

# Generering av Forstyrrelse i et Eksperimentelt Lab-oppsett for Managed Pressure Drilling

**Robert Tafjord Drønnen**

Master i teknisk kybernetikk (2 årig)

Innlevert: juni 2013

Hovedveileder: Ole Morten Aamo, ITK

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for teknisk kybernetikk





## HOVEDOPPGAVE

Kandidatens navn: Robert Drønne

Fag: Teknisk Kybernetikk

Oppgavens tittel: Disturbance Generation in an Experimental Lab Setup for Managed Pressure Drilling

### Bakgrunn

In drilling operations performed in the oil and gas industry it is important to control pressure of the drilling fluid, also called drilling mud. Drilling mud is used primarily for removing cuttings from the well. It is injected at high pressure at the top of the drill string. At the end of the drill string, called the drilling bit, the drilling mud gets into the annulus and then rises together with cuttings up to the surface. At the surface, the cuttings are separated from the mud and the cleaned mud is reinjected into the drill string for further circulation. Apart from removing cuttings from the well, drilling mud is also needed for pressurizing the well. If the pressure in the well is too low, the pressure of the surrounding rock formation can make the well collapse and the drill string gets stuck. At the same time, if the pressure exceeds a certain threshold, it may fracture the well leading to costly consequences. For this reason, it is important to control mud pressure in the well.

In managed pressure drilling (MPD) operations, the well is sealed at the top and the pressure is controlled by opening/closing the valve that releases the mud at the top of the well. This technology has proven successful when drilling from stationary platforms. When drilling from a floater, however, the heaving motion of the floater causes major pressure fluctuations in the well, which must be compensated for using automatic control. An experimental lab facility for testing such control strategies is being built at NTNU. It contains certain subsystems for which control algorithms are needed. This project is related to creating a pressure disturbance mimicking the disturbance caused by heave. The following points should be addressed by the student:

### Oppgave:

- 1) Investigate the various control modes of the Lenze Topline 8400 controller and make a decision as to which mode is more suitable for reference tracking for the bottom hole assembly in the heave lab. In particular, work out the problems encountered during the project work of Fall 2012.
- 2) Discuss relevant references for the bottom hole assembly to follow, and develop a SIMULINK module that let's the user select from a menu.
- 3) Incorporate into the SIMULINK module, or in a user guide, parameter limits that ensure (to a reasonable degree) that the lab's pressure specifications are not violated.
- 4) Implement your results in the lab, and run experiments documenting the performance of your system.
- 5) Write a report.

**Faglærer/Veileder:** Professor Ole Morten Aamo



## Sammendrag

Dette er et prosjekt på 30 studiepoeng utført siste semesteret på et toårig masterprogram. Prosjektet er en videreføring av prosjektet utført høsten 2012, i faget TTK4551 Teknisk kybernetikk, fordypningsprosjekt. Oppgaven er gitt av Institutt for Teknisk Kybernetikk (MTTK). Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU) og Statoil har et samarbeidsprosjekt, hvor en sammen skal utarbeide en labmodell av en flytende plattform påvirket av hiv.

Prosjektets mål var å rette på problemet som ble funnet under TTK4551 prosjektet, hvor Bottom Hole Assembly (BHA) ikke fulgte sinusreferansene som ble satt. Det var da ønskelig at problemet til den forhåndsinstallerte Lenze-kontrolleren ble løst slik at det var mulig å lage forskjellige typer referanser som BHA skulle følge. BHA lager forstyrrelsen som ventilen på toppen skal klare å redusere ved hjelp av mottrykkspumpen og et kontrollsystem. Det var behov for både enkle forstyrrelser og mer realistiske og kompliserte forstyrrelser. Det ble derfor utarbeidet forstyrrelser basert på vanlige sinuser, en bølgegenerator basert på Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) spekter og til slutt en målt hivbevegelse fra en plattform i Nordsjøen. Dette ble utarbeidet i MATLAB Simulink, med målsetning om hurtighet og brukervennlighet.

Laben er bygd opp slik at man setter en ønsket posisjonsreferanse i Simulink. Denne posisjonsreferansen blir sammenlignet med målt posisjon til BHA, og feilen blir sendt ut fra Simulink som en hastighetsreferanse til Lenze-kontrolleren.

Rapporten inneholder en introduksjon med litt bakgrunnsinformasjon om Managed Pressure Drilling (MPD). Den har et kapittel om hvordan laben er satt opp og fungerer. Det blir også gitt informasjon om hvordan Lenze-kontrolleren er satt opp, og oppsettene til de forskjellige referanse metodene. Det blir vist forskjellige eksperimenter gjort i lab for å vise funksjonen til referansemetodene. Til slutt er det en diskusjon og en konklusjon som slår fast at referansemetodene fungerer og at Simulink-programmet både er hurtig og brukervennlig.



## Abstract

This is a 30 credits master project, and was done last semester in the two-year masters program. The project is a continuation to the TTK4551 Teknisk kybernetikk, fordypningsprosjekt done in the autumn semester 2012. The project is given by The Department of Engineering Cybernetics (MTTK). Norwegian University of Science and Technology (NTNU) and Statoil are in these days working together to make a lab model of a drill string on a floating platform, under influence of heave.

The projects objective was to correct the problem found during the TTK44551 project. It was desirable to fix the problem with the pre-installed Lenze controller, make it suitable to use different Bottom Hole Assembly (BHA) references. The BHA makes the disturbance that the choke on top is supposed to reduce, using the backpressure pump and a control system. It was necessary with both easy disturbances and more realistic and difficult disturbances. Therefore disturbances based on ordinary sine waves, a wave generator based on Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) spectrum and measured heave motion from a platform in the North Sea, were made. This was made in MATLAB Simulink where run time and user-friendliness was important.

In the lab you choose a wanted position reference in Simulink. This position reference is compared with the measured BHA position, and the error is an output from Simulink, sent as a speed reference to the Lenze controller.

This report include a introduction with some background information about Managed Pressure Drilling (MPD). It contains a chapter on how the lab are assembled and how its work. In addition some information about the Lenze controller is given and how the different reference methods in Simulink works. Different experiments done in the lab, to point out the performance to the reference methods, will be shown. At the end it is a discussion and a conclusion where it is conclude that the reference methods works correct and that the Simulink program is both fast and user-friendly.





## Forord

Prosjektet er utført som avsluttende oppgave i toårig masterprogram, fra januar 2013 til juni 2013. Det er utført under Institutt for Teknisk Kybernetikk (MTTK) på Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU).

Først og fremst vil jeg takke Professor Ole Morten Aamo for god veiledning og oppfølging. Mange av løsningene er blitt utarbeidet på våre møter. Jeg vil også rette en takk til Lenze som stilte seg disponibel når både Anders Alebert og jeg hadde problemer med Engineer og Lenze-kontrolleren.

Jeg har hvert en av fire fra Institutt for Teknisk Kybernetikk (MTTK) som har arbeidet med laben. I tillegg har to studenter fra Institutt for Petroleums-teknologi og anvendt geofysikk (IPT) hvert med på å forbedre laben. Anders Albert, Martin Gleditsch og Jussi Mikael Aanestad fra MTTK sammen med Andreas Laupstad Boge og Anish Phade fra IPT fortjener en takk for samarbeidet.

Trondheim, Norway  
Juni 2013

Robert Drønnen



# Innhold

<b>1</b>	<b>Introduksjon</b>	<b>1</b>
1.1	Motivasjon . . . . .	1
1.1.1	Managed Pressure Drilling . . . . .	2
1.1.2	Narrow Pressure Window . . . . .	4
1.1.3	Non Productive Time . . . . .	6
1.1.4	Flytende Rigg . . . . .	7
1.2	Målsetning . . . . .	8
1.3	Rapportoppbygning . . . . .	9
<b>2</b>	<b>IPT-Heave Lab</b>	<b>11</b>
2.1	Tidligere Arbeid . . . . .	14
2.2	Lenze-kontroller og Engineer Software . . . . .	16
2.2.1	Motor Control (MCTRL) . . . . .	17
2.2.2	Technology application . . . . .	19
2.2.3	Basic drive functions (MCK) . . . . .	20
2.3	Oppsett . . . . .	21
2.3.1	Oppsett Lenze-kontroller . . . . .	21
2.3.2	Simulinkoppsett . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Eksperiment</b>	<b>35</b>
3.1	Eksperiment med bruk av Sinusbølger . . . . .	35
3.2	Bølgegenerator som BHA-referanse . . . . .	40
3.3	Nedskalert Riggdata-eksperiment . . . . .	44
3.4	Illustrasjon av Trykkbegrensning . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>51</b>

<b>5 Konklusjon</b>	<b>55</b>
<b>A List of Input Channels</b>	<b>1</b>
<b>B English Summary</b>	<b>1</b>
B.1 Engineer . . . . .	1
B.2 Simulink . . . . .	1
B.2.1 Sine Waves . . . . .	2
B.2.2 Wave Generator . . . . .	3
B.2.3 Heave . . . . .	4
B.2.4 Open input . . . . .	4
<b>C IPT-Heave Lab Start Guide</b>	<b>1</b>
C.1 Startup Procedure . . . . .	1
C.2 Shutdown Procedure . . . . .	2
C.3 Warnings . . . . .	2
C.4 Pull BHA Away from Limit Switch . . . . .	3
C.5 Reset Limit Switch in Engineer . . . . .	5
C.6 Homing Procedure . . . . .	10
C.7 Fill Water in the Tank . . . . .	12
C.8 Pressurize System with Backpressure pump . . . . .	13
C.9 Pressurize System with Pressure Tube . . . . .	13
C.10 Refilling Pressure Tube with Water . . . . .	15
C.11 Removing Air from System . . . . .	16
C.12 BHA SIMULINK . . . . .	16
C.13 Choke SIMULINK . . . . .	20
<b>D Digitale Tillegg</b>	<b>1</b>

# Figurer

1.1	Conventional drilling vs. CBHP drilling . . . . .	6
1.2	Ulykker som forårsaket NPT i Mexicogolfen . . . . .	7
2.1	Laben . . . . .	13
2.2	Bilde av Lab og BHA . . . . .	14
2.3	Endelige Designet . . . . .	15
2.4	Brønndesignet . . . . .	16
2.5	Engineer . . . . .	17
2.6	Simulink-diagram . . . . .	23
2.7	JONSWAP Spekter . . . . .	26
2.8	FFT Bølgegenerator . . . . .	27
2.9	FFT Bølgegenerator etter Filter . . . . .	28
2.10	FFT Riggdata . . . . .	31
2.11	FFT Skalert Riggdata . . . . .	32
2.12	Riggdata Plot . . . . .	33
3.1	Sinus Frekvens endring . . . . .	36
3.2	Sinus Amplitude endring . . . . .	37
3.3	Tre Sinuser . . . . .	38
3.4	Sinus Amplitudebegrensning . . . . .	39
3.5	Feil mellom Sinusreferanse og BHA-posisjon . . . . .	40
3.6	Bølgegenerator 15s . . . . .	41
3.7	Bølgegenerator 6s . . . . .	42
3.8	Bølgegenerator 3s . . . . .	43
3.9	Feil mellom bølgegeneratorreferanse og BHA-posisjon . . . . .	44
3.10	Riggdata 6s . . . . .	45
3.11	Riggdata 3s . . . . .	46

*FIGURER*

---

3.12	Feil mellom Riggdatareferansen og BHA-posisjon . . . . .	47
3.13	Trykkbegrensning BHA . . . . .	48
3.14	Trykkbegrensning P1 og P2 . . . . .	49
C.1	Manual valves . . . . .	4
C.2	Socket for NI cards . . . . .	5
C.3	Backpressure pump switches . . . . .	6
C.4	BHA setup . . . . .	7
C.5	How to plug in network cable . . . . .	8
C.6	Startup screen loaded project . . . . .	9
C.7	Switches . . . . .	11
C.8	Tank . . . . .	12
C.9	Crane . . . . .	13
C.10	Backpressure pump . . . . .	14
C.11	Button for Releasing Air from the System . . . . .	17
C.12	BHA SIMULINK . . . . .	18
C.13	Choke SIMULINK . . . . .	21

# Tabeller

2.1	Hardware i laben . . . . .	12
2.2	Anbefalte Verdier, Bølgegenerator . . . . .	29
C.1	Control Box . . . . .	10
C.2	Recommended values, Wave Generator . . . . .	19

*TABELLER*

---



# Acronyms

**AGD** Air or Gas Drilling. 2

**BHA** Bottom Hole Assembly. 1–5, 8, 9, 11, 12, 14–16, 21–24, 27–30, 34, 38–49, 52, 53, 55, 56

**BHP** Bottom Hole Pressure. 2–8, 11, 56

**CBHP** Constant Bottom Hole Pressure. 1–3, 6, 11

**DG** Dual Gradient. 3

**FB** Function Block. 19

**FFT** Fast Fourier Transform. 26–28, 30–32

**HMS** Helse, Miljø og Sikkerhet. 2

**IPT** Institutt for Petroleumsteknologi og Anvendt Geofysikk. 1, 14, 16

**JONSWAP** Joint North Sea Wave Project. 3, 8, 25–27

**MCK** Basic drive functions. 1, 17, 21

**MCTRL** Motor Control. 17, 19

**MPD** Managed Pressure Drilling. 1–7, 9, 11

**MTTK** Institutt for Teknisk Kybernetikk. 1, 16

## *Acronyms*

---

**NI** National Instruments. 11

**NPT** Non Productive Time. 1–4, 6, 7

**NPW** Narrow Pressure Window. 1

**NTNU** Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet. 1, 8, 11

**PMCD** Pressurized Mud Cap Drilling. 3

**RFC** Returns Flow Control. 3

**ROP** Rate Of Penetration. 2, 4

**SC** Servo control. 19

**SLVC** Sensorless vector control. 18, 19

**UBO** Underbalanced Operations. 2

**VFCplus** V/f characteristic control. 17, 18

# Kapittel 1

## Introduksjon

Denne masteroppgaven er gjennomført våren 2013. Gjennom et samarbeid mellom Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU) og Statoil der det satt opp en lab hvor Managed Pressure Drilling (MPD) med Constant Bottom Hole Pressure (CBHP) kan bli testet. Både Institutt for Teknisk Kybernetikk (MTTK) og Institutt for Petroleumsteknologi og Anvendt Geofysikk (IPT), med flere studenter, er med på å forbedre lab-oppsettet.

