



UNIVERSITY OF AGDER

KONSTRUKSJON OG STYRING AV FRIFORM RØRBØYEMASKIN

<Undertittel>

**Ine Lee Steinsland**  
**Yasin Chris Aure Fiaz**

**Supervisor**  
Morten Ottestad

University of Agder, 2018  
Faculty of Engineering and Science  
Department of Engineering Sciences

# Takksigelser

Morten Ottestad, Morten Kjeld Ebbesen, Tore Saua, Helge Falkum Igus for hjelp med lager og sponsing(?) av dette

# Abstrakt



# Innhold

|   |             |
|---|-------------|
| <b>List of Figures</b>                                    | <b>vii</b>  |
| <b>List of Tables</b>                                     | <b>viii</b> |
| <b>1 Introduksjon</b>                                     | <b>1</b>    |
| 1.1 Metodikk . . . . .                                    | 1           |
| 1.2 Avgrensning . . . . .                                 | 1           |
| 1.3 Eksisterende rørbøyeteknikker . . . . .               | 1           |
| <b>2 Teori</b>  | <b>2</b>    |
| 2.1 CNC-styring . . . . .                                 | 2           |
| 2.2 Kaldbearbeiding . . . . .                             | 2           |
| 2.3 Gripemekanisme . . . . .                              | 2           |
| 2.4 Belastninger . . . . .                                | 2           |
| <b>3 Konstruksjon og styring</b>                          | <b>7</b>    |
| 3.1 Utstyr . . . . .                                      | 7           |
| 3.2 Design . . . . .                                      | 7           |
| 3.3 Materialer . . . . .                                  | 9           |
| 3.4 Mating av rør . . . . .                               | 9           |
| 3.4.1 Gripehus . . . . .                                  | 10          |
| 3.4.2 Opplagring . . . . .                                | 11          |
| 3.5 Rotasjon av rør . . . . .                             | 11          |
| 3.5.1 Elektrisk sylinder . . . . .                        | 12          |
| 3.6 Bøyemekanisme . . . . .                               | 12          |
| 3.6.1 Sfærisk lager . . . . .                             | 12          |
| 3.7 XY-bord . . . . .                                     | 12          |
| 3.7.1 Ledeskinne . . . . .                                | 14          |
| 3.7.2 Ledeskrue . . . . .                                 | 14          |
| 3.7.3 Motorer . . . . .                                   | 14          |
| 3.8 Motordrivere . . . . .                                | 14          |
| 3.9 Mach3-software . . . . .                              | 14          |
| <b>4 Resultater</b>                                       | <b>15</b>   |
| 4.1 Analyse . . . . .                                     | 15          |
| 4.2 Testing av rør . . . . .                              | 15          |
| <b>5 Diskusjon</b>  | <b>16</b>   |
| 5.1 Prinsipper, Forhold, Generaliseringer . . . . .       | 16          |
| 5.2 Presentasjon av analyse, modell eller teori . . . . . | 16          |
| 5.3 (Utfordringer) . . . . .                              | 16          |
| 5.4 (Mulige forbedringer) . . . . .                       | 16          |
| <b>6 Konklusjon</b>                                       | <b>17</b>   |

|          |           |
|----------|-----------|
| <b>A</b> | <b>18</b> |
| <b>B</b> | <b>20</b> |
| <b>C</b> | <b>21</b> |

# Figurer

|     |                                       |    |
|-----|---------------------------------------|----|
| 2.1 | Krefter på rør . . . . .              | 3  |
| 2.2 | Plastisk deformasjon . . . . .        | 4  |
| 2.3 | Elastisk deformasjon . . . . .        | 5  |
| 3.1 | Konsept 1 . . . . .                   | 7  |
| 3.2 | Full illustrasjon av design . . . . . | 8  |
| 3.3 | Y-mekanisme . . . . .                 | 8  |
| 3.4 | X-mekanisme . . . . .                 | 9  |
| 3.5 | Skinner . . . . .                     | 9  |
| 3.6 | Graf . . . . .                        | 10 |
| 3.7 | Driver . . . . .                      | 13 |

# Tabeller



# Kapittel 1

## Introduksjon

Denne oppgaven er tildelt av fakultet for teknologi og realfag ved Universitet i Agder. Det skal anvendes kunnskap som står i tråd med læringsmålene for en treårig bachelor i mekatronikk.

### 1.1 Metodikk

Dette prosjektet tar for seg å designe og programmere en rørbøyemaskin som skal kunne forme rør uavhengig av lengde, og slike løsninger finnes det lite informasjon om. De fleste rørbøyemaskiner er installert med en dyttemekanisme i bakenden, som resulterer i at de blir store og tar mye plass om de skal kunne ta lange rør. Det ble derfor tatt i bruk SketchUp og SolidWorks for å lage gode løsninger i 3D-format.

### 1.2 Avgrensning

Hovedoppgaven var å designe og konstruere hele rørbøyemaskinen. Gruppen ble dessverre svekket, da et medlem måtte hoppe av prosjektet. Dette gikk utover arbeidsfordelingen som opprinnelig var planlagt. Sammen med veileder ble da oppgaven kortet ned til å kun konsentrere seg om fremparten av maskinen, det gruppen har valgt å kalle XY-bordet.

### 1.3 Eksisterende rørbøyeteknikker

Rørbøying har lenge vært en del av historien, og har vært i stadig utvikling. Det er relativt ukomplisert å bøye et rør. En metode er å gjøre det manuelt ved hjelp av en hydraulisk presse. Man kan bytte ut diene, og dermed enkelt kunne bøye rør med forskjellig diameter. Med disse manuelle pressene settes det begrensninger til utforming av røret, da de kun bøyer i én frihetsgrad. Det er i tillegg tidkrevende.

