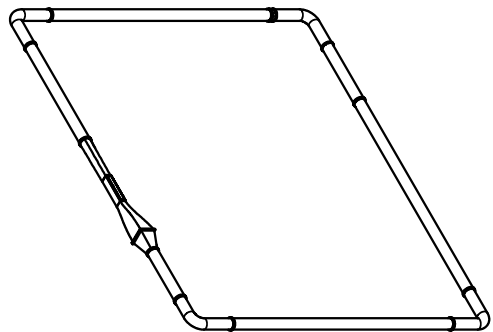
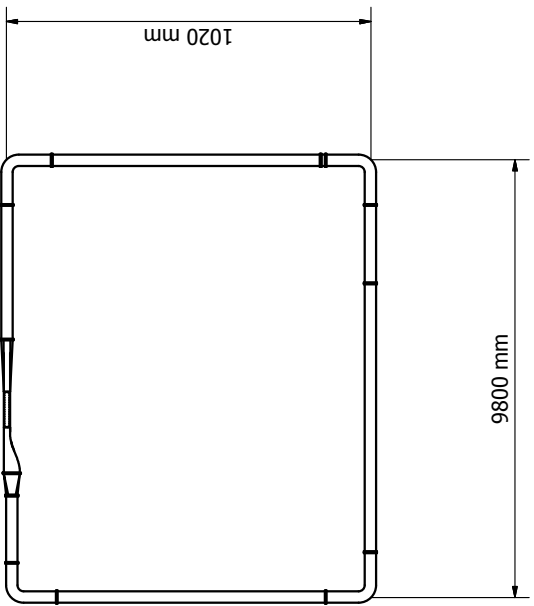
Material of terminal box	cast iron
Type	TB1 Q01
Contact screw thread	M12
Max. cross-sectional area	240.0 mm <sup>2</sup>
Cable diameter from ... to ...	38.0 mm - 45.0 mm
Cable entry	2xM63x1,5-2xM20x1,5
Cable gland	4 plugs