Denne oppgaven er videreført fra TTK4551 Teknisk kybernetikk, fordypningsprosjekt. Rapporten som ble utarbeidet i den anledning kan være nyttig bakgrunnsmateriale til denne utredningen (se [7], vedlegg D). Det viktigste bakgrunnsmaterialet er likevel kort oppsummert her.

### 1.1 Motivasjon

Med verdens økende behov for olje- og gassressurser, er det viktig å kunne tømme reservoarene ordentlig og få tilgang til de vanskelige og mindre økonomiske ressursene. MPD er en metode som kanskje kan være løsningen på dette. MPD's målsetning er å kunne hente opp de ressursene som i dag er uøkonomisk, vanskelige og nesten umulige å hente opp med dagens vanlige boreteknikker. Med mange av de lett tilgjengelige ressursene tømt, er det bare de vanskelige igjen. Dette fører til at nye metoder for å takle blant annet Narrow Pressure Window (NPW), Non Productive Time (NPT) og dårlig vær må komme på banen. Det

er der MPD kommer inn i bildet. MPD skal kunne gjøre at uøkonomiske og vanskelige reservoar blir drillbar.

Hannegan [3] hevdet i 2011 at det var større fordeler med MPD offshore enn onshore, dette på grunn av de større riggekostnadene. MPD er brukt på alle typer rigger, både offshore og onshore, men er fortsatt ansett som en ny teknologi [3]. I følge Hannegan og Fisher [6], ble MPD introdusert til offshore-næringen så sent som 2004 under IACD/SPE Amsterdam Drilling Conference.

I 2007 benyttet Statoil MPD på en fast plattform på Kvitebjørn-feltet i Nordsjøen [9]. Hannegan [5] refererer til en suksesshistorie fra Chuc 172 i den sørvestlige delen av Mexicogolfen. Målet med installasjonen var å unngå sirkulasjonstap, som de hadde opplevd på en annen brønn, samt bore brønnen på færre dager enn de 30 de hadde fått tillatt. Resultatet var at de boret uten noe tap av mudsirkulasjon ved bruk av CBHP-versjonen av MPD. Boringen ble også gjennomført på kun fem av de 30 dagene som var tillatt, en forbedring på 83%.

Saponja, Adeleye og Hucik [11] kartlegger de økonomiske fordelene med MPD. Den største økonomiske fordelene er redusert NPT, men MPD øker også Rate Of Penetration (ROP) og reduserer antall casing strings. I tillegg øker Helse, Miljø og Sikkerhet (HMS) ved bruk av MPD. Grunnet økt kontroll over brønnen, gir dette mindre sannsynlighet for alvorlig feil som blant annet kan føre til personskade. Dermed vil MPD både gi større sikkerhet for besetningen og redusere kostnadene på plattformen.

### 1.1.1 Managed Pressure Drilling

Hovedgrunnen til å inkludere MPD, er for å kontrollere Bottom Hole Pressure (BHP). Under boring av en brønn er det viktig å holde seg over poretrykket (eng. pore pressure), men samtidig under bruddtrykket (eng. fracture pressure). Om dette brytes kan man risikere å sette fast borestrengen eller få en ukontrollert reservoarinnstrømning også kalt kick. Dette kan i verste fall føre til en utblåsning som kan lede til store miljøskader, økonomiske tap og kanskje tap av liv [15]. Hovedfunksjonen til MPD er å sette et ønsket setpunkt for BHP, med en toleranse på  $\pm 5\%$  bar under normale forhold [9].

MPD er en av tre i familie under kategorien kontrollert trykkboring. De to andre er Underbalanced Operations (UBO) og Air or Gas Drilling (AGD) [3].

Under MPD er det fire ulike metoder [3].

- ”CBHP
- *Pressurized Mud Cap Drilling (PMCD)*
- *Dual Gradient (DG) (Flere metoder)*
- *Returns Flow Control (RFC)*”

Ved bruk av CBHP kontrollerer man BHP ved hjelp av automatisk justering av mud-returventilen, og i noen tilfeller mudpumpene. Som Godhavn et al. [10] forklarer, kan man påvirke annulustrykket ved hjelp av å juster åpningen på ventilen i toppen. I tillegg når mudpumpene er slått av, for eksempel ved skjøting av borestrengen, kan en mottrykkspumpe opprettholde strømmingen gjennom ventilen. På den måten har man fortsatt full kontroll over annulustrykket. Det er også her den største styrken til CBHP ligger. Når man slår av mudpumpene vil en få et trykkfall i annulus, på grunn av at friksjonstrykket forsvinner. Ved hjelp av ventilen og mottrykkspumpen kan en fortsatt kontrollere trykket i annulus slik at det ikke faller under poretrykket.

### MPD Katogorier

**Reactive MPD:** I følge Malloy [12] bruker Reactive MPD kun MPD-metodene og verktøyet for å minimere boreproblemene etter at de har oppstått. Brønnen er vanligvis planlagt med bruk av vanlige boreteknikker, men når et problem oppstår blir MPD-metodene aktivert for å minimere skadene.

**Proactive MPD:** I følge Malloy [12], er Proactive MPD planlagt med bruk av MPD-metodene og verktøyet aktiv fra starten til å kontrollere BHP. Dette vil føre til at boringen ikke vil bruke så mye tid i NPT. Kort sagt vil Proactive MPD bore både de ’udrillbare’ reservoarene, og de driftmessig og økonomisk utfordrende.

Dette prosjektet vil dermed basere seg på CBHP og Proactive versjonen av MPD.

### **Fordeler**

Hannegan [4] oppsummerer de største fordelene med MPD i følgende liste, Advantages of MPD

- *Safely drilling with a lighter fluid nearer or at-balanced*
- *Enhanced well control and control of the well*
  - i *Early kick detection*
  - ii *Ascertain actual downhole pressure environment*
  - iii *Minimize swab/surge hazards while tripping*
- *Less drilling-related NPT*
  - i *Higher ROP*
  - ii *Less time consumed drilling trouble zones*
  - iii *Drill deeper open sections with the same mud weight*
- *Simplified casing program*
- *Less mud cost*
- *Larger open hole at total depth objective for improved productivity index of the completed well*
- *Drill otherwise un-drillable prospects*

### **1.1.2 Narrow Pressure Window**

Under boring av en brønn har man et begrenset vindu, kalt Drilling Window, som BHP må holde seg innenfor. Dette vinduet er begrenset av poretrykket og bruddtrykket. Poretrykket er den nedre begrensningen, mens bruddtrykket er den øvre. Goodhavn [9] hevder at BHP må holdes over poretrykket for å unngå at hydrokarboner skal strømme inn i brønnen (kick), samt under bruddtrykket for å unngå mudtap eller skade på reservoaret.

For å holde BHP inne i vinduet ved bruk av MPD blir ventilen og mottrykkspumpen brukt. Endring i annulustrykket krever at en innskrenker ventilåpningen for å få en trykkøkning, og åpner ventilåpningen for å få et trykkfall. På den måten kan BHP justeres ved hjelp av ventilåpningen. Når mudpumpene da blir slått av, vil ventilen innskrenke åpningen for å holde trykket over poretrykket. Mens når mudpumpene blir slått på, vil ventilen åpne for å holde trykket under bruddtrykket. Ligningen under forklarer hvordan BHP blir styrt

av ventilen, gitt av Hannegan [5] og Malloy [12]

Uten MPD

**Statisk:** Når mudpumpene står stille.

$$P_{BH} = P_{Hyd} \quad (1.1)$$

**Dynamisk:** Når mudpumpene går.

$$P_{BH} = P_{Hyd} + P_{AF} \quad (1.2)$$

Hvor  $P_{BH}$  er BHP,  $P_{Hyd}$  er det hydrostatiske trykket og  $P_{AF}$  er friksjonstrykket i annulus.

Med MPD

**Statisk:**

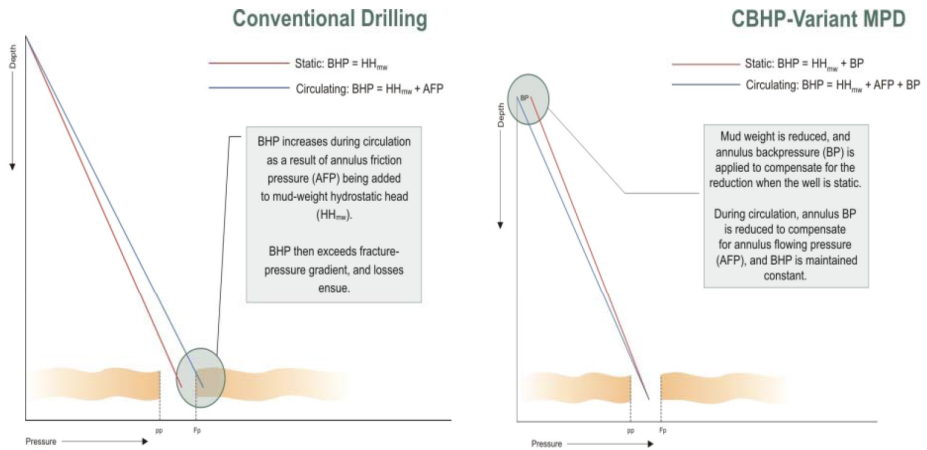
$$P_{BH} = P_{Hyd} + P_{BP} \quad (1.3)$$

**Dynamisk:**

$$P_{BH} = P_{Hyd} + P_{AF} + P_{BP} \quad (1.4)$$

Hvor  $P_{BP}$  er mottrykket fra ventilen

## 1.1. MOTIVASJON



Figur 1.1: Figuren viser hvordan MPD kompenserer for trykkøkning eller -fall. Med MPD holder BHP seg innenfor poretrykket(venstre) og bruddtrykket(høyre) [5]

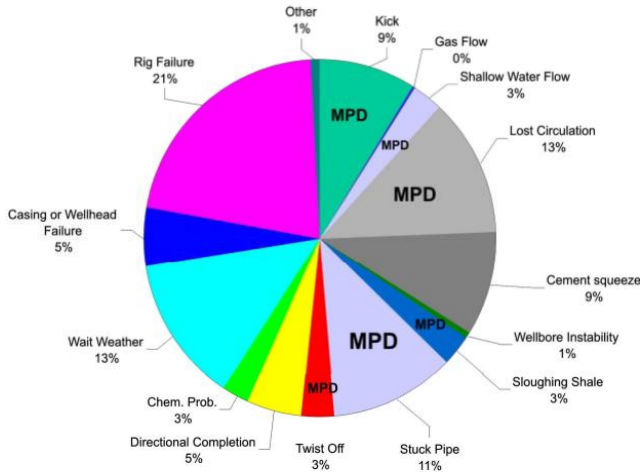
Figur 1.1 viser forskjellen mellom ordinær boring og CBHP-versjonen av MPD. Om BHP er innenfor vinduet statisk tilstand, risikerer man å bryte bruddtrykket når mudpumpene blir slått på og går over til dynamisk tilstand. MPD klare å kompensere for dette og unngår dermed risikoen ved å bryte begrensningen.

### 1.1.3 Non Productive Time

Med alle fordelene MPD gir, vil også NPT bli redusert. Sirkeldiagrammet presentert av Hannegan [5] viser NPT i Mexicogolfen fra 1993 - 2002 (figur 1.2). Undersøkelsen viste at 22% av boredagene ble tapt til NPT. Ca 42% av disse kunne blitt løst av MPD.



Wellbores Drilled 1993- 2002; Water Depth = &lt;600 feet



Figur 1.2: Ulykker/problem i Mexicogolfen som forårsaket NPT. 42% av disse kunne blitt løst med MPD, markerte seksjoner [5].