Et annet alternativ er automatisk hydraulisk rørbøyer. Det er denne type teknikk som vil være den mest sammenlignbare metoden, opp mot oppgavens elektroniske CNC-maskin. En hydraulisk aktuator vil kunne oppnå et høyt moment på små maskiner [W. Pawlus \[2016\]](#). Den vil ta litt større plass da aktuatoren må stå ved maskinen, hvor en elektrisk styrt aktuator kan plasseres uavhengig av maskinen. Det vil være noen fordeler med en hydraulisk maskin, men de mange fordelene med elektronikk vil veie mot. Slik som at en hydraulisk maskin vil ha høyere støynivå, vedlikehold med oljeskift og presisjon.

# Kapittel 2

## Teori

### 2.1 CNC-styring

Computer Numerical Control er elektroniske maskiner som utfører arbeid etter et forhåndsinnstilt program. CNC-styring er avkommet etter Computer Aided Design og Computer Aided Manufacturing (CAD/CAM) produksjoner [Network](#).

De første numerisk styrte maskinene ble utviklet i USA på 1950-tallet. Det ble behov for maskiner som kunne produsere kompliserte og nøyaktige deler til fly. Etterhvert som elektronikken fikk mer innflytelse i maskinindustrien ble det tatt i bruk mikroprosessorer. Dette la grunnlaget for dagens databasert numeriske maskiner (CNC) [Industriskolen](#). Mikroprosessorene gjorde det mulig å lagre opp til flere forhåndsprogrammerte programmer i hukommelsen til maskinen og lettere å rette opp feil i programmet. Hvor man tidligere måtte lage nye program kunne man nå rette dem opp i hukommelsen. Man tok også i bruk datamaskinens regnekunnskaper for å lettere regne ut koordinatene til maskinens posisjon.

Programformatet for bruk av koding i CNC-styrte maskiner er regulert av den internasjonale standarden ISO 6983/1 og ISO 6983/2. Dette språket består av G- og M-funksjoner. G-funksjonene er forberedende funksjoner som plassering i X,Y,Z-planet, økende/minkende, høyre/venstre, valg av lengde/hastighet og slike ting. M-funksjonene er hjelpende funksjoner som stopp/start, på/av [Industriskolen](#).

### 2.2 Kaldbearbeiding

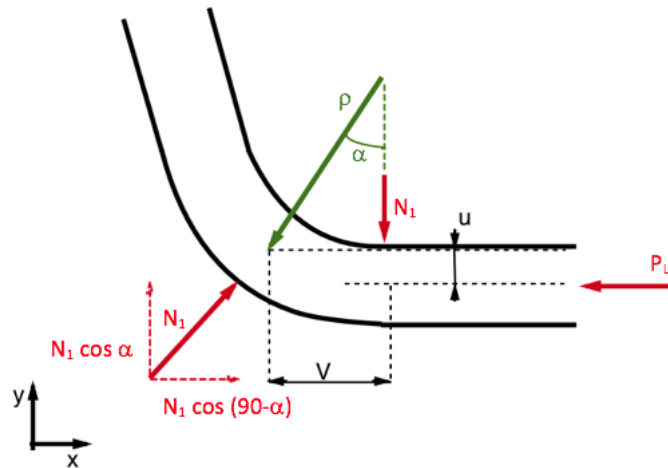
### 2.3 Gripemekanisme

Den mest vanlige metoden for mating av rør i eksisterende CNC-rørbøyemaskiner er å montere en dyttmekanisme i enden av maskinen. Det setter begrensninger til hvilken rørlengde det er mulig å jobbe med. Maskinen som skal konstrueres i denne oppgaven skal, i teorien, kunne ta en uendelig lengde. For å få dette til må det en form for gripemekanisme til. Det er viktig at mekanismen kan fungere godt med runde og glatte overflater. Og at det er høy friksjon mellom gjenstanden som skal ta tak i røret og røret. Balansen mellom å ta tak nok og for mye er veldig fin. Det er hensiktsmessig at mekanismen ikke griper så hardt at det blir skade eller deformasjon på røret. For å få dette til er det mulig å bruke prinsippet til en lift-tong. Den lift-tong vil gripe med en kraft som er proporsjonal med vekten til gjenstanden den skal løfte [Sclater \[2011\]](#). Dette prinsippet må anvendes på en måte slik at den kan brukes på en horisontal kraft.

### 2.4 Belastninger

For å ha få en oversikt over hvilke krefter som virker på røret når det bøyes, settes opp et enkelt FLD (Free-Body-Diagram), som er illustrert i figur [2.1](#). Det er satt opp et lokalt koordinatsystem som følger aksene til røret. Det er kraften  $P_L$  som sier noe om hvor stort moment som trengs for å

dytte røret i X-retning, og den kraften som er viktigst å finne ut for å kunne vite om motoren har stor nok kraft til å klare oppgaven.



Figur 2.1: Enkelt FLD av kreftene som virker på røret

$$u = \rho \cdot (1 - \cos \alpha) \quad (2.1)$$

$$V = \rho \cdot \sin \alpha \quad (2.2)$$

Hvor:

$u$ =Forskyvning på skinnene

$V$ =Avstand fra stuss og senter av sfærisk lager

$\alpha$ =Bøyeradius i radianer

$\rho$ = Radius av bøyen på røret

$V$  og  $u$  er konstanter som kan hentes ut i fra konstruksjonen. Vi sitter da igjen med to ligninger og ukjent. Ved å løse ligning 2.2 med hensyn på  $\rho$ , og sette den nn i ligning 2.1 får vi

$$u = \frac{V}{\sin \alpha} \cdot (1 - \cos \alpha) \quad (2.3)$$

Denne ligningen kan løses grafisk. Ved å finne det maksimale  $u$  kan være, finner man den maksimale bøyeradien som er mulig å oppnå. Det er da mulig å løse ligning 2.4 og finne  $\rho$ .