#### Special design / :

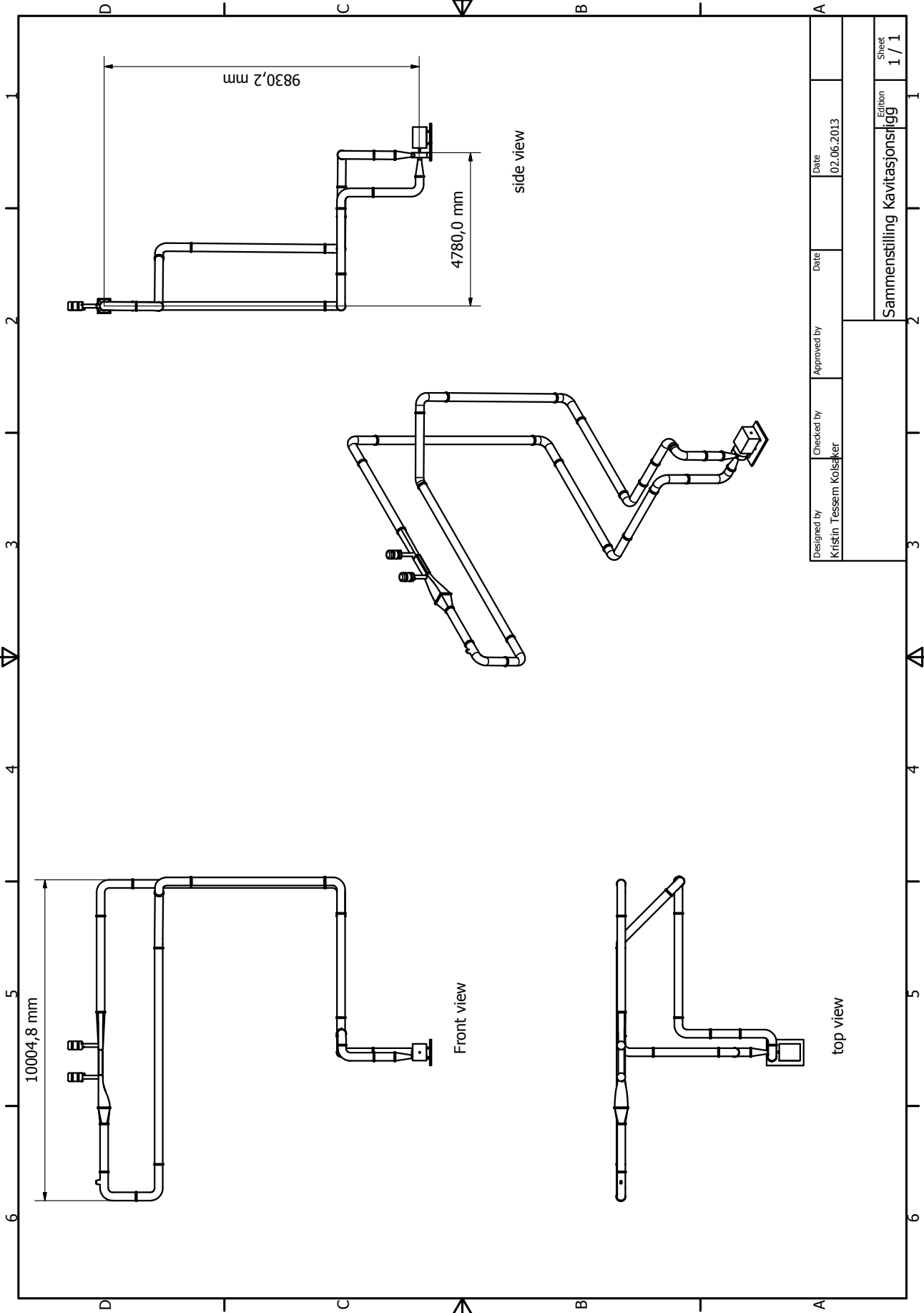
Tillegg B

Maskintegninger





Designed by Kristin Tessem Kolsaker	Checked by	Approved by	Date 02.06.2013
Kavitasjonsrigg optimal geometri			Sheet 1 / 1

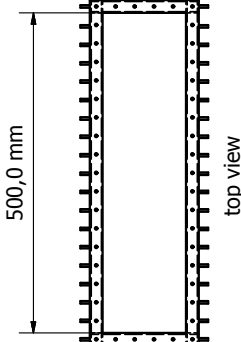


Designed by Kristin Tessem Kolsaker	Checked by	Approved by	Date 02.06.2013
Sammenstilling Kavitasjonsfigg			Edisjon 1 / 1

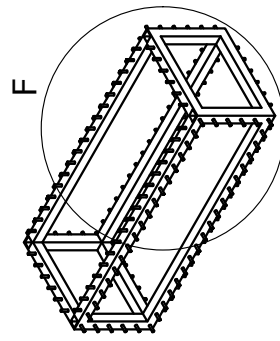
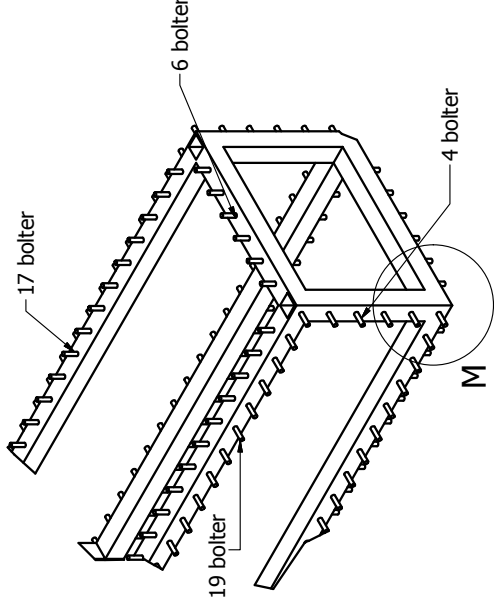
Front view

side view

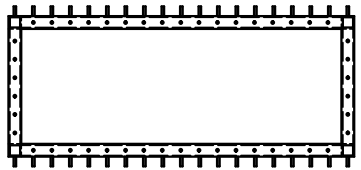
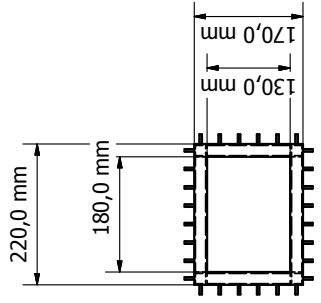
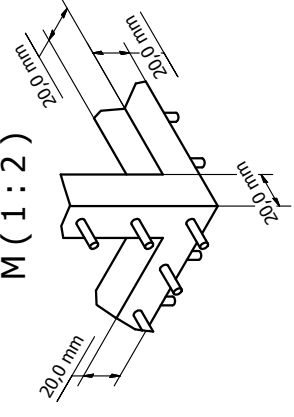
top view