#### 1.1.4 Flytende Rigg

Hivbevegelsene er den største utfordringen med flytende rigg, med tanke på BHP. Goodhavn [9] hevder at typiske hivbevegelser i Nordsjøen er 3 meter høye og med en periode på 10-20 sekund. Dette vil føre til at riggen beveger seg opp og ned, som igjen kan danne trykkvariasjoner i brønnen.

Når brønnen bores er borestrengen hivkompensert. Største problemet er når borestrengen må bli skjøttet. Da festes den i boregulvet, som ikke er hivkompensert, og dermed vil også borestrengen bevege seg med riggen. Dette medfører at borestrengen vil fungere som et stempel i annulus som igjen medfører store BHP svingninger, som ikke er ønskelig. Det er her den store fordelene med MPD kommer inn. Ved hjelp av ventilen og mottrykkspumpen, bør det være mulig og motvirke de trykksvingningene som borestrengen forårsaker. Dette er også

målet for laben til NTNU og Statoil. Ved å etterligne hivbevegelsene skal man forsøke å lage et kontrollsystem som ved hjelp av ventilen og mottrykkspumpen skal kompensere for trykksvingningene.

I 2009 var ikke Goodhavn [9] klar over noen gode løsninger for å takle trykksvingningene i hardt vær.

## 1.2 Målsetning

Det overordrede målet til laben, er å kunne studere ulike kontrollsystemer for å kontrollere BHP. Dette skal kunne kontrolleres ved hjelp av mottrykkspumpen og ventilen montert på toppen. En Bottom Hole Assembly (BHA) skal lage ulike forstyrrelser som kontrollsystemet skal kompensere for, og dermed redusere BHP svingningene.

Siden dette er en videreføring av TTK4551 Teknisk kybernetikk, fordypningsprosjekt, har målsetningen likheter. Det første målet er å løse referanseproblemet med Lenze-kontrolleren slik at den kan benyttes. Det er da nødvendig å lese dokumentasjonen for både Lenze-kontrolleren og for Engineer programmet, for så å implementere og teste forskjellige kontrollinnstillinger og velge den mest egnede.

Som første utarbeiding av referanse er det ønskelig å lage en vanlig sinus og etter hvert flere sammensatte sinuser. Det skal også være mulig å endre periodetid og amplitude under drift, samtidig som begrensningene blir opprettholdt. Dermed er det nødvendig med noen sikkerhetsfunksjoner som gjør at labens begrensninger ikke blir brutt.

Det er ønskelig å teste laben på mer realistiske verdier. Det vil derfor bli utarbeidet en bølgegenerator basert på Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) spekter. Da er det nødvendig å studere hvordan et bølgespekter fungerer. Bølgegeneratoren vil bli lavpassfiltrert for å fjerne de raskeste frekvensene og for å etterligne en riggbevegelse. Det er hensiktsmessig å kunne velge egen periodetid til bølgegeneratoren.

I tillegg vil et datasett med målt hiv fra en rigg i Nordsjøen bli brukt for å danne en realistisk BHA bevegelse. Dataserien er mottatt fra Marin Cybernetics. For å bruke dataserien må den skaleres, samtidig som det skal være mulig å velge periodetid til dataserien.

Den endelige målsetningen for BHA er å lage et raskt og brukervennlig Simulink-diagram der man enkelt kan velge mellom de ulike referansene og endre parametrene for hver referanse.

## 1.3 Rapportoppbygning

Rapporten begynner med en introduksjon med motivasjon og noe forklaring av MPD. Kapittel 2 inneholder en innføring i hvordan laben er satt opp, samt en gjennomgang av tidligere arbeid. Det beskriver de forskjellige valgene av oppsett i Engineer og Lenze-kontrolleren og hvilket som ble valgt til slutt. Der er også beskrevet oppsettet til de forskjellige referansemåteodene og hvordan de fungerer. Resultatene av hvert oppsett gjennomgås i kapittel 3. Det viser også de forskjellige sikkerhetsfunksjonene og hvilken konsekvenser det har når disse blir brutt. Til slutt er det en diskusjon i kapittel 4 og alt blir rundet av i en konklusjon i kapittel 5. Vedlagt er et engelsk sammendrag (Vedlegg B) av rapporten med de viktigste funksjonene og en oppstartsguid (Vedlegg C) som kan brukes i lab. Oppstartsguiden inneholder sjekkliste over hva man må gjøre for å kjøre laben. Vedlagt er også en inngangsliste (Vedlegg A) hvor man kan se hvilken måling som tilhører en bestemt inngang. Digitalt ligger der vedlagt TTK4551 Teknisk kybernetikk, fordypningsprosjekt rapporten, Simulink-programmet og Engineer-programmet.



# Kapittel 2

## IPT-Heave Lab

Laben er satt opp i et samarbeid mellom NTNU og Statoil. Laben skal etterligne hivbevegelsene en flytende rigg utsettes for. Målet er å kunne styre BHP ved hjelp av en ventil på toppen av brønnen basert på CBHP versjonen av MPD. Laben består av følgende deler beskrevet i tabell 2.1, og figur 2.1 viser oppsettet.

BHA blir trukket opp og ned i et PVC rør som vist i figur 2.1. Siden nederste stempelstang har mindre diameter enn øverste, vil man få en strømning inn og ut av brønnen. I tillegg danner bevegelsen trykkbølger som blir transportert gjennom vannet i det 900 meter lange kobberrøret, før den treffer ventilen. På kobberrøret er det en trykkmåling for hver 100 meter. Kobberrøret er inkludert for å etterligne tidsforsinkelsen som er i en virkelig brønn. Ved hjelp av mottrykkspumpen og ventilen skal man kunne styre trykket i brønnen.

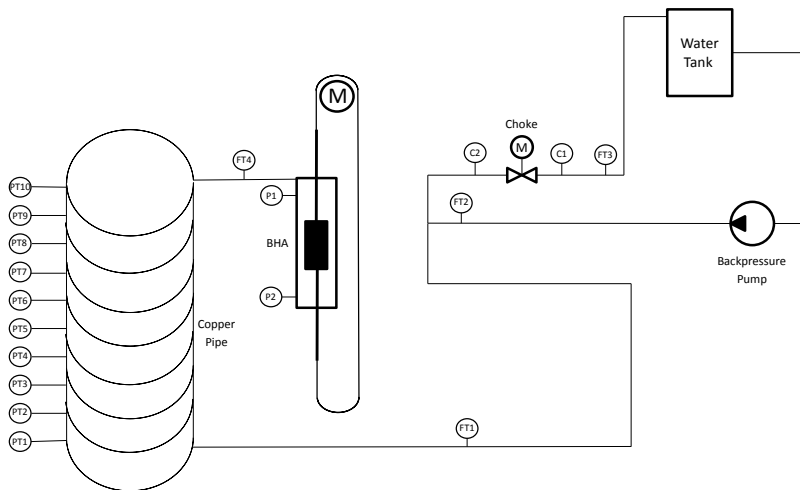
Selve BHA er styrt ved hjelp av MATLAB Simulink via et National Instruments (NI) kort for så å gå til Lenze-kontrolleren. Den er igjen koblet til en Lenze-motor med gir. Lenze-motoren er koblet til et tannhjul og et belte som er festet på både øvre og nedre stempelstang. Beltefestet kan man se i bilde nederst til høyre i figur 2.2. BHA blir dermed trukket frem og tilbake inne i brønnen, som da danner trykkbølgen. BHA har en begrensning på amplituden mellom de to grensebrytere som man kan se nederst til høyre i figur 2.2.

For å bruke laben må start guiden, vedlegg C, leses.

---

Antall	Type	Beskrivelse
2	Lenze 8400 Topline C controller	En for BHA og en for ventilen
2	National Instrument SCB-68 card	En for BHA og en for ventilen
1	Lenze-motor GST03-2M VBR 063C42MF	For BHA
1	Lenze-motor GST03-2M VBR 063C12	For ventil
1	Pumpe	Mottrykkpumpe
1	Undervannspumpe	Pumpe for å sette trykk på innsug til mottrykkspumpen
1	Mean Well, DR-4524	230-24V transformator
1	High density Analog Terminator (unknown manufacturer )	Strøm til Volt omformer
4	Brytere	Aktiverer bit i Engineer
3	Grensebrytere	To for BHA og en for ventilen
14	Trykktransmittere	I Brønn, kobberrør og ventil
4	Strømningstransmittere	Inn og ut av kobberrør og ventil

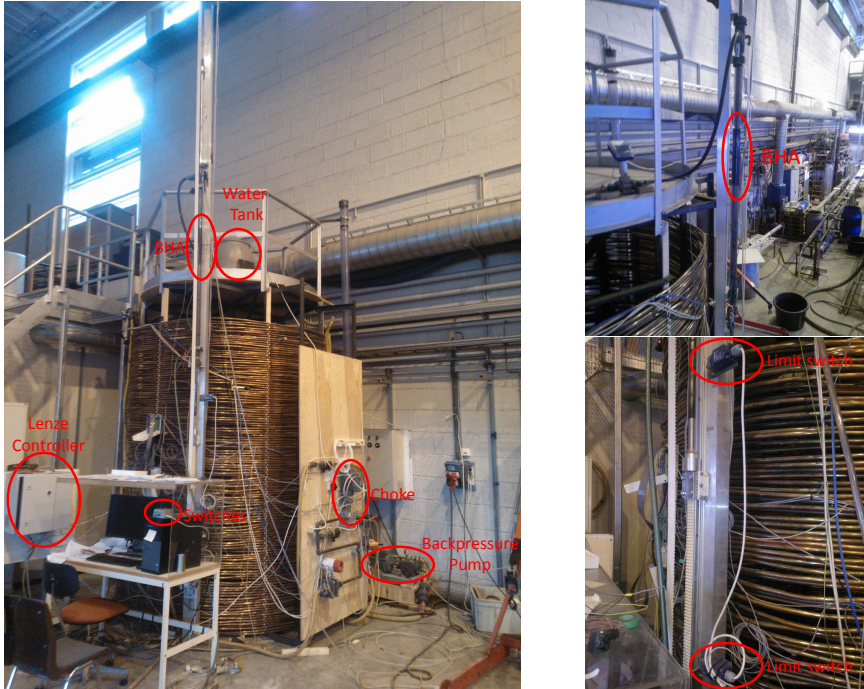
Tabell 2.1: Liste med hardware installert på laben



Figur 2.1: Figuren viser hvordan laben er satt opp. Trykktransmittere P, C og PT. Strømningstransmittere FT.

## 2.1. TIDLIGERE ARBEID

---

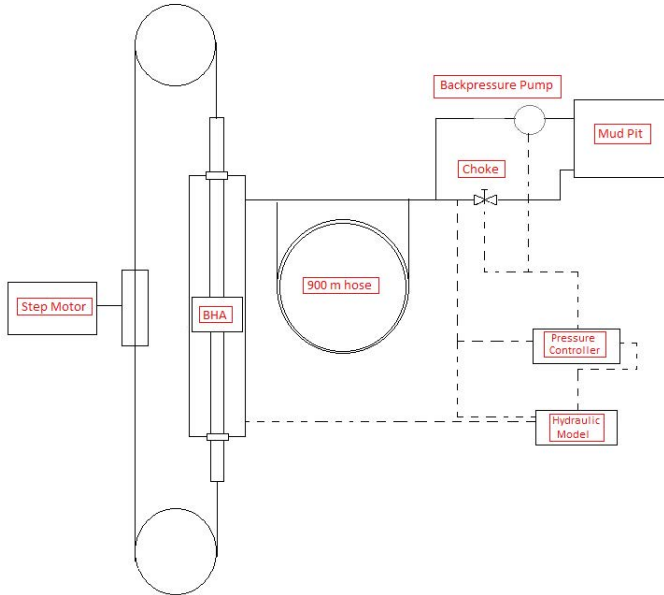


Figur 2.2: Bilder av lab og BHA.

## 2.1 Tidligere Arbeid

Høsten 2011 og våren 2012 hadde to studenter fra IPT, Camilla S. Gjengeseeth og Tollef Svennum, prosjekt om å planlegge og sette opp laben. Deres arbeid ble dokumentert i rapportene [8] [13] [14]. I figur 2.3 vises modellen de utarbeidet under prosjektene, og i figur 2.4 vises brønnen.

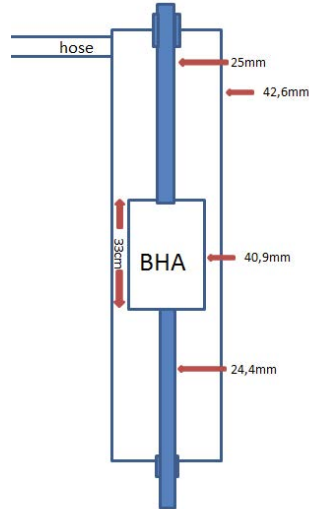




Figur 2.3: Endelige labdesign av Gjengseth og Svenum.