$$\rho = \frac{u}{1 - \cos \alpha} \quad (2.4)$$

For at røret skal få varig derformasjon må det over flytegrensen, slik at det får en plastisk de-  
formasjon. Dette vil i teorien skje i ytterpunktene av røret. Mens i midten vil holde seg under  
flytegrensen. For å finne denne grensen bruker man

$$\epsilon_y = \frac{-y}{\rho} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \sigma_y &= E \cdot \epsilon_y \Downarrow \\ \epsilon_y &= \frac{\sigma_y}{E} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Dette gir

$$\begin{aligned} \frac{-y}{\rho} &= \frac{\sigma_y}{E} \Downarrow \\ y &= \frac{-\sigma_y \cdot \rho}{E} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Hvor:

$\epsilon_y = \text{Tøyning}$

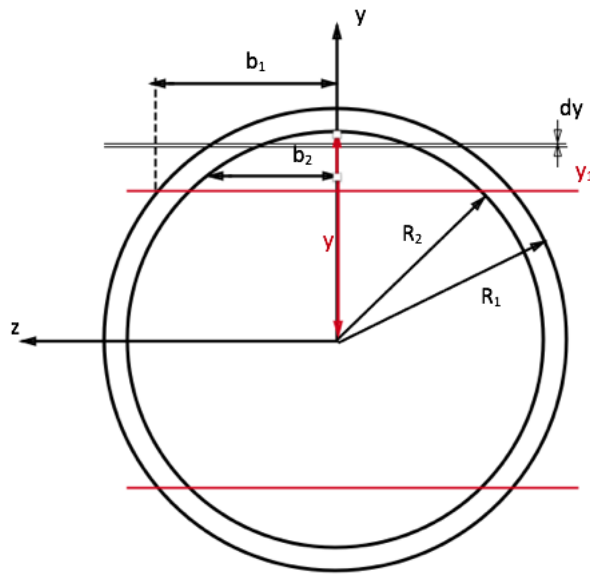
$y = \text{Avstanden fra senter av røret til den plastiske deformasjonen begynner}$

$\rho = \text{Radiusen av bøyen på røret}$

$E = \text{Elasitetsmodulen}$

$\sigma_y = \text{Flytegrensen til metallet}$

I figur 2.2 er det illustrert med to røde streker hvor overgangen fra den elastiske deformasjonen til plastisk deformasjon vil skjer. Lengden  $y$  er ukjent, så nøyaktig hvor dette skille går finner man ikke ut før man har løst ligning 2.7.



Figur 2.2: Illustrasjon om hvor det plastiske området begynner

$$\begin{aligned} R_1^2 &= b_1^2 + y^2 \Downarrow \\ b_1 &= \sqrt{R_1^2 - y^2} \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} R_2^2 &= b_2^2 + y^2 \Downarrow \\ b_2 &= \sqrt{R_2^2 - y^2} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Momentet som trengs for å komme opp i plastisk deformasjon er utledet ut i fra figur 2.2.

$$\begin{aligned} M_P &= \int_F y dF \Downarrow \\ &= \int_{y_1}^{R_1} y \cdot \sigma_y \cdot 2b_1 dy - \int_{y_1}^{R_2} y \cdot \sigma_y \cdot 2b_2 dy \Downarrow \\ &= \frac{2}{3} \cdot \sigma_y ((R_1^2 - y_1^2)^{\frac{3}{2}} - (R_2^2 - y_1^2)^{\frac{3}{2}}) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Hvor:

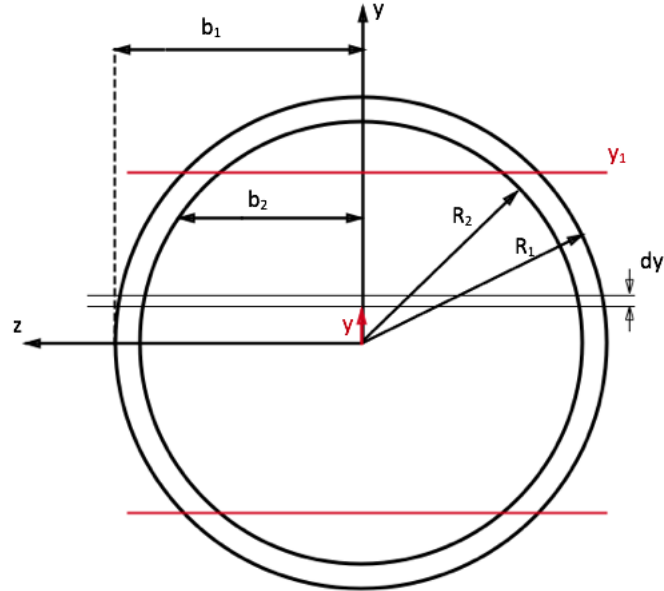
$M_P = \text{Moment for å oppnå plastisk deformasjon}$

$\sigma_y = \text{Flytegrensen}$

$b_1 = \text{Bredden fra senterlinje til yttersiden av røret}$

$b_2$ =Bredden fra senterlinje til innsiden av røret  
 $R_1$ =Ytre radius  
 $R_2$ =Indre radius  
 $y_1$ = Grensen til plastisk deformasjon

Momentene som regnes ut i ligning 2.10 og 2.11 er kun for halve høyden av røret, så svaret må ganges med to. I figur 2.3 er samme rør illustrert på nytt, men denne gangen med hensyn på den elastiske deformasjonen. Det er