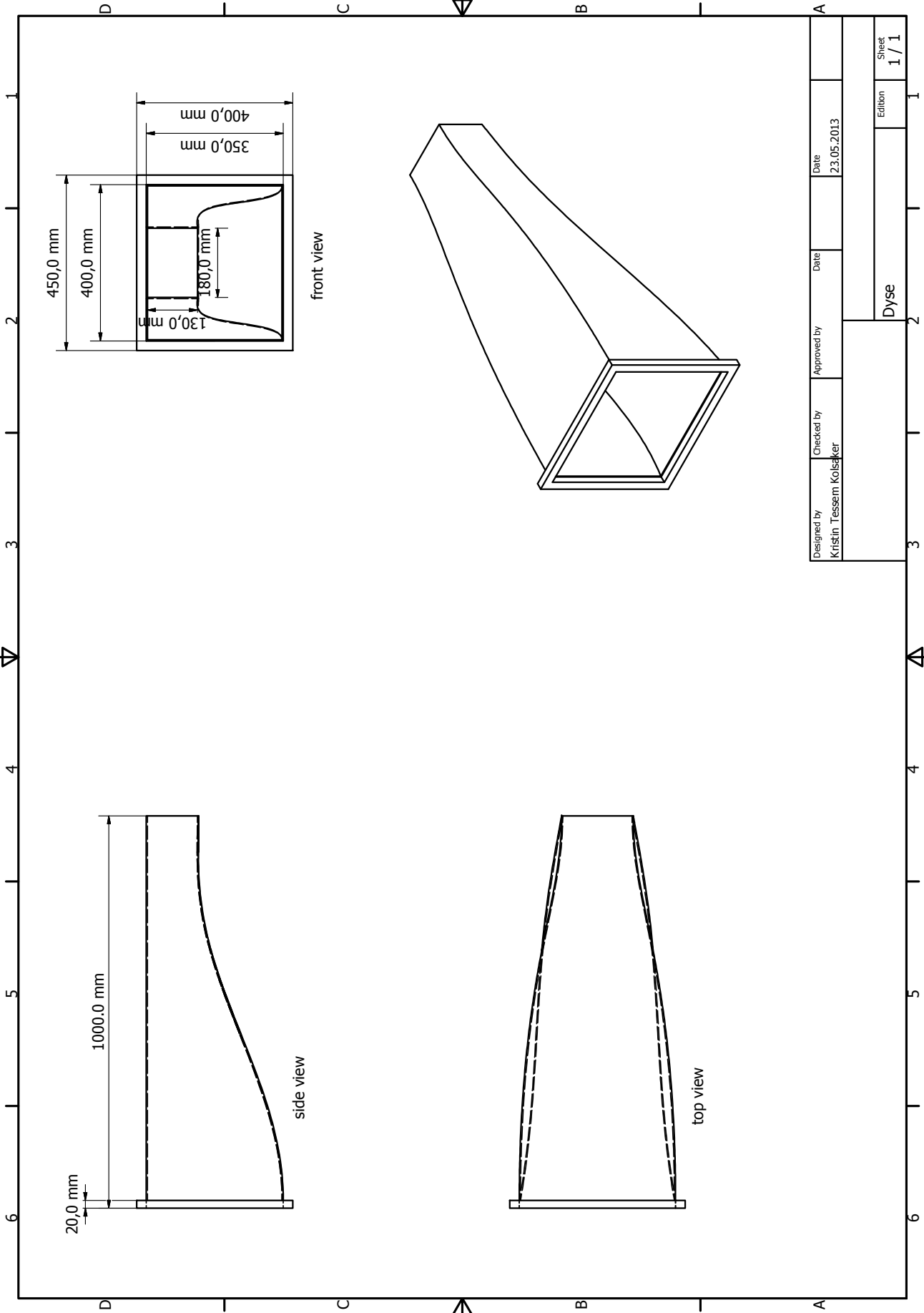
F (1 : 4)