Målene på tegningen i figur 2.4 er nødvendigvis ikke korrekt. Blant annet er nederste stempelstang skiftet ut til en mindre diameter for å få større strøm gjennom kobberøret. Det kan også være at BHA har blitt endret. Svenum hevder i sin rapport i 2012 [14] at BHA måtte byttes. Han laget da tre forskjellige alternativer etter hvilken periodetid man skulle kjøre på BHA. Høsten 2012 jobbet Anders Laupstad Boge med å velge den mest egnede BHA. For mer informasjon se Anders Laupstad Boge sin forprosjektsrapport og masterrapport.

Sommeren 2012 jobbet Espen Øybø med laben. Det er han og Åge Sivertsen som koblet og satt opp alt det elektriske. Øybø satt også opp Engineer og laget et MATLAB script, slik laben kunne kjøres. Den ble kjørt ved å sette ønsket akselerasjon på BHA. Han laget også et plot script med alle konverteringer og skaleringer slik man kunne se resultatet. Det er disse konverteringene og skaleringene denne rapporten har tatt utgangspunkt i.



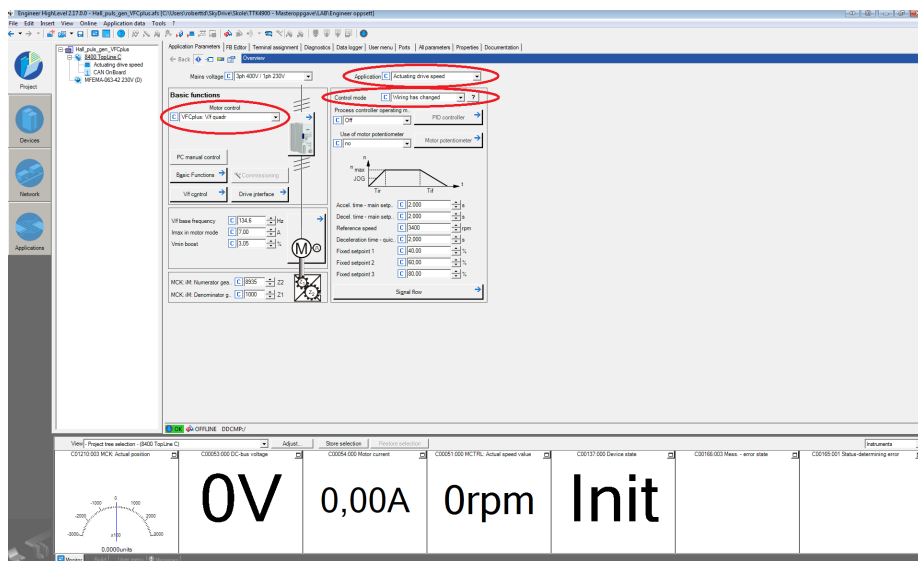
Figur 2.4: Endelig brønndesign av Gjengseth og Svenum.

Høsten 2012 var det flere studenter som arbeidet med laben. Det var fire studenter fra MTTK: Anders Albert, Martin Gleditsch, Jussi Mikael Aanestad og Robert Drønnen. I tillegg Andreas Laupstad Boge og Anish Phade fra IPT. Det ble fordelt slik at tre studenter arbeidet med brønnen (Martin Gleditsch, Robert Drønnen, Andreas Laupstad Boge), mens de tre andre (Anders Albert, Jussi Mikael Aanestad, Anish Phade) jobbet med ventilen. I brønnen ble det blant annet utarbeidet en annen metode for å styre BHA. Det ble skiftet fra en akselerasjonssetpunkt til å sette et posisjonssetpunkt, med tilbakekobling av virkelig BHA posisjon, i Simulink.

## 2.2 Lenze-kontroller og Engineer Software

Laben er utstyrt med to Lenze-kontrollere (en til BHA og en til ventilen) med tilhørende software kalt Engineer. Engineer blir benyttet til å sette opp og endre innstillinger på kontrolleren. I figur 2.5 vises hovedvinduet i Engineer når kontrolleren er valgt.

## 2.2. LENZE-KONTROLLER OG ENGINEER SOFTWARE



Figur 2.5: Figuren viser hovedvinduet av Engineer når kontrolleren er valgt. Røde sirkler indikerer de tre hovedvalgene.

Tre innstillinger må gjennomføres på kontrollerdelen i Engineer. Det er Motor Control (MCTRL), Technology application og Basic drive functions (MCK), markert i figur 2.5. Hver av disse har flere valgmuligheter. De vil bli forklart i kapittel 2.2.1, 2.2.2 og 2.2.3. I tillegg må man blant annet velge motortype, girutveksling o.l.

### 2.2.1 Motor Control (MCTRL)

For oppsett av kontrolleren må man først velge hvordan motoren skal styres. Hvert valg og hvordan det fungerer er beskrevet i kommende avsnitt.

**V/f characteristic control (VFCplus):** Er lik en standard frekvensomformer basert på en simpel og robust kontrollprosess. Metoden passer til å styre asynkrone motorer med lineær eller kvadratisk last. Denne innstillingen passer også i gruppe med flere kontrollere og for å styre spesialmotorer. Siden det er få parameter som må stilles, er V/f characteristic control (VFCplus) rask og enkel

å sette opp. Det er også mulig å bruke en egendefinert karakteristikk. Dette fører til at motoren følger samme karakteristikk hver gang. Ulempen med dette er at man da må inn i Engineer hver gang man trenger en ny karakteristikk [1].

**V/f characteristic control - energy-saving (VFCplusEco):** Denne bruker  $\cos\phi$  til å automatisk redusere effekttapet i den asynkrone motoren (energioptimalisering). Denne metoden bør ikke benyttes om det er brå endringer i lasten fra ulastet tilstand. Dette fordi motoroverbelastning ikke kan bli ekskludert. Energioptimalisering for dynamiske applikasjoner er ikke mulig med denne kontrollmetoden [1].

**V/f control (VFCplus + encoder):** Denne kan bli valgt for å styre asynkrone motorer med hastighetstilbakekobling. Denne metoden inneholder i tillegg en slip-regulator som kan bli parametrisert slik at den virkelige hastigheten blir justert til hastighetssetpunktet [1].

**Sensorless vector control (SLVC):** Er basert på en dekkoblet, separert kontroll av moment og feltprodusert strømkomponent. Den virkelige hastigheten er estimert ut fra en motormodell, slik at en hastighetsensor ikke er nødvendig [1].

Sammenligner en med VFCPlus, gir Sensorless vector control (SLVC) følgende fordeler [1].

- Høyere maks moment gjennom hele hastighetsspennet.
- Høyere hastighetspresisjon.
- Høyere konsentrisitet faktor.
- Mer effektiv.
- Kan implementere momentaktivert operasjoner med hastighetsbegrensning.
- Kan implementere hastighetsaktiverte operasjoner med maksimum momentbegrensning både i motor- og generatormodus.

**Sensorless control for synchronous motors (SLPSM):** Gjelder bare for synkrone motorer. Metoden er basert på en feltorientert kontroll med en høyere hastighetsområde (f.eks.  $> 10\%$  av motorhastigheten). Den virkelige hastighetsverdien og rotorposisjonen blir estimert fra en motormodell. Vanlige bruks-

områder er pumper og vifter, horisontal material håndtering og enkel posisjons-teknologi [1]

**Servo control (SC):** Felt orientert Servo control (SC) er basert på en de-koblet, separert kontroll av moment og feltprodusert strømkomponent. Motor-kontrolleren er basert på en feltorientert, kaskade-kontroller med en tilbake-koblingsfunksjon som medfører en dynamisk og stabil operasjon i alle de fire kvadratene. SC-metoden kan brukes for både synkrone og asynkrone motorer, og gir tilnærmet de samme fordelene som med SLVC. Fordelen med denne er at den vil holde på spenningen når den stoppes, slik at motoren ikke gi etter for eventuell last [1].

### 2.2.2 Technology application

Når Technology application valget er tatt, vil Lenze-kontrolleren sette opp en basisfunksjon ved hjelp av dette valget og valgt MCTRL. Som oftest må man videre inn i Function Block (FB) editoren for å forbedre kontrolloppsettet. Etter at det er gjort, vil en få opp "Wiring has changed" i Technology application, som forklaring at basisoppsettet er endret. Dette valget vil i hovedsak kun benyttes slik at Engineer kan sette opp et utgangspunkt for videre arbeid. Under kommer de tre valgmulighetene med forklaring.

**Actuating drive speed:** Denne metoden skal løse hastighetskontrollerte opp-gaver, eksempelvis transportbånd, presser, test benker, vibratorer, maskin sys-temer og måling [1].

**Table positioning:** Denne metoden skal løse posisjonskontrollerte oppgaver som vanligvis er kontrollert av en kontroller på et høyere nivå ved hjelp av felt-bus. For eksempel transportsystem, dreiebord, lagring- og gjengivelsesenheter, mateenheter, måling og vinsjer [1].

**Switch-off positioning:** Denne metoden skal løse hastighetskontrollerte opp-gaver som krever endebrytere eller stopp på bestemte posisjoner, for eksempel transportbånd. Metoden blir implementert ved å montere endebrytere og koble de på Lenze-kontrolleren [1].

### 2.2.3 Basic drive functions (MCK)

Hvordan kontrolleren skal fungere bestemmes ut fra flere valg. Det er mulig å sette opp flere valg som en kan aktivere med for eksempel en bryter. På den måten kan man for eksempel sette opp kontrolleren til å utføre Homing når en bryter er aktivert, kjøre Speed follower når en annen er aktivert, og ha mulighet for Manual jog om ingen brytere er aktivert. Dermed har man full kontroll på kontrolleren. Under kommer en beskrivelse av hvert valg som er mulig.

**Speed follower:** I speed follower modusen, vil motoren følge et hastighetssetpunkt [1].

**Homing:** Målesystemet blir satt ved hjelp av homing, og nullposisjonen blir satt innenfor mulig vandringsområdet. Nullposisjonen (home) kan bli definert ved hjelp av et referanseprogram, eller ved å sette nullposisjon. Dersom et referanseprogram utføres, vil motoren følge en bestemt rute for å finne nullposisjonen [1].

**Manual jog:** I denne modusen kan motoren kjøres manuelt i begge retninger ("jogging mode"). Det er mulig å endre til en annen hastighet under manuell kjøring. Det er også mulig med tilbakekjøring om grensebryter er aktivert, men da kun tilbake til gyldig område [1].

**Positioning:** Positioning betyr at et arbeidsstykket/-verktøyet blir flyttet fra en startposisjon til en definert destinasjon. For å bruke positioning, må en bevegel-sesprofil bli laget og lagret i kontrolleren, med minst følgende profilparametere:

- Position: Målposisjon eller distanse som skal kjøres.
- Speed: Maks hastighet man ønsker å oppnå.
- Acceleration: Maks akselerasjon man ønsker å oppnå til ønsket fart.
- Deceleration: Maks deakselerasjon til null hastighet.

En profil beskriver en bevegelsesoppgave som kan bli forandret til rotasjonsbevegelse av Motion Control Kernel i Positioning modusen. En posisjonsprosess kan bestå av mange profiler som blir utført i en bestemt rekkefølge.

**Position follower:** I denne modusen følger motoren et posisjonssetpunkt [1].

## 2.3 Oppsett

I dette kapittelet skal det gjennomgås hvordan Lenze-kontrolleren og Simulink er satt opp. Både oppsett for sinus, bølgegeneratoren og riggdata i Simulink vil bli gjennomgått. Videre blir det beskrevet teori og tanker bak hvert oppsett og hvorfor det er satt opp slik som det er.

### 2.3.1 Oppsett Lenze-kontroller

Hovedoppsettet i Lenze-kontrolleren er utført av Espen Øybø, som jobbet med den sommeren 2012. Øybø valgte å benytte Servo control og Positioning som kontrollmetode ved oppsett av Lenze-kontrolleren. I positioning valgte han å kjøre en akselerasjonsoverstyring slik at BHA fulgte et akselerasjonssetpunkt. En ønsket akselerasjon ble satt, noe som medførte at BHA akselererte med en konstant akselerasjon til midten av brønnen. Ved midten startet den å deakselerere med motsatt konstant til den stoppet i andre enden, før den startet å akselerere igjen. Dette førte til at det ble dannet sammenkoblede paraboloider, noe som kan ligne på sinuser, som referanse til BHA.