Figur 2.3: Illustrasjon av hvor det elastiske området vil befinne seg

$$\begin{aligned}
 M_E &= \int_F y dF \Downarrow \\
 &= \int_A y \cdot \sigma_y dA \Downarrow \\
 &= \int_0^{y_1} y \cdot \frac{\sigma_y}{y_1} \cdot y \cdot 2b_1 dy - \int_0^{y_1} y \cdot \frac{\sigma_y}{y_1} \cdot y \cdot 2b_2 dy \Downarrow \\
 &= 2 \frac{\sigma_y}{y_1} \cdot \left( -y_1 \frac{(R_1^2 - y_1^2)^{\frac{3}{2}}}{4} \right) + \frac{R_1^2 \cdot y_1 \sqrt{R_1^2 - y_1^2}}{8} + \frac{R_1^4}{8} \cdot \arcsin \frac{y_1}{R_1} \\
 &\quad - 2 \frac{\sigma_y}{y_1} \cdot \left( -y_1 \frac{(R_2^2 - y_1^2)^{\frac{3}{2}}}{4} \right) + \frac{R_2^2 \cdot y_1 \sqrt{R_2^2 - y_1^2}}{8} + \frac{R_2^4}{8} \cdot \arcsin \frac{y_1}{R_2} \quad (2.11)
 \end{aligned}$$

Hvor:

$M_E$ =Momentet for å oppnå elastisk deformasjon  
 $\sigma_y$ =Flytegrensen  
 $b_1$ =Bredden fra senterlinje til yttersiden av røret  
 $b_2$ =Bredden fra senterlinje til innsiden av røret  
 $R_1$ =Ytre radius  
 $R_2$ =Indre radius  
 $y_1$ = Avstanden opp til plastisk deformasjon

$$\begin{aligned} M_E + M_P &= V \cdot N_1 \Downarrow \\ N_1 &= \frac{M_E + M_P}{V} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Hvor:

$M_E$ =Momentet for å oppnå elastisk deformasjon

$M_P$ =Momentet for å oppnå plastisk deformasjon

$N_1$ =Kraften som står vinkelrett på røret

$$\begin{aligned} \sum F_x = 0N &= -P_L + N_1 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \Downarrow \\ P_L &= N_1 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Hvor:

$P_L$ =Kraften som må til for å dytte røret

$N_1$ =Kraften som står vinkelrett på røret

# Kapittel 3

## Konstruksjon og styring

(Her beskrives fremgangsmåten i detalj slik at resultatet kan reproduseres av andre)

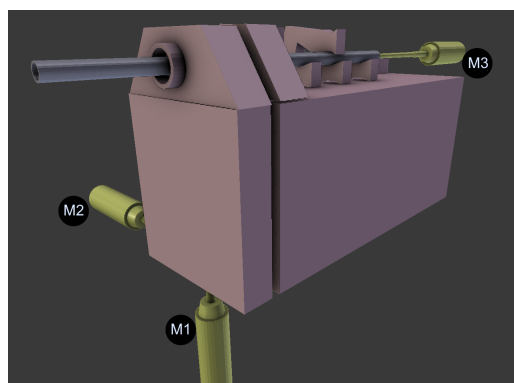
### 3.1 Utstyr

Det ble disponert skruer, med tilhørende mutter, og skinner med vogn på som skulle brukes for å konstruere maskinen. Resten måtte konstrueres og produseres på egen hånd.

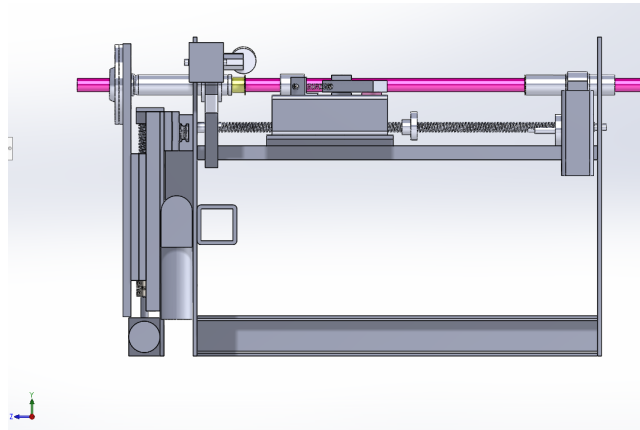
### 3.2 Design

Hele prosessen med oppgaven startet med designet. Flere maskiner ble undersøkt for å få inspirasjon til design. Og det ble relativt tidlig laget et utkast av en maskin, som vises i figur X. Men maskinen var installert med dyttmekanisme bak. Så den måtte re-designes. I figur X ser man det neste konseptet som ble designet. I denne designfasen ble den fremste delen av maskinen, den delen som skal bevege seg i X-Y-planet, videreutviklet. Utfordringene kom når midt-delen, med en matemekanisme, skulle tegnes. Denne prosessen er forklart nærmere i de videre kapitlene angående gripemekanismen og rotasjon av rør.

Det er lagt mye arbeid i at maskinen skal være kompakt, slik at den tar lite plass. Den endelig maskinen er designet med i alt tre motorer og en lineær-sylinder. Det er plassert en motor på bakerste del for å styre skruen i Z-retning. Denne jobber sammen med lineær-sylinderen for å rotere røret i spesifikke grader. En motor er festet på undersiden av XY-bordet for å styre skruen i Y-retning og en tredje motor på siden for å styre skruen i X-retning. I figur X er hele konstruksjonen illustrert, hvor røret blir matet i Z-retning mot venstre.