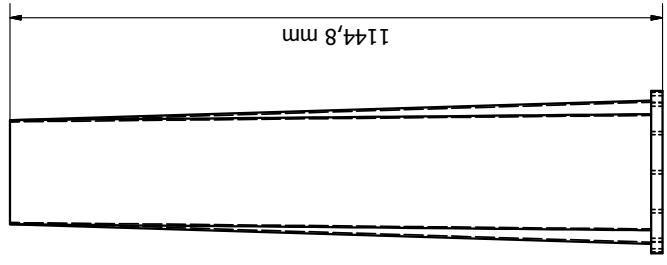
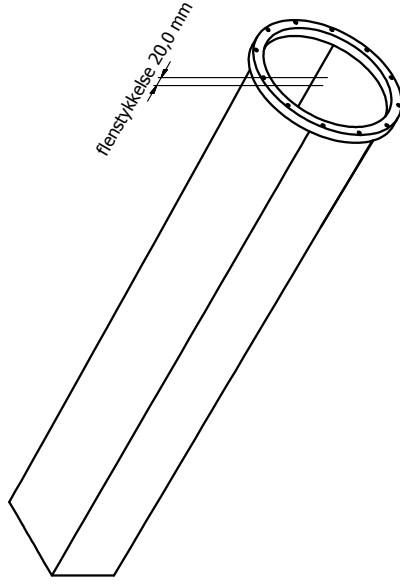
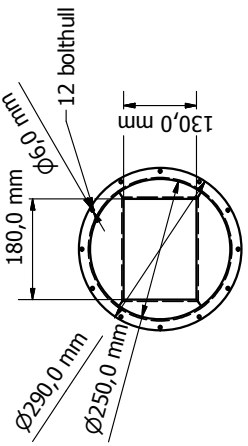
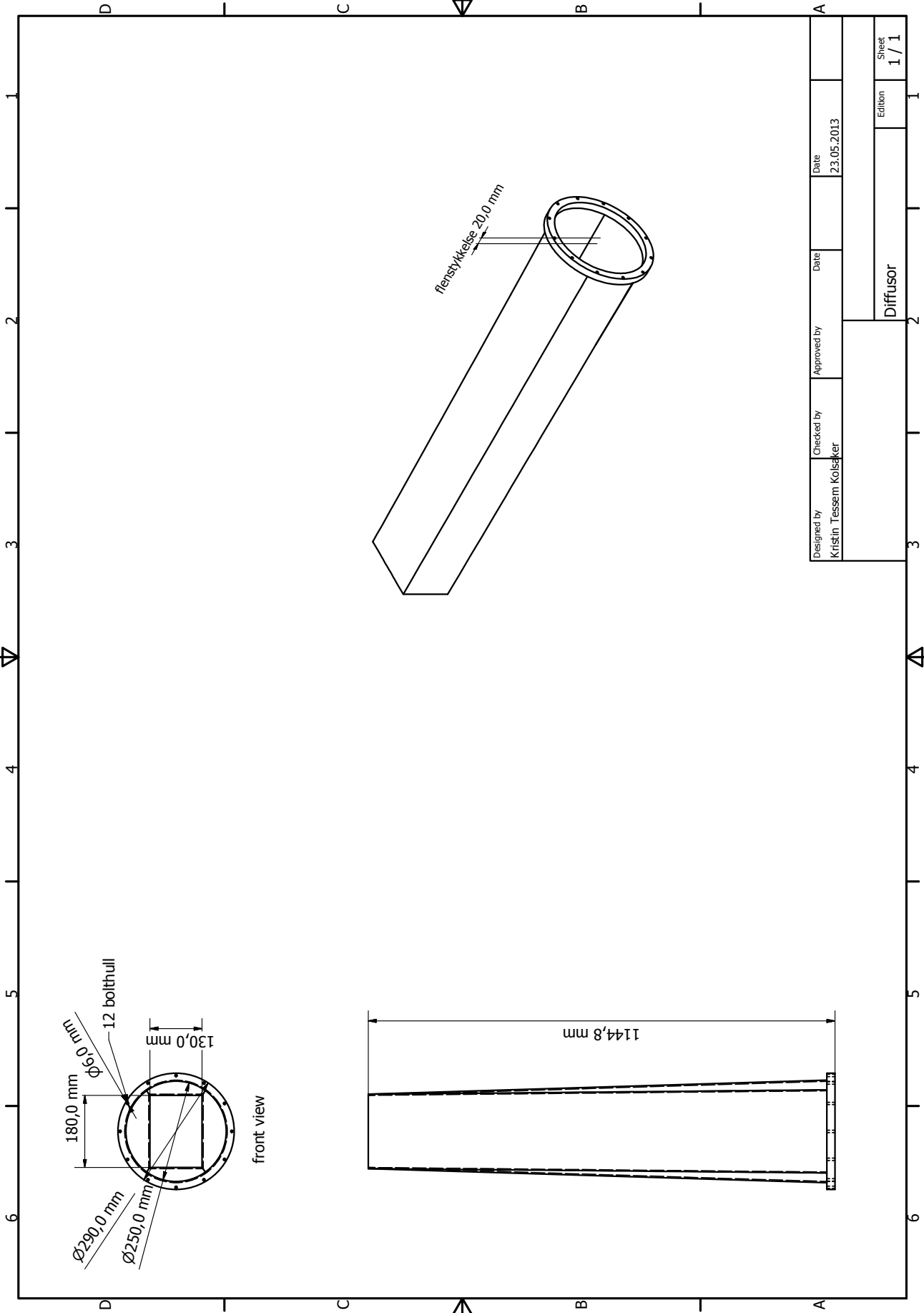
M (1 : 2)