I dag er Lenze-kontrolleroppsettet litt annerledes. Martin Gleditsch skiftet denne innstillingen høsten 2012 under TTK 4551 Fordypningsprosjekt. Det er fortsatt valgt Servo control, men MCK er endret til Speed follower. Under nåværende prosjektet ble Lenze kontaktet for hjelp til styring av både BHA og ventil. BHA-oppsettet ble ikke endret mye. I hovedsak ble det analoge inngangssignalet fra Simulink forsterket med fire. Det ble påstått at dette også kunne gjøres i Simulink. Det ble utprøvd ved et senere tidspunkt, men viste seg å ikke fungere. Ved å manipulere encoderinngangen fra motoren, ved hjelp av en omformer i Enginner, er posisjonsutgangen manipulert til 0% i bunn, samt 100% i topp. Dette blir så styrt fra Simulink med en utgang mellom 0 og 10V. I Engineer er det originalt satt en begrensning på akselerasjon og deakselerasjon. Denne verdien er satt til to sekund som standardverdi. Det vil si at motoren er begrenset slik at den ikke kan nå topphastighet før to sekunder, det samme gjelder deakselerasjon til null. Denne standardverdien ble endret til null, dermed har ikke akselerasjonen noe begrensning.

For å oppsummere kort blir Servo control med Speed follower brukt som kontrollmetode. I tillegg blir homing benyttet for å nullstille encodere, på denne måten vet Lenze-kontrolleren hvor BHA er i forhold til grensebryterne.

#### 2.3.2 Simulinkoppsett

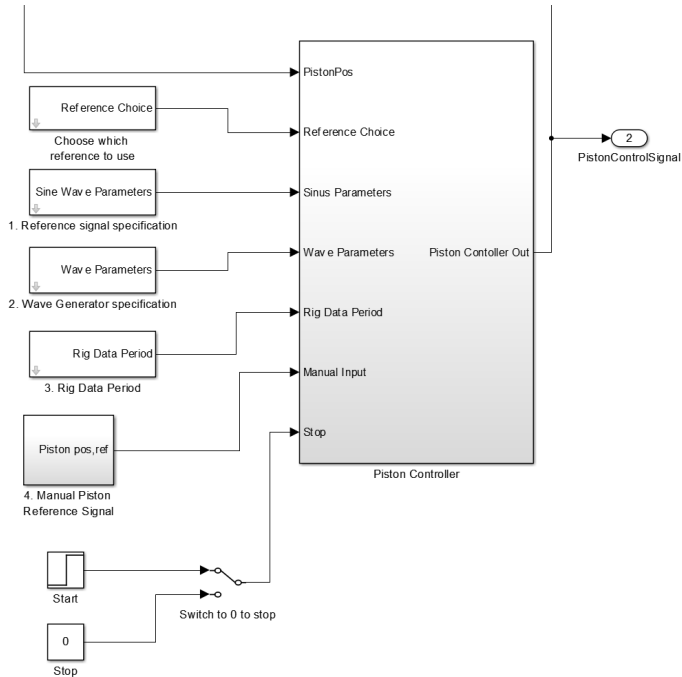
I Simulink bestemmer man en posisjonsreferanse som sammenlignes med målt posisjon. Feilen kjøres ut igjen som en hastighetsreferanse til Lenze-kontrolleren. Med andre ord benyttes en P-regulator med  $P=1$ . Målingen av BHA er i tillegg filtrert med et filter som ligger en dekode til høyre for raskeste sinusen som er tillatt. Dette fører til at målestøy blir fjernet, men målingen faseforskyves ikke nevneverdig.

Som referanse foreligger det fire valg, se figur 2.6. Første alternativet er en ren sinus eller to-tre sinuser summert sammen. Andre alternativet er en bølgegenerator, det tredje er bruk av riggdata som er målt hiv fra en rigg. Det fjerde alternativet er en fri inngang der man kan sette på egen referanse på eget ansvar. Referansevalg velges i Reference Choice blokken i Simulink, hvor 1 er sinus/-er, 2 er bølgegenerator, 3 er riggdata og 4 er åpen inngang. Etter en har bestemt alternativ vil de andre referansevalgene ikke bli utregnet og gir dermed null i verdi. Det er dermed ikke mulig å endre fra en referansemetode til en annen under kjøring.

De to første metodene midtstiller BHA før referansen kjøres, mens Riggdataoppsettet stiller seg inn på første verdien til riggdataene. Grunnen til dette er for å unngå store feil i begynnelsen. De forskjellige referansemetodene tar utgangspunkt i midten av brønnen, mens homingposisjonen til BHA er i bunnen. Dersom BHA ikke hadde blitt midtstilt, ville man risikere rask akselerasjon av BHA, opp til referansen, som medfører stor trykkøkning. På den åpne inngangen er det ikke implementert midtstilling, og dermed må brukeren selv passe på dette.

Det er mulig å holde BHA i ro eller stoppe den under kjøring. Dette gjøres ved å sette en manuell bryter i Simulink til Stop-blokken (figur 2.6), som da gir ut en nullhastighetsreferanse til Lenze-kontrolleren. Derfor er det viktig at denne står på Run-blokken i Simulink slik at det er mulig å kjøre BHA. For at Simulink skal ha tid til å få inn målingen fra BHA, så feilen kan kalkuleres, er Run-blokken tidsforsinket. Dette hindrer stort pådrag i begynnelsen som medfører stor oversving når BHA midtstilles. Dersom BHA stoppes med den manuelle bryteren under kjøring, vil referansen fortsette å gå. Dermed bør Simulink stoppes før bryteren settes på Run-blokken igjen. Dette for å unngå





Figur 2.6: Simulink-diagrammet for BHA er bygd opp som vist. Man kan her se de tre forhåndsbestemte referansevalgene.

at BHA får en stor feil og gi et stort pådrag.

### Sinusbølger

For å starte sinus/-er må man først velge 1 i Reference Choice blokken (Figur: 2.6). I Sine Wave Parameters velger man ønsket periodetid og amplitude på de sinusene som skal være med. Som en sikkerhet er det satt begrensninger på valgene man har. Det er kun mulig å velge en periodetid mellom 3 og 15 sekund, samt maks summert amplitude på 40cm. Dette er nødvendig for å kunne ta vare på laben og for å hindre at den ikke bryter laben sine begrensninger. Om man velger en sinus med amplitude på over 40cm vil den automatisk bli justert til 40cm. Dette medfører at man ikke overskride begrensningen om man kun bruker

### 2.3. OPPSETT

---

en sinus, og en må derfor kun være påpasselig når man legger til en ny sinus. På grunn av trykkbegrensningen i laben bør amplituden reduseres ved bruk av periodetider under 6s.

Begrensningene er gjort slik at en summert amplitude større en 40cm stopper BHA og en feilmelding skrives ut i command window i MATLAB. Det er nødvendig å stoppe Simulink og starte på nytt om dette inntreffer. Periodetidbegrensningene er gjort automatiske. Det vil si at en periodetid under 3s fører til at sinusen blir fjernet, mens en periodetide større enn 15s blir automatisk justert ned til 15s.

For å oppnå kontinuerlig kjøring av BHA, blir både frekvensen og amplituden rampet når den justeres. Dette gir også en rolig og kontrollert start. Om periodetiden til en sinus blir endret under kjøring, vil periodetiden blir rampet opp eller ned til ønsket periodetid. Det samme gjelder amplituden og dersom en velger og sette inn en ny sinus. Dette medfører at referansen ikke blir diskontinuerlig og man får en jevn overgang fra en periodetid eller amplitude til en ny.

### Bølgegenerator

For å bruke bølgegeneratoren som referanse må man velge 2 i Reference Choice blokken (Figur: 2.6). I Wave Parameters blokken velger man dominerende periodetid og bølgeintensitet  $\sigma$ . Den eneste sikkerhetsfunksjonen i bølgegeneratoren er en begrensning (saturation) mellom 3 og 15s. Det medfører at periodetider under 3s blir justert til 3s, mens periodetider over 15s justeres til 15s. Dersom periodetid på bølgegeneratoren skal endres bør Simulink stoppes for å unngå diskontinuerlig endringer. For foreslåtte maksimalverdier, se tabell 2.2.

Random-tallet bølgegeneratoren bruker for å danne bølger blir opprampet for å få en roligere start. Dette medfører at man må gi bølgegeneratoren litt tid i starten før man får ønsket verdier.

Bølgegeneratoren er hentet fra Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control av Fossen [2]. Det er blitt brukt en state space representasjon av et lineært spekter.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{\omega 1} \\ \dot{x}_{\omega 2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_0^2 & -2\lambda\omega_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\omega 1} \\ x_{\omega 2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_\omega \end{bmatrix} \omega \quad (2.1)$$

$$y_\omega = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\omega 1} \\ x_{\omega 2} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

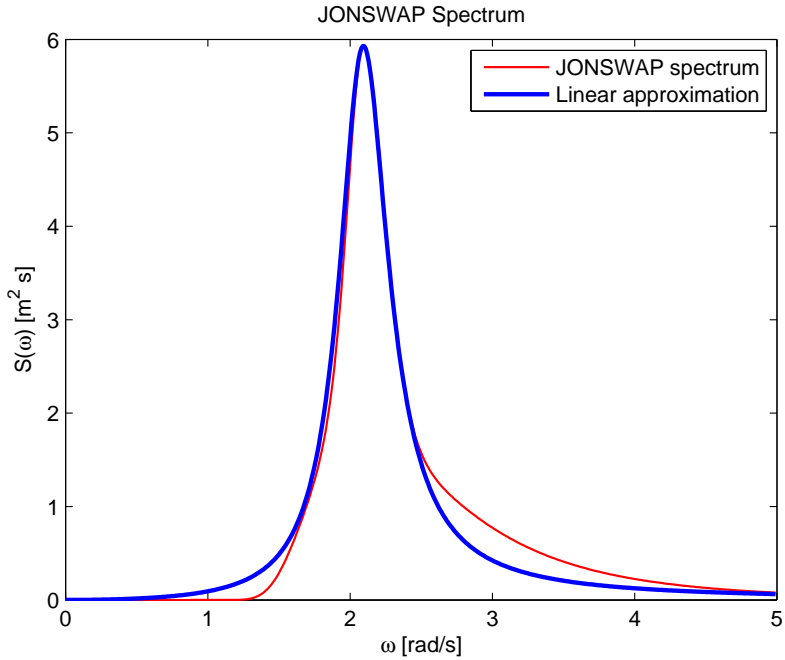
$\omega_0$  er dominerende bølgefrequensen,  $\lambda$  er dempningskoeffisienten og  $\omega$  er hvit støyprosess med null i gjennomsnitt [2].

$$K_\omega = 2\lambda\omega\sigma \quad (2.3)$$

Der  $\sigma$  er en konstant som beskriver bølgeintensiteten [2].

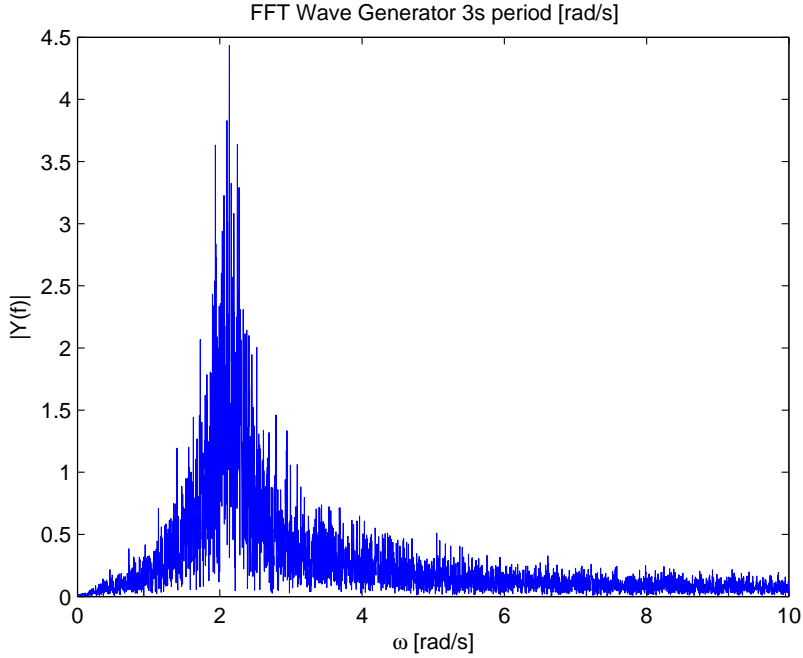
Bølgegeneratoren er basert på JONSWAP spekter, se figur 2.7. JONSWAP var et omfattende måleprogram fra Nordsjøen mellom 1968 og 1969. Undersøkelsen beskriver en ikke fullt utviklet sjø [2]. Det finnes også flere andre spekter, men de blir ikke omtalt her. Ifølge Fossen [2] er dempningskoeffisient  $\lambda = 0.1017$  en god verdi ved bruk av JONSWAP.  $\omega_0$  og  $\sigma$  er parametere brukeren setter selv, mens  $\omega$  er hvit støy som blir dannet av Simulink-blokken Uniform Random Number og er et tall mellom -1 og 1. Random-blokken i Simulink gir ut en bestemt serie av tilfeldige tall. Dette betyr at hver gang Simulink startes på nytt får man de samme tilfeldige tallene i samme rekkefølge. Ved hjelp av Seed parameteren i blokken kan man endre denne serien. For at verdiene i tabell 2.2 skal gjelde, må Seed parameteren være satt til 0.