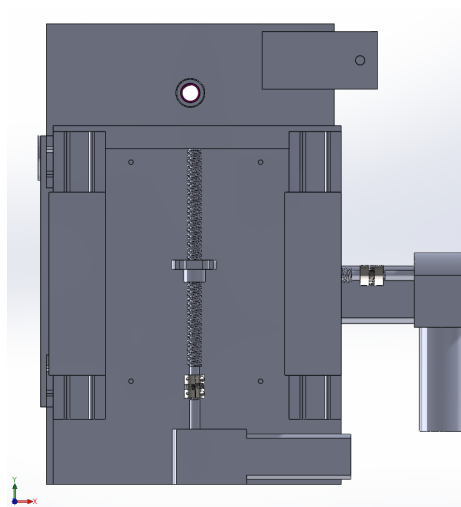


Figur 3.1: Første konseptet



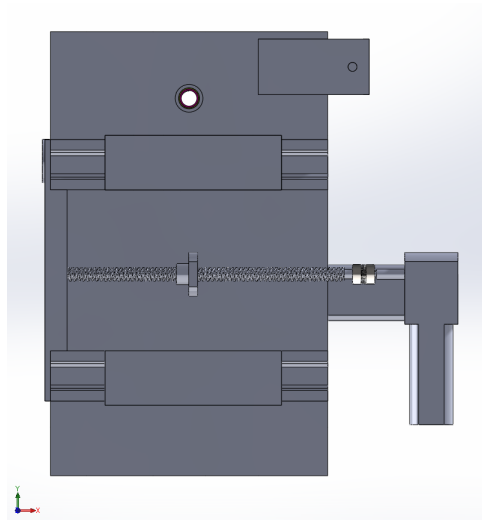
Figur 3.2: Full illustrasjon av design

Grunnet begrenset tid ble oppgaven redusert til å fokusere på det gruppen har valgt å kalle XY-bordet. Dette bordet er bygd opp av tre plater med skinne, mutter og ledeskrue mellom slik at det sfæriske lageret, hvor røret kommer ut, kan bevege seg fritt i XY-planet. I figur 3.3 og figur 3.4 ser man hvordan skruene er tegnet inn. Det sfæriske lageret er et kuleformet lager festet med to skiver med lik radius. Platene trenger kun bevege seg  $\pm 15$  mm for å dekke hele området det sfæriske lagrete kan bevege seg.

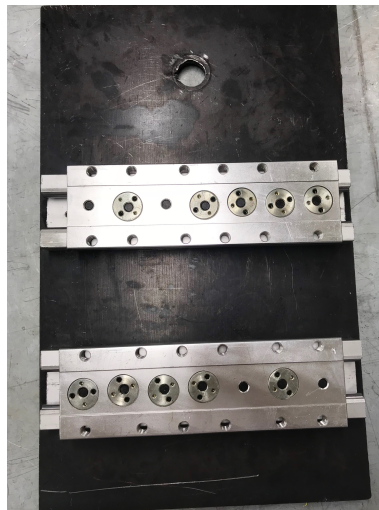


Figur 3.3: Bildet viser hvordan Y-mekanismen er designet





Figur 3.4: Bilde viser hvordan X-mekanismen er designet



Figur 3.5: Her er skinene og vognen montert på en av stålplatene som skal styre øyet

### 3.3 Materialer

Alt av plater er laget i 10mm stålplater. Disse er tegnet i Solidworks og produsert selv. Skinner og vogn er produsert i aluminium. Disse er tatt ut av en brusmaskin, så de var klare til bruk. I figur 3.5 ser man skinne og vogn montert fast i plate som er med på å styre øyet. Skinnen er fastmontert, mens vognen kan gli fritt frem og tilbake. Til opplagring av skruer og stuss er det brukt lager fra Igus. Disse er laget i plastikk, og trenger ingen vedlikehold eller smøring [Igus](#). Lagrene som er valgt ut for X-og Y-skrue kan tåle opp til 120 MPa [IgusQ2](#). Og lageret som er valgt ut til stussen tåler opp til 80MPa [IgusG](#)

### 3.4 Mating av rør

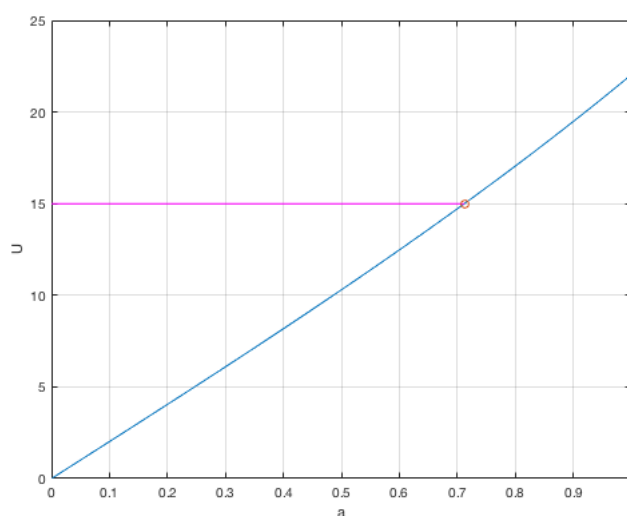
Prosessen med å finne en mekanisme for å mate røret i Z-retning var den mest krevende. En av de første ideene var en lift-tong festet til en ledeskruer, med to halvmåner som tar tak i røret. Ideen var at halvmånene skulle klemme til når skruen gikk i positiv retning, og løse opp når den skulle gå i negativ retning for å hente mer rør. Problemet med denne løsningen er at den bare tar tak i nedre del av halvmånen. Når dette skal rotere vil det skape et uønsket moment. Dette ble løst ved å montere på en til klype på toppen av halvmånene, og laget et slags hus. Men ved nærmere ettertanke ble det avklart at det ble for avansert å produsere. Det var det nåværende gripehuset ble konstruert. Det er større og mer robust, og skal fungere på samme måte med at det

griper til i positiv retning og slipper opp i negativ retning. Dette kan enklere produseres da det er brukt forskjellige typer standardiserte stålkomponenter. I motsetning til de første to ideene hvor lift-tongen måtte vært skjært ut i ulike former.