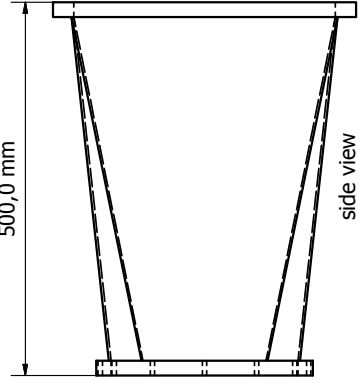
Designed by Kristin Tessem Kolsaker	Checked by	Approved by	Date 23.05.2013
nyseksjonb			Sheet 1 / 1



Designed by Kristin Tessem Kolsaker	Checked by	Approved by	Date	Date	Sheet
			23.05.2013		1 / 1
Dyse				Edition	

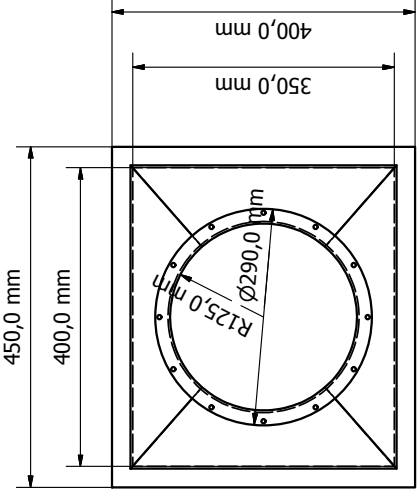


Designed by Kristin Tessem Kolsaker	Checked by	Approved by	Date 23.05.2013
Diffusor			Sheet 1 / 1