Steglengden er satt til Variabel Step for å opprettholde hastigheten til Simulink-programmet, slik at det kan bli kjørt i sanntid på lab. Dette fungerer ved at Simulink-programmet blir kjørt flere ganger for hvert samplingsintervall, for så å sammenligne resultatene for å finne optimal steglengde. Hadde en random-funksjon med ny verdi for hver gjennomkjøring under samplingsintervallet blitt brukt, ville Variabel Step hatt problemer med å finne optimal steglengde. Dette ville medført redusert hastighet, eventuelt at fixed step måtte blitt benyttet noe som også er kjent for å redusere hastigheten.



Figur 2.7: Figuren viser JONSWAP spekter og den lineære tilnærmingen. Figur plotet fra kode av Fossen [2].

På figur 2.8 er det kjørt Fast Fourier Transform (FFT) fra bølgegeneratoren. Sammenlignes dette med JONSWAP spekteret i figur 2.7, ser man likhetene mellom de. Dette tyder på at bølgegeneratoren produserer bølger i likhet med det som blir presentert i JONSWAP. Siden JONSWAP er basert på målinger fra Nordsjøen kan man anta at bølgegeneratoren produserer bølger i likhet med forholdene som er i Nordsjøen.

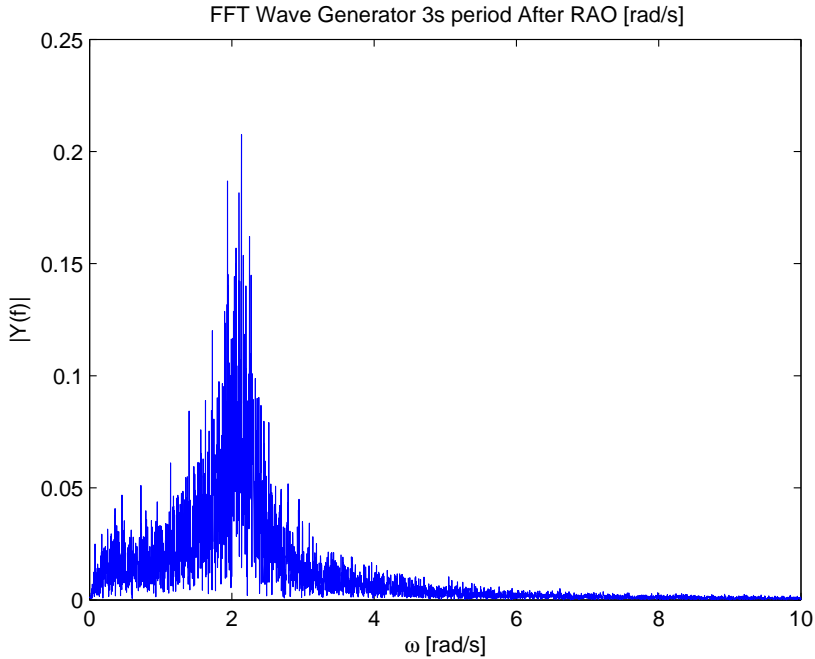


Figur 2.8: Viser FFT av bølgegeneratoren. Sammenlignet med JONSWAP spekteret, figur 2.7, kan man se likhetene.

For å få en mer realistisk riggbevegelse er det lagt inn et lavpassfilter. Lavpassfilteret er mulig å justere selv etter ønsket bevegelse til BHA. I BHA er det noe naturlig demping. Dersom knekkfrekvensen blir satt for langt til høyre vil ikke BHA klare å følge de raskeste frekvensene (se tabell 2.2 for foreslåtte verdier). Figur 2.9 viser FFT fra bølgegeneratoren, filtrert med et filter med knekkfrekvens på 0.1 rad/s. Man ser at filteret filtrer de raskeste frekvensene som ønskelig. Dette fører til at man får en brattere kurve etter den dominerende frekvensen enn hva figur 2.8 viser. Forhåpentligvis vil dette gi en mer realistisk BHA bevegelse.

### 2.3. OPPSETT

---



Figur 2.9: Viser FFT av bølgegeneratoren etter det har blitt filtrert med et filter med knekkfrekvens 0.1 rad/s. Sammenligner man det med figur 2.8 kan man se at filteret fjerner de høyeste frekvensene.

Siden både filter, periodetid og bølgeintensitet kan justeres av bruker, samt at bølgegeneratoren er basert på et tilfeldig tall, er det vanskelig å gi noen konkrete anbefalinger. En må regne med egne justeringer når bølgegeneratoren skal brukes. Tabell 2.2 gir en indikasjon til hvilke maksimalverdier man ikke bør overstige. I listen er det oppgitt en maksimalgrense, der 6s og 15s periodetid er begrenset av hvor ofte BHA går i metning. Det er ikke ønskelig at den skal stå still i topp eller bunn for ofte. 3s periodetiden er begrenset av trykket. Verdien som er foreslått gir opp mot 10 bar og ned mot 0 bars trykk i brønnen.

Verdiene for 3s periodetid er innhentet etter en begrenset periode, dermed risikerer man at bølgeintensitetsverdiene ikke er tilfredsstillende ved lengre tester. Etter erfaring fra vanlige sinuser, der man kan kjøre 6s periodetid med full

amplitude uten at trykkbegrensningen blir brutt, kan man ta utgangspunkt i at det samme vil gjelde her. Det skal derfor være mulig å bruke simuleringer for å finne mest optimal bølgeintensitet ( $\sigma$ ) når periodetiden er mellom 6s og 15s. Dette er tidsbesparende og man kan unngå å ta opp tid i laben for å finne gode verdier. For å finne de anbefalte verdiene i tabell 2.2 med 6s og 15s periodetid, er det derfor simulert over et lengre tidsrom for å kontrollere hvor ofte BHA går i metning.

For å unngå for mange raske frekvenser og stor bølgeintensitetskonstant, anbefales filter mellom 0.1 og 1 rad/s. Alt over knekkfrekvens på 1 rad/s forårsaker en del 'støy' eller raske frekvenser med lav amplitude som BHA ikke følger. På knekkfrekvenser under 0.1 rad/s må bølgeintensiteten være ganske høy for å få store bevegelser på BHA. Dette vises allerede med knekkfrekvens 0.1 rad/s, der bølgeintensiteten må opp rundt 1000 i verdi.

Filter $\omega_0$ [rad/s]	Periodetid [s]	Bølgeintensitet $\sigma$
0.1	3	1100
	6	1000
	15	600
0.5	3	200
	6	200
	15	200
1	3	100
	6	125
	15	150
2	3	75
	6	90
	15	150
5	3	50
	6	60
	15	150

Tabell 2.2: Liste med forslag for bølgeintensiteten ( $\sigma$ ) med bestemte filter og periodetid. Seed parameteren er satt til 0

Om Seed parameteren i Uniform Random Number blir endret, vil man oppnå endret random-verdier. Dette kan medføre at verdiene i tabell 2.2 ikke gjelder,

### 2.3. OPPSETT

---

siden verdiene er innhentet når Seed parameteren er satt til 0. C-compileren er også av betydning, men vil trolig ikke være nødvendig å endre. Det som er viktig når bølgeintensiteten mellom periodetid 6s og 15s skal velges, er at samme C-compiler som blir benyttet i lab blir også benyttet i datamaskinen det skal simuleres på.

For å finne en periodetid mellom 6s og 15s ved hjelp av simuleringer, er den beste metoden å hente ut BHA styringen fra Simulink-programmet. Deretter legges dette inn i et eget diagram for simulering. Det er da mulig å kjøre referansene på en annen datamaskin enn den på laben. Man bør likevel kjøre en kort simulering på laben for å sammenligne og kontrollere at referansene blir lik.

#### Riggdata

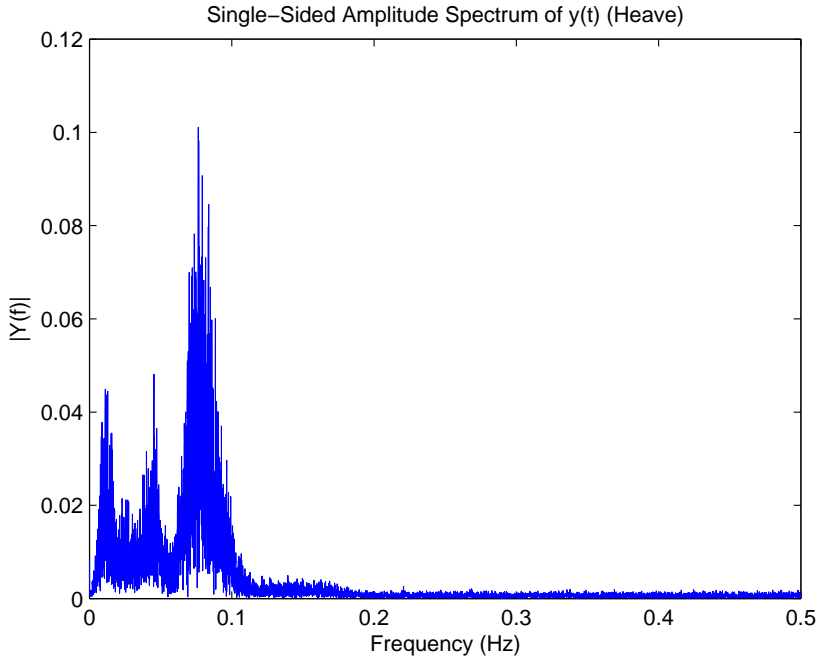
Riggdata-serien er 3 i Reference Choice blokken (Figur: 2.6). I boksen Rig Data Period velger man periodetiden dataserien skal ha. I likhet med bølgegeneratoren 2.3.2 er det kun en saturation på periodetiden som virker som en sikkerhetsfunksjon. Dermed må man stoppe Simulink og starte på nytt om periodetiden skal endres.

Riggdataene er gitt av Marin Cybernetics. Selve dataene er hentet fra en rigg i Nordsjøen. Målingene inneholder målt hiv i meter med ei sampletid på ett sekund. Signifikant bølgehøyde,  $H_s$ , var estimert til 6.8m.

For å bruke dataserien var det nødvendig å interpolere mellom hvert sample, hvor en lineær interpolasjon mellom hvert punkt ble benyttet. Dataserien inneholdt flere like verdier rett etter hverandre, noe som førte til at BHA stoppet for så å akselerere raskt. Dette var nødvendig å fjerne på grunn av at akselerasjonen førte til store trykk som kunne bryte trykkbegrensningen. Dermed ble det siste like tallet erstattet med et midtpunkt mellom de to like tallene og neste tall i dataserien.

For å bruke dataserien i lab, er det nødvendig å skalere den. For å skalere frekvensen er det nødvendig å finne de originale frekvensene i dataserien. Figur 2.10 viser FFT av dataserien. Om man zoomer inn på største toppen i FFT ser man at dataserien har en dominerende frekvens på  $\approx 0.0765Hz$  som gir en periodetid på 13.0719s.



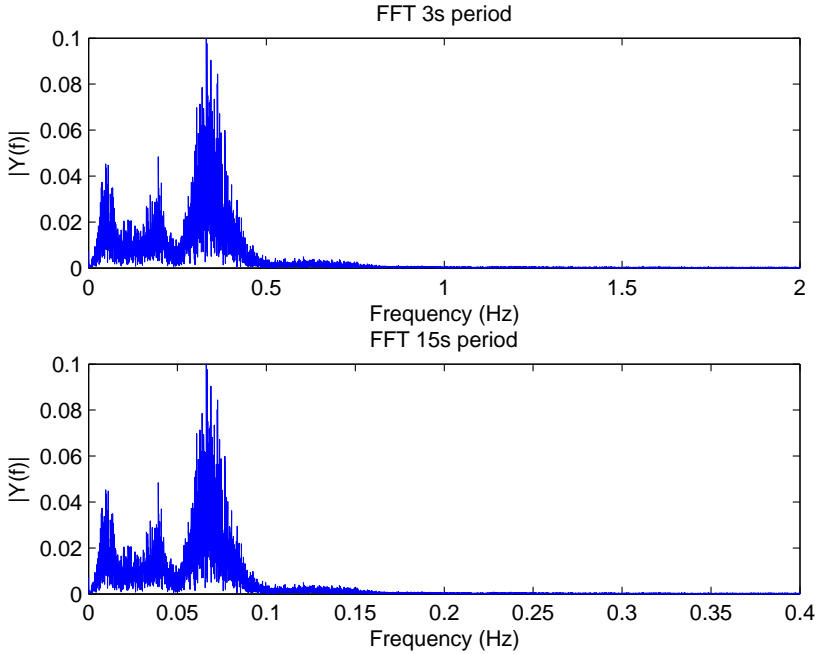


Figur 2.10: Figuren viser FFT-analyse av Riggdata-serien. Om man zoomer kan man se at den dominerende frekvensen ligger på 0.0765Hz.