### 3.4.1 Gripehus

I fra figur 2.1 ser man at det kommer en kraft  $P_L$  på røret. Det er denne kraften som trengs for å kunne føre og bøyet røret. For å finne denne, må ligning 2.1 - 2.13 anvendes. Hvis man tar utgangspunktet i at det skal bøyes et rør med flytegrenser  $\sigma_y = 195MPa$  og E-modul  $E = 210GPa$ . Et rør med tykkelse  $t = 2,65mm$  gir en ytre radius  $R_1 = 16,85mm$  og indre radius  $R_2 = 14,2mm$ .  $u$  er den maksimale skyvningen skinnene kan ha i X- og Y-retning før det sfæriske lageret går ut av posisjon. Og den er funnet til å være  $u = 15mm$ .  $V$  er avstanden fra stussen til senter av det sfæriske lageret. Ut i fra konstruksjonen kan man lese av at denne er  $V = 40.33mm$ .

$$u = \frac{V}{\sin\alpha} \cdot (1 - \cos\alpha) \quad (3.1)$$



Figur 3.6: Grafen viser sammenhengen mellom  $u$  og  $\alpha$

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{u}{1 - \cos\alpha} \\ &= \frac{15mm}{1 - \cos 0,712} \\ &= \underline{\underline{61,717mm}} \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} y &= \frac{-\sigma_y \cdot \rho}{E} \\ &= \frac{-(-195MPa) \cdot 61,717mm}{210 \cdot 10^3 MPa} \\ &= \underline{\underline{0,057mm}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} M_P &= \frac{2}{3} \cdot \sigma_y ((R_1^2 - y_1^2)^{\frac{3}{2}} - (R_2^2 - y_1^2)^{\frac{3}{2}}) \\ &= \frac{2}{3} \cdot 195MPa (((16,85mm)^2 - (0,057mm)^2)^{\frac{3}{2}} - ((14,2mm)^2 - (0,057mm)^2)^{\frac{3}{2}}) \\ &= \underline{\underline{249703,099Nmm}} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Dette er kun momentet for å komme opp i plastisk deformasjon for halve røret. For å få et korrekt tall for hele røret, må svaret ganges med to. Så dette gir at det fullstendige momentet som må til er

$$\begin{aligned} M_P &= 2 \cdot 249703,099 \\ &= \underline{\underline{499406,198 Nmm}} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} M_E &= 2 \cdot \frac{195 MPa}{0,057 mm} \cdot (-0,057 mm \frac{((16,85 mm)^2 - (0,057 mm)^2)^{\frac{3}{2}}}{4}) \\ &+ \frac{(16,85 mm)^2 \cdot 0,057 mm \sqrt{(16,85 mm)^2 - (0,057 mm)^2}}{8} \\ &+ \frac{(16,85 mm)^4}{8} \cdot \arcsin \frac{0,057 mm}{16,85 mm} \\ &- 2 \cdot \frac{195 MPa}{0,057 mm} \cdot (-0,057 mm \frac{((14,2 mm)^2 - (0,057 mm)^2)^{\frac{3}{2}}}{4}) \\ &+ \frac{(14,2 mm)^2 \cdot 0,057 mm \sqrt{(14,2 mm)^2 - (0,057 mm)^2}}{8} \\ &+ \frac{(14,2 mm)^4}{8} \cdot \arcsin \frac{0,057 mm}{14,2 mm} \\ &= 9,892 Nmm - 8,336 Nmm \\ &= \underline{\underline{1,555 Nmm}} \end{aligned} \quad (3.6)$$

I dette tilfellet er det også bare regnet ut den elastiske deformasjonen for halve røret. Så dette svaret på også ganges med to.

$$\begin{aligned} M_E &= 2 \cdot 1,555 Nmm \\ &= \underline{\underline{3,111 Nmm}} \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{M_E + M_P}{V} \\ &= \frac{3,111 Nmm + 499406,198 Nmm}{40,33 mm} \\ &= \underline{\underline{12383,073 N}} \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} P_L &= N_1 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \\ &= 12383,073 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - 0,712 rad\right) \\ &= \underline{\underline{8091,923 N}} \end{aligned} \quad (3.9)$$

### 3.4.2 Opplagring

## 3.5 Rotasjon av rør

Ifølge kravspesifikasjonen skal røret kunne rotere  $\pm 45^\circ$ . Maksimalt nødvendig moment for å kunne rotere røret oppstår når røret roteres mot bøyeretningen. Det vil være avhengig av friksjonen pga.  $P_u$  og smøring i det sfæriske lageret.