side view

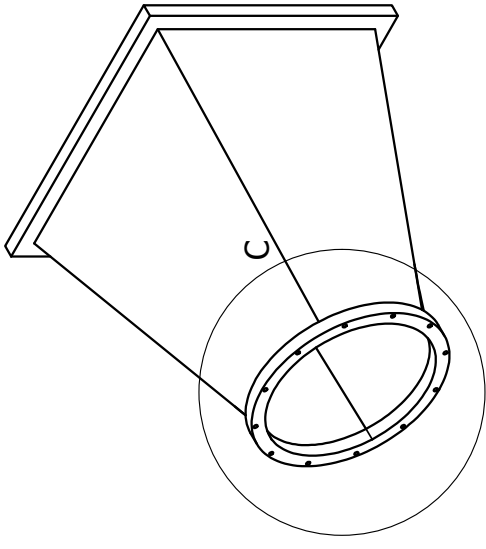
500,0 mm



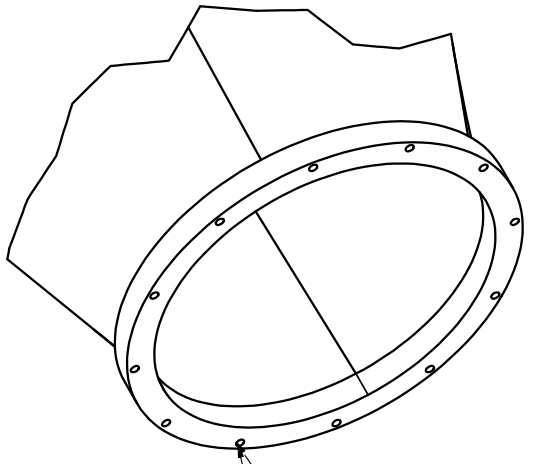
front view

400,0 mm  
350,0 mm  
400,0 mm

R125,0 mm  
Ø290,0 mm



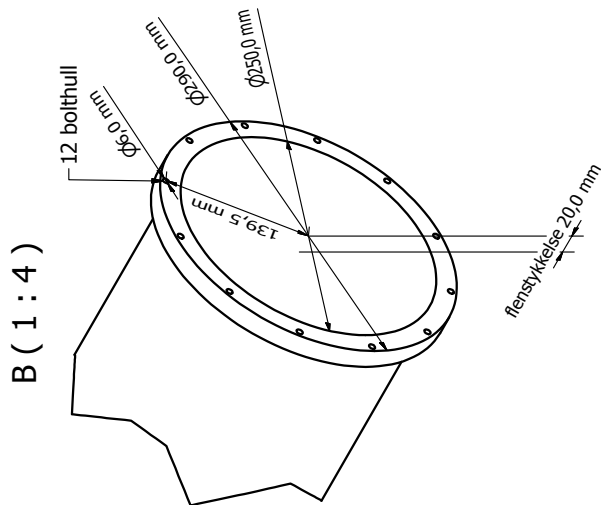
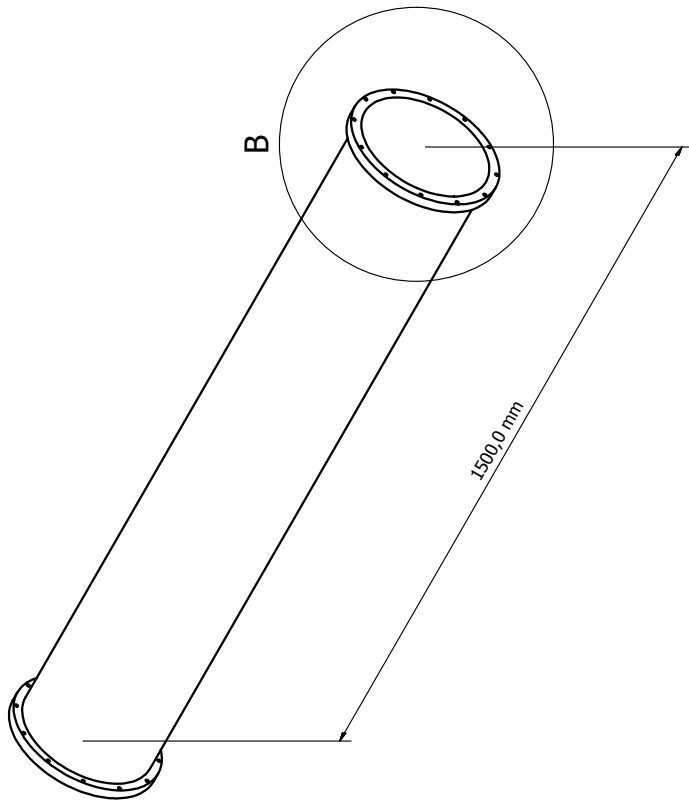
Innløp ( 1 : 3 )