Skaleringen av frekvensen er avhengig av ønsket periodetid. Periodetiden avgjør hvilken konstant man manipulerer samplingstiden fra dataserien med. Det man i praksis gjør er å bestemme hvor ofte man henter ut et nytt sample, med andre ord strekker eller krymper man dataserien. Dette resulterer i endret frekvens i dataserien. I figur 2.11 kan en se resulterende frekvenser når ønsket periodetid er 3s og 15s. Interpoleringen er gjort for å finne en verdi mellom to punkt i dataserien, da Simulink har et samplingsintervall som er raskere enn intervallet mellom to verdier. Dersom en zoomer på plottene i figur 2.11 vil man se at største toppen er på riktig ønsket frekvens (henholdsvis  $\approx 0.33Hz$  og  $\approx 0.067Hz$ ). Om man sammenligner FFT av original dataserie i figur 2.10 med FFT av de manipulererte dataseriene i figur 2.11, ser man at periodetiden bare forskyver frekvensene lavere eller høyere, noe som også er ønskelig.

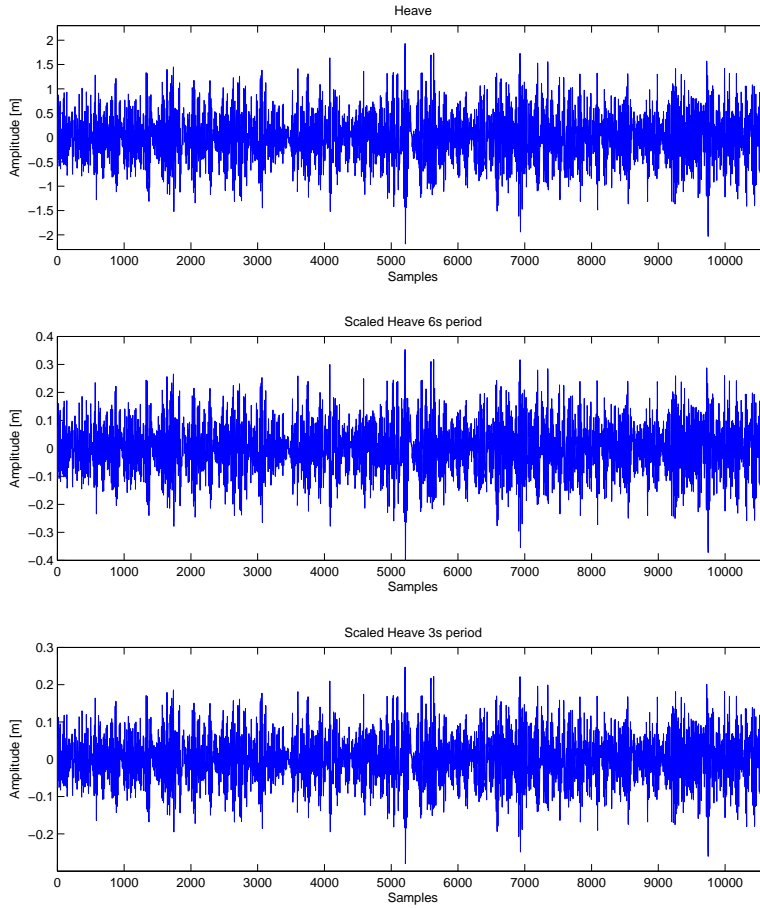
### 2.3. OPPSETT

---



Figur 2.11: Figuren viser FFT av kun frekvensskalert Riggdata, med periodetid på 3s øverst og 15s nederst.

Skalert amplitude er også avhengig av valgt periodetid. Dette er på grunn av at trykket i brønnen blir for stort om man kjører raskest tillate periodetiden og maksimalamplitude. Med en periodetid over eller lik 6s blir største amplituden nedskalert til 40cm, som er maksimalamplitude i lab. Med periodetid på 3s, blir maksimalamplituden nedskalert til 28cm for å havne innenfor trykkbegrensningene. Resulterende amplitude for 3s periodetid ble funnet ved hjelp av tester på lab, mens amplitudene mellom 3s og 6s periodetid er en lineær interpolasjon mellom de. Periodetid 5s og 6s er også testet i lab og viser seg å være gode verdier. Figur 2.12 viser hvordan maksimale amplituden blir redusert fra 2.2m ved original data til 0.4m ved 6s periodetid og 0.28m ved 3s periodetid, plottet langs sampler. Alle andre amplituder blir også nedskalert med samme forhold. Dataserien inkluderer 10650 sampler.



Figur 2.12: Viser interpolert plot fra riggd-data-serien. Øverst graf viser original dataserie, midterste graf viser 6s periodetid, mens nederste graf viser 3s periodetid. Ser at amplituden blir nedskalert fra 2.2 meter originalt, til 0.4 meter ved 6s periodetid og 0.28 meter ved 3s periodetid.

### 2.3. OPPSETT

---

Når dataserien kommer til det siste punktet, vil den automatisk starte forfra igjen. Dette hoppet er såpass lite at det ikke er forsøkt å glatte ut overgangen. Om det er ønskelig å bregne hvor lang tid det tar til siste sample med valgt periodetid, kan man bruke formel 2.4.

$$\frac{10650 \cdot \text{periodetid}}{13 \cdot 60} \quad (2.4)$$

#### **Fri Inngang**

Nummer 4 i Reference Choice blokken i Simulink er Fri inngang (Figur: 2.6). Dette er en inngang der en selv kan legge inn egen BHA-referanse. Da dette er en åpen port eksisterer det ingen sikkerhetsfunksjoner, utenom en saturation-blokk som begrenser referansen mellom 0 og 10V. En cm til V omformer er også tilgjengelig, og en må da passe på at denne implementeres før saturation-blokken. Få sikkerhetsfunksjoner krever at referansene er korrekt. Referansen bør blant annet midtstilles, samt muligens rampes opp, for å unngå brutal start.

#### **Trykkbegrensning**

Trykkbegrensning er den viktigste sikkerhetsfunksjonen som er implementert. Den fungerer uansett hvilken referansemetode som blir valgt. En Simulink-blokk tar inn trykket i brønnen, P1 og P2. Begrensningen er satt til maksimum 10.5 bar og minimum -0.5 bar, siden trykkmålingene inneholder noe støy. Dersom trykket overstiger de tillatte verdiene vil BHA stoppe og ventilen åpnes helt opp før Simulink-programmet stoppes. Dette indikerer at det nødvendig å endre parametrene på referansen før man starter på nytt. Dersom trykket overstiger begrensningen andre plasser i laben, for eksempel i kobberrøret, vil ikke dette føre til stopp. Dette er derimot enkelt å implementere ved et seinere tidspunkt.

# Kapittel 3

## Eksperiment

Det er foretatt en del eksperimenter i laben for å kontrollere referanse- og sikkerhetsfunksjonene. I dette kapitlet gjennomgås hvordan de ulike oppsettene, som er forklart i kapittel 2.3.2 med underkapittel, fungerer i lab. Alle eksperimentene er gjort med 5 bars initialtrykk i systemet ved hjelp av mottrykkspumpen. Se vedlegg C for prosedyre.

### 3.1 Eksperiment med bruk av Sinusbølger

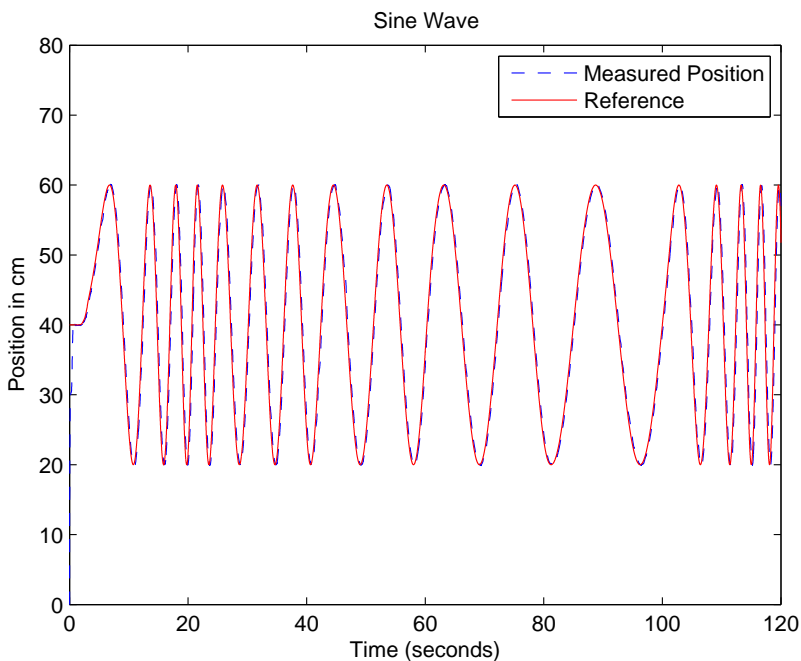
Som beskrevet i kapittel 2.3.2, har sinusoppsettet både sikkerhetsfunksjoner og oppramping av amplitude og frekvens. Noen av de funksjonene vil bli gjennomgått.

#### **Frekvens endring**

I figur 3.1 kan man se hvordan systemet oppfører seg når periodetiden endres. Her starter periodetiden på 3s for så å bli endret med 3 hvert 20 sekund opp til 15s periodetid, før den helt til slutt blir satt direkte ned til 3s periodetid. Figuren viser tydelig at det ikke blir noe diskontinuitet når periodetiden endres. En kan også se at frekvensen ramper seg opp og ned, spesielt på slutten da den ramper seg ned fra 15s til 3s. Amplituden er her satt konstant til 20cm.

### 3.1. EKSPERIMENT MED BRUK AV SINUSBØLGER

---

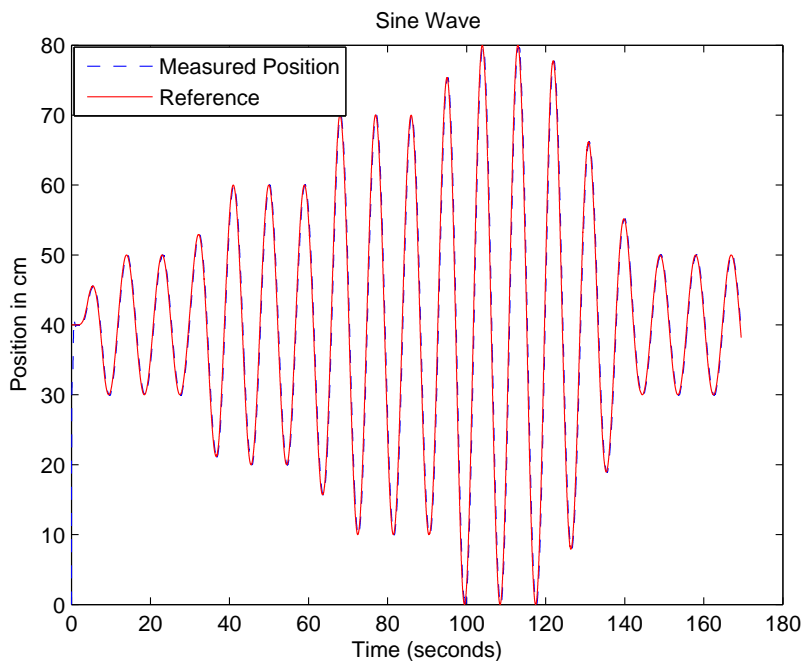


Figur 3.1: Figuren viser hvordan frekvensen ramper seg opp og ned når en endrer periodetiden. Det er ingen diskontinuitet når periodetiden blir endret.

#### **Amplitude endring**

Figur 3.2 viser hvordan systemet oppfører seg når amplitudereferansen blir endret. Her startet amplituden på 10cm for så å bli endret med 10cm hvert 30 sekund opp til 40cm, før den til slutt blir satt direkte ned til 10cm igjen. Selve opp- og nedrampingen av amplituden er satt noe saktere enn normalt for å vise virkningen.

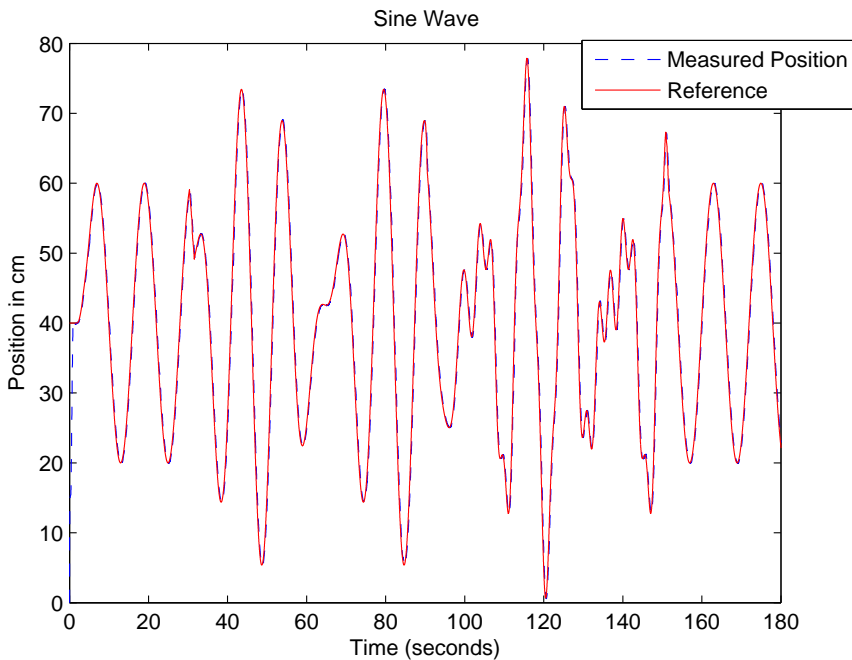
En kan også her se at det ikke blir noen diskontinuitet når amplituden endres, samt se hvordan den rampes opp og ned. Dette er spesielt synlig i nedrampingen fra 40cm til 10cm. Periodetiden er satt til 9s konstant.