### 3.5.1 Elektrisk sylinder

## 3.6 Bøyemekanisme

### 3.6.1 Sfærisk lager

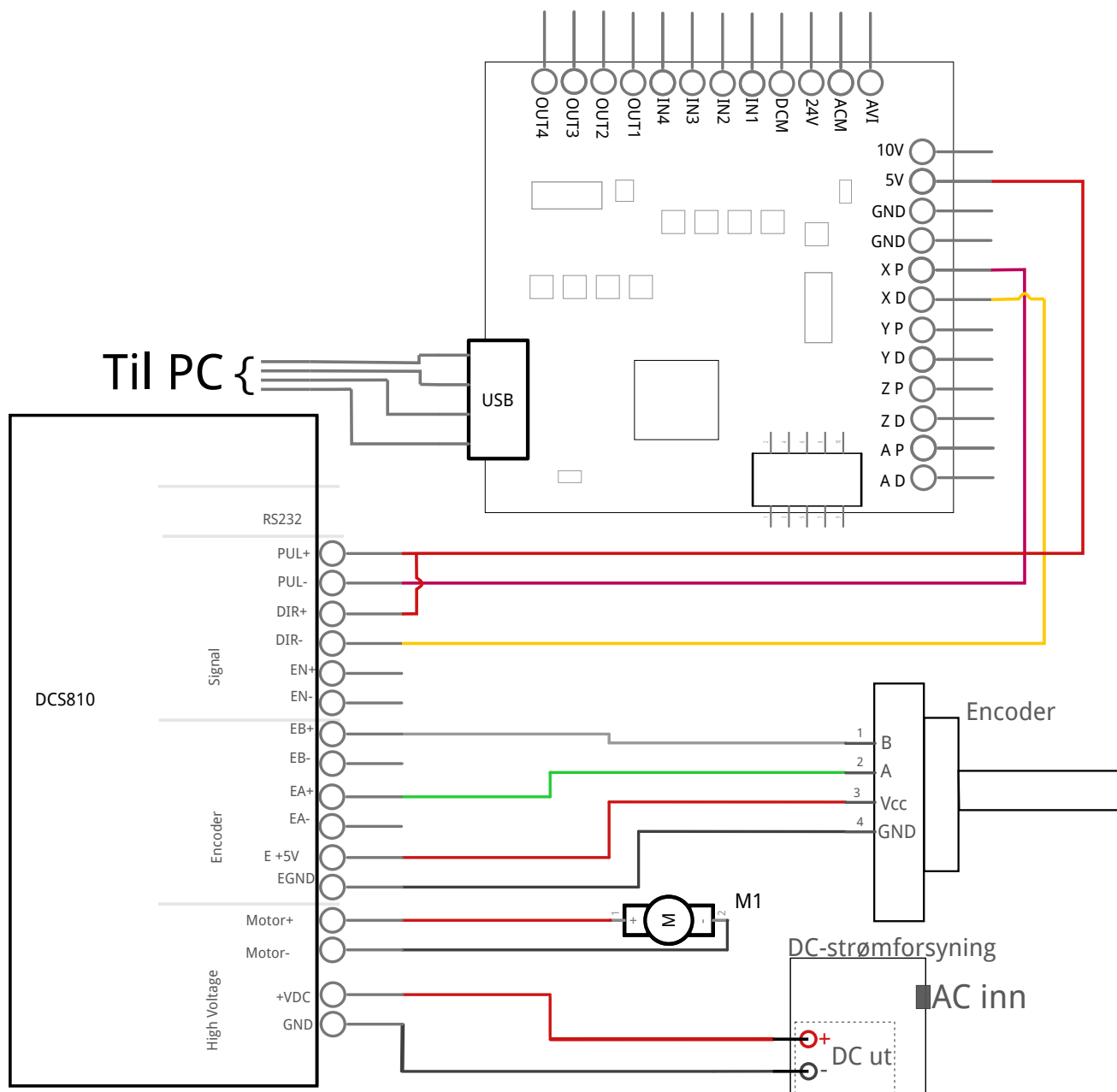
## 3.7 XY-bord

Systemet er basert på samme prinsipp som en fres. XY-bordet fungerer på samme måte som et verktøy som beveger seg i XY-planet. Matingen i Z-aksen tilsvarer Z-bevegelsen til verktøyet, og rotasjonen av røret tilsvarer «spindle-speed».

*Figur 1: Sammenheng mellom tradisjonell fres og rørbøyer*

### **Driver – DCS810**

Motorstyringen skal skje ved hjelp av en motor driver av typen DCS810. Dette er en servo-driver som konverterer et lav-spennings kontroll-signal om til høy-spenningsignal som driver motoren. Driveren har Prosjektet er basert på å bruke material og utstyr som er lett tilgjengelig I tråd med dette blir det benyttet en «single-ended» enkoder i motsetning til en differensial enkoder. I tillegg, så er det i utgangspunktet snakk om korte kabellengder.



Figur 3.7: Tilkoblinger til driveren for x-aksen

### Kontroller

Kontrolleren som ble benyttet er en BSMCE04U-PP. Den bruker USB-tilkobling til PC og vil gjenkjennes av Mach3.

Figur 3: Kablingsskjema av kontroller til driver

**Pulsing** For å finne nødvendige antall pulser som Mach3 skal sende, må man vite noe om hele drivsystemet, dvs. motor, enkoder, gir og ledeskruer. Stigningen for gjengene er 5 mm dette gir:

$$P = 5mm$$

Antall skruer omdreining per millimeter,  $rev_{skruer}$ :

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{5} = 0,25 \left[ \frac{rev}{mm} \right]$$

Motoromdreining per millimeter (*Teoretisk*  $\vee$  *Kompensert*):

$$rev_{skruer} \cdot utvekslingsforhold \text{ til girboks}$$

$$0,25 \cdot 32 = \underline{8} \quad \vee \quad 0,25 \cdot 27,3 = \underline{6,825}$$

Motorpulser per omdreinging: 2400

Mach3 steps per millimeter:

$$2400 \cdot 8 = 19200$$

Mach3 steps per unit = Mach3 steps per rev x Motor revs per unit

For posisjonsgjenkjenning ble det brukt en kvadraturenkoder. Denne har 600 åpninger i skiven sin, og genererer 4 utpulser per åpning, som gir totalt 2400 utpulser. Andre styringskomponenter Nødstoppknapp "HjembryterGrensebrytere for hver akse (+/-) Nødstoppknapp skal være med alle CNC-maskiner for rask tilgang til stopp i tilfelle uønsket drift. Hjembryteren brukes for å signalisere til maskinkontrolleren at verktøyet er en ønsket startstilling. I dette tilfellet, når det sfæriske lageret er midtstilt (slik at rør som føres gjennom ikke bøyes.) Grensebryterne brukes til å signalisere til kontrolleren at en akse er ved sin maksimale grense. I dette tilfellet er det når vognen har flyttet seg  $\pm 15$  mm.