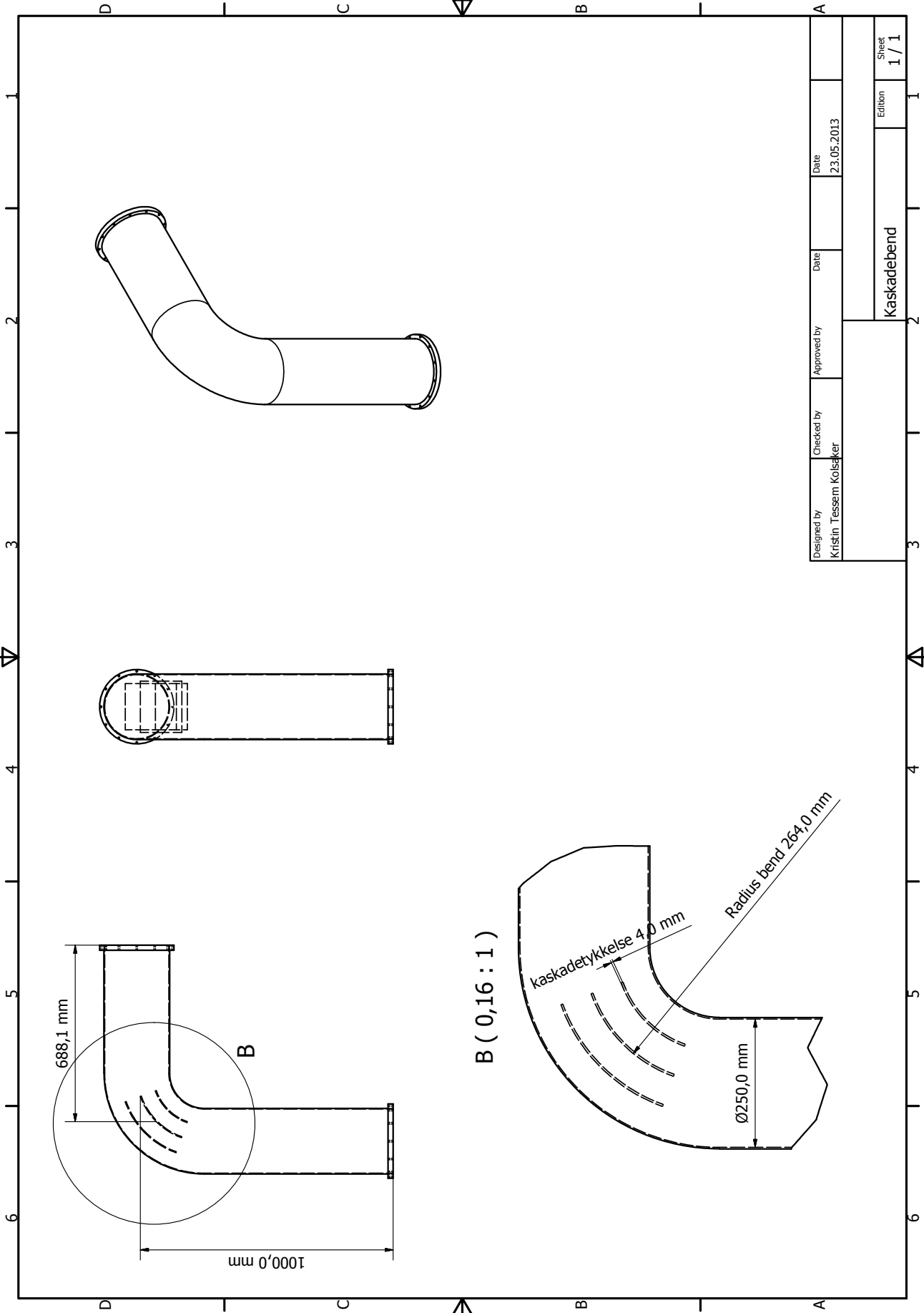
Ø6,0 mm

12 bolthull

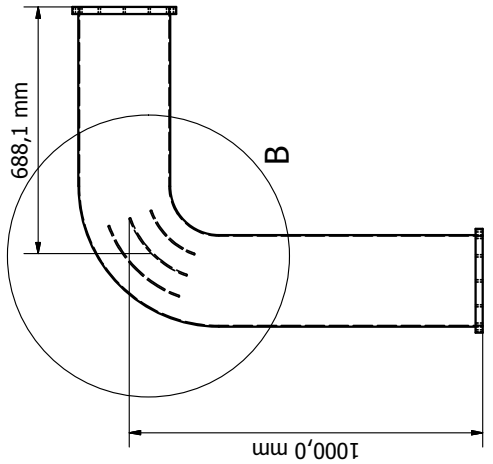
Designed by Kristin Tessem Kolsaker	Checked by	Approved by	Date 23.05.2013
Sirkelrektangel			Sheet 1 / 1



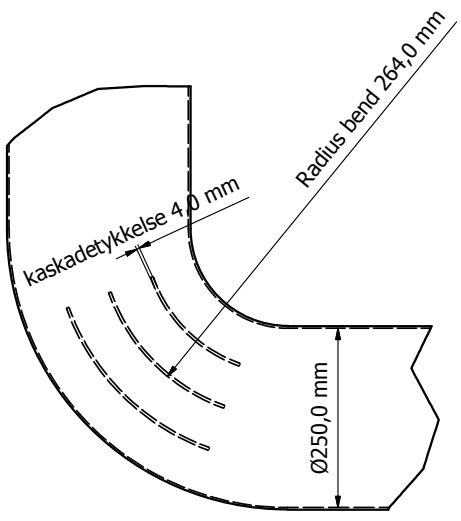
Designed by Kristin Tessem Kolsaker	Checked by	Approved by	Date 23.05.2013
pipe1.5m			Sheet 1 / 1