Figur 3.2: Figuren viser hvordan amplituden ramper seg opp og ned når en endrer referanseamplituden. Det blir ingen diskontinuitet når amplituden endres.

### To og tre sinuser

På figur 3.3 kan en se hvordan systemet oppfører seg når man legger på en og en sinus. Det er startet med en sinus med periodetid 12s og amplitude 20cm i 30 sekund. Deretter er det lagt på en sinus nummer to, med 9s periodetid og 15cm amplitude fra 30sek til 90sek. Fra 90sek til 150sek er det lagt på en tredje sinus, slik man nå har tre ulike sinuser. Den siste sinusen har en periodetid på 3s og amplitude på 5cm. Etter 150sek er det redusert til en sinus, lik den første. Som man kan se på figur 3.3 er det ingen brå overganger når en endrer antall sinuser. Dette er på grunn av at når man legger til en ny sinus vil perioden alltid rampes ned fra 15s mens amplituden rampes opp fra 0cm til valgte verdier. Når en sinus blir fjernet, vil periode og amplitude rampes fra valgte verdier til 15s periodetid og 0 amplitude. Dette medfører en myk og rolig overgang ved endring av antall sinuser.

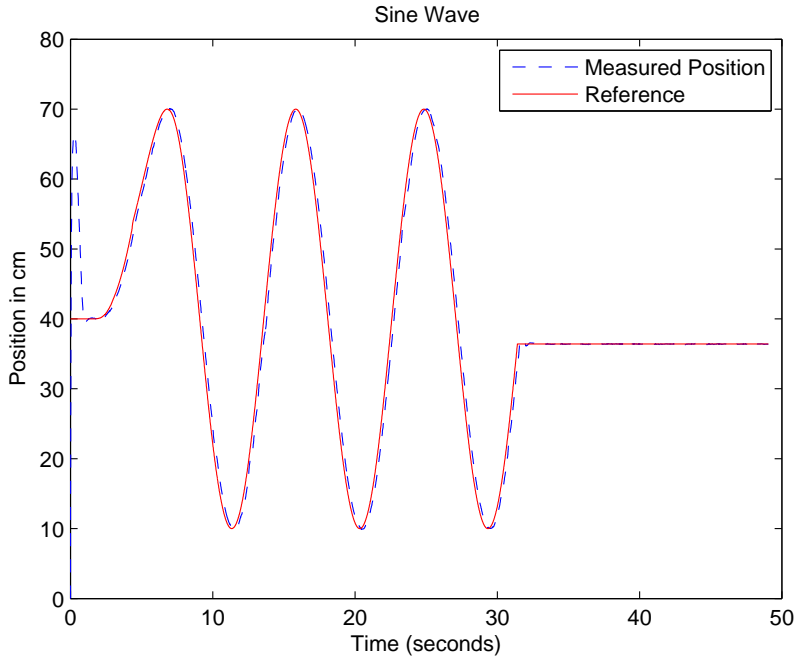


Figur 3.3: Figuren viser hvordan systemet reagerer når en starter med en sinus og deretter legger til en og en sinus før man ender opp med original sinus igjen.

### Amplitudebegrensning

På figur 3.4 ser man hvordan BHA stopper når man velger en sammenlagt amplitude større enn de 40cm som er tillatt. Som nevnt tidligere er det ikke mulig å bryte begrensningen med bruk av en enkelt sinus. Det er dermed nødvendig å sett inn to eller tre sinuser med samlet amplitude over 40cm for at den skal bryte begrensningen. En feilmelding blir skrevet ut i commando vinduet i MATLAB, som varsler brukeren om hva som har skjedd. For å starte BHA igjen, må Simulink stoppes og nye godkjente verdier for amplitudene må velges.

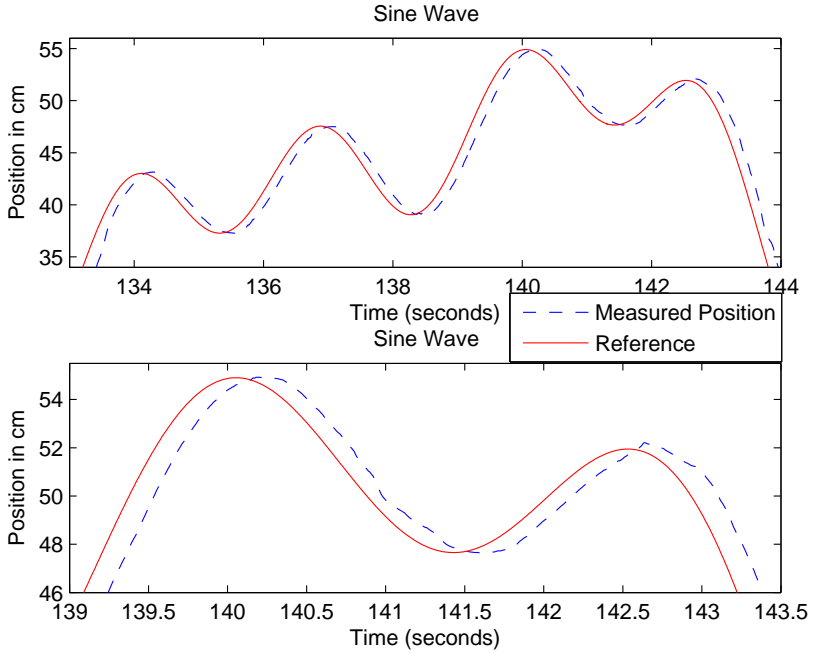




Figur 3.4: Figuren viser hvordan BHA stopper når man velger en sammenlagt amplitude over begrensningen.

### Feil mellom referanse og målt BHA-posisjon

For å vise feilen mellom referansen og målt BHA-posisjon, er det tatt utgangspunkt i figur 3.3. Det er zoomet inn på på tidsrommet mellom 133 og 144 sekund øverst, mens nederst er det tidsrommet mellom 139 og 143.5. Som figur 3.5 viser er ikke feilen nevneverdig stor. En forsinkelse på under 0.5 sekund er innenfor toleransegrensene. Ved store bevegelser kan man risikere en amplitudedempning på ca 3-5mm.



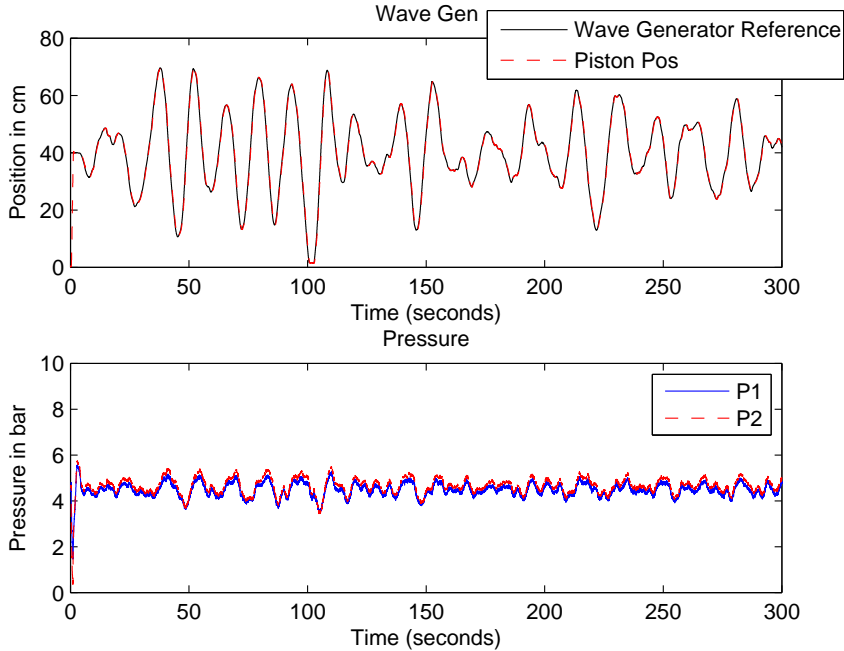
Figur 3.5: Figuren viser feilen mellom referansen og målt BHA-posisjon.

## 3.2 Bølgegenerator som BHA-referanse

Bølgegeneratoren har som nevnt i 2.3.2 få sikkerhetsfunksjoner. Bølgene blir produsert av en state space representasjon av et lineært spekter, basert på hvit støy laget av en random-blokk i Simulink.

Figurene 3.6, 3.7 og 3.8 viser BHA-referansen fra bølgegeneratoren og målt BHA-posisjon med resulterende trykk i brønnen. Det er brukt et bølgegenerator-filter med knekkfrekvens på 0.1 rad/s og har henholdsvis periodetidene 15s, 6s og 3s. Bølgeintensiteten som er brukt, er det samme som anbefalt i tabell 2.2, med gitt filter og periodetid. Figurene er innhentet av en 5 minutters test i laben. Selv om resultatet her er tilfredsstillende kan en oppnå dårligere resultater om laben testes over et lengre tidsrom. Dette gjelder spesielt for 3s periodetiden,

### 3.2. BØLGEGENERATOR SOM BHA-REFERANSE



Figur 3.6: Figuren viser bølgegeneratorreferansen, målt BHA-posisjon og resulterende trykk i brønnen, med 15s periodetid. Filter med knekkfrekvens 0.1 rad/s. Bølgeintensitet 600.

figur 3.8, da denne er begrenset av trykket.

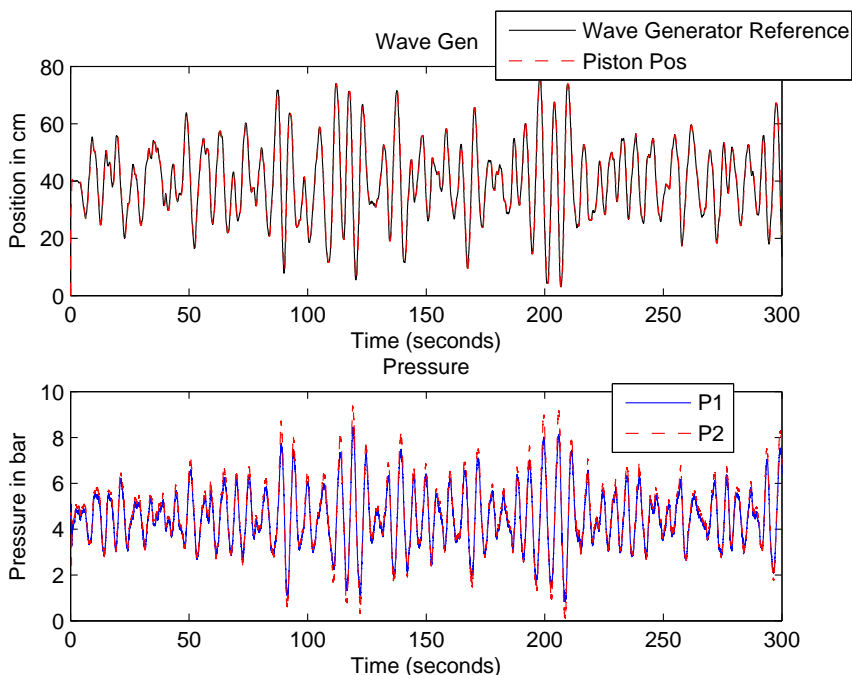
På 3s periodetid (Figur 3.8) kan man se at amplituden ikke når maksimalverdien 80cm, noe 15s og 6s periodetiden gjør. Grunnen til dette er at bølgeintensiteten er begrenset for å ikke bryte trykkbegrensningene i systemet, noe som også er forklart i 2.3.2. Ved 6s og 15s periodetid er det hvor ofte BHA skal gå i metning i topp og bunn som er begrensende. Det vil si at BHA vil stå still ved maksimalamplituden så lenge bølgegeneratoren ønsker en større verdi. Selv om bølgeintensiteten er begrenset ved 3s periodetid (figur 3.8), kan man se at trykket holder seg oppe på samme nivå som ved 6s periodetid (figur 3.7), på grunn av den økte hastigheten. Ved 15s periodetid (figur 3.6) vil trykket ha lav amplitude grunnet den reduserte hastigheten. Dermed er det nødvendig å

### 3.2. BØLGEGENERATOR SOM BHA-REFERANSE