Rørbøying – Programvare Solidworks CAM Mach3 I prinsippet kan en 3D CAD-fil importeres til et CAM-program som generer G-koder. Disse G-kodene kan så lastes inn i Mach3. Nødvendig u, for en gitt bøyeradius, R er avhengig av materialet (og rørdiameter?) (Kilde: tubenet) Dersom man bruker u/R forholdet, 9/80 (Kobber, d = 20.0mm, t = 1.0mm) gir dette følgende koordinat:

$$P = 5mm$$

Antall skrue omdreininger per millimeter,  $rev_{skrue}$ :

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{5} = 0,25 \left[ \frac{rev}{mm} \right]$$

Motoromdreininger per millimeter (*Teoretisk*  $\vee$  *Kompensert*):

$$rev_{skrue} \cdot utvekslingsforhold \text{ til girboks}$$

$$0,25 \cdot 32 = \underline{8} \quad \vee \quad 0,25 \cdot 27,3 = \underline{6,825}$$

Motorpulser per omdreinging: 2400

Mach3 steps per millimeter:

$$2400 \cdot 8 = 19200$$

Mach3 steps per unit = Mach3 steps per rev x Motor revs per unit

### 3.7.1 Ledeskinne

### 3.7.2 Ledeskrue

### 3.7.3 Motorer

## 3.8 Motordrivere

## 3.9 Mach3-software

# Kapittel 4

## Resultater

### 4.1 Analyse

### 4.2 Testing av rør

# Kapittel 5

## Diskusjon

### 5.1 Prinsipper, Forhold, Generaliseringer

(Her trekkes man frem hvilke prinsipper, forhold og generaliseringer man kan finne ut i fra resultatene)

### 5.2 Presentasjon av analyse, modell eller teori

### 5.3 (Utfordringer)

### 5.4 (Mulige forbedringer)



**Kapittel 6**

**Konklusjon**

# Tillegg A

```
#define encoderOPinA 2
#define encoderOPinB 3

volatile unsigned int encoderOPos = 0 ;

float angle = 0.0;

void setup ( ) {
pinMode( encoderOPinA , INPUT ) ;
pinMode( encoderOPinB , INPUT ) ;

void doEncoderA ( ) ;

void doEncoderB ( ) ;

// encoder pin on interrupt 0 (pin 2)
attachInterrupt (0, doEncoderA , CHANGE) ;

// encoder pin on interrupt 1 (pin 3)
attachInterrupt( 1 , doEncoderB , CHANGE) ;

Serial.begin(9600);
}

void loop ( ) {
//Serial.println (encoderOPos , DEC);
angle = (encoderOPos * (360.0/2400.0))/27.3;
Serial.println (angle);
}

void doEncoderA(){
// look for a low-to-high on channel A
if (digitalRead(encoderOPinA) == HIGH) {
//check channel B to see which way encoder us turning
if(digitalRead(encoderOPinB) == LOW) {
encoderOPos = encoderOPos + 1;
}
else {
encoderOPos = encoderOPos - 1; // CCW
}
}

else { // must be a high-to-low edge on channel A
// check channel B to see which way encoder is turning
if (digitalRead(encoderOPinB) == HIGH) {
encoderOPos = encoderOPos + 1; //CW
}
else {
encoderOPos = encoderOPos - 1; // CCW
}
}
}

void doEncoderB ( ) {
// look for a low-to-high on channel B
if (digitalRead(encoderOPinB) == HIGH) {
// check channel A to see which way encoder is turning
if ( digitalRead(encoderOPinA) == HIGH) {
```

```
encoder0Pos = encoder0Pos + 1 ; // CW
}
else {
encoder0Pos = encoder0Pos - 1; // CCW
}
}

// Look for a high -to-low on channel B
else {
// check channel B to see which way encoder is turning
if (digitalRead (encoder0PinA) == LOW) {
encoder0Pos = encoder0Pos + 1 ; // CW
}
else {
encoder0Pos = encoder0Pos - 1; // CCW
}
}
}
```

# Tillegg B

```
% Initialize
clear all
close all
clc

dt = 0.001;
v = 40.33;
a = -1:dt:1;

%Solve function
solution = fsolve(@fcn,1)

%Plot
for i = 1:length(a)
    u(i) = v*(1 - cos(a(i)))/(sin(a(i)));
end

plot(a,u)
line([0 solution],[15 15], 'Color','m');
hold on
plot(solution,15, '-o', 'MarkerIndices',[1])
grid on;

xlim([0 1])
xlabel('a')
ylabel('U')

function x = fcn(a)
v=40.33;
x=(v/sin(a)*(1-cos(a))-15);
end
```

## Tillegg C

# Bibliografi

- Igus. igubal® spherical bearings. URL [https://www.igus.no/wpck/11041/banderole\\_igubal](https://www.igus.no/wpck/11041/banderole_igubal).  
IgusG.
- IgusQ2. iglidur® q2, sleeve bearing with flange, mm. URL <https://www.igus.no/product/?artnr=Q2FM-2023-21>.
- Industriskolen. Grunnlegende innføring i cnc-teknikk. URL [http://www.niskolen.no/pil/Medlem/Kurs/cnc\\_teknikk/story\\_content/external\\_files/CNC\\_VG2.pdf](http://www.niskolen.no/pil/Medlem/Kurs/cnc_teknikk/story_content/external_files/CNC_VG2.pdf).
- Norsk Datakunnskap Network. Hva er cnc-maskiner. URL [http://www.datamaskin.biz/Programmering/computer-programming-languages/88807.html#.WtSP6C\\_JLL8](http://www.datamaskin.biz/Programmering/computer-programming-languages/88807.html#.WtSP6C_JLL8).
- Neil Sclater. *Mechanisms and Mechanical Devices*. The McGraw-Hill Companies, fifth edition, 2011. Page:247.
- M.R. Hansen W. Pawlus, M. Choux. Hydraulic vs. electric: A review of actuationsystems in offshore drilling equipment. *Modeling, Identification and Control*, (1):4–6, 2016.