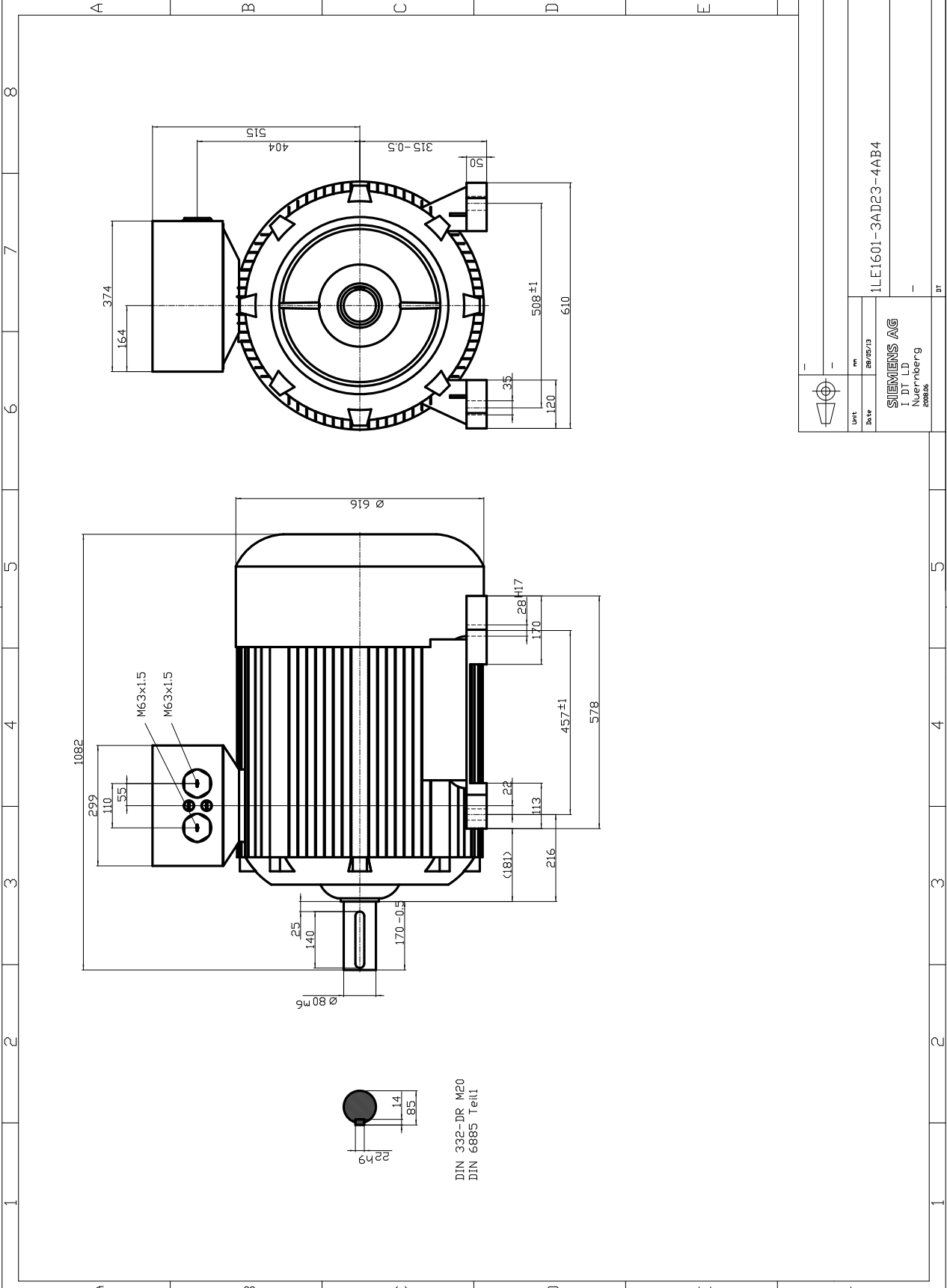
Designed by Kristin Tessem Kolsaker	Checked by	Approved by	Date 23.05.2013
Edition Kaskadebend			Sheet 1 / 1



B ( 0,16 : 1 )







DIN 332-DR M20  
DIN 6885 Teil1

Unit	mm
Date	28/05/13
<b>SIEMENS AG</b> I DT LD Nuernberg 91052	
1LE1601-3AD23-4AB4	
-	
DT	





## Tillegg C

# Pris på komponenter

,



Kunde  
NTNU  
HØYSKOLERINGEN 8

## TILBUD

Vår ref. Rune Kjeldsberg	Side 1 : 1
Tilbudsnr. 918444-1-1	Tilbudsdato 130528
Deres ref. -	
Kundenummer 3551071	

7034 TRONDHEIM

Ordrerabatt LevValuta  
NOK

Leveringsmåte og betingelser		Morarente				Gyldig til
Trondheim By		Fri lev.mnd. + 30 dager				130701
Fraktsone						
TilbPos Artikkelnr	KPos Beskrivelse	Leveringsdato	Enhetspris	Rabatt	Kvantum/ Enhet	Sum
1						
SN52	256x3mm rør,304		615.00		24.00 MTR	14,760.00
2						
SN52	256x3mm bend,304 R=D+100		1,680.00		4.00 STK	6,720.00
3						
1927261	DN250/256,0x3,0 sveisekrage EN 1.4404/316L		521.00	-60%	28 STK	5,835.20
4						
1836416	DN250/256,0 løsflens lettmessing m/belegg,boret PN10		703.00	-55%	28 STK	8,857.80
Selger			Ahlsell Norge A/S		Sum	36,173.00
Rune Kjeldsberg			PS-Tempeveien 15			
Tlf			7037 Trondheim			
+47 91752877			OrganisasjonNr		MVA	9,043.25
Faks nr.			910478656		Totalsum	45,216.25
0047 92174203						
E-postadresse						
rune.kjeldsberg@ahlsell.no			Signatur _____			

TILBUDET ER GITT I HENHOLD TIL VÅRE SALGS- OG LEVERINGSBETINGELSER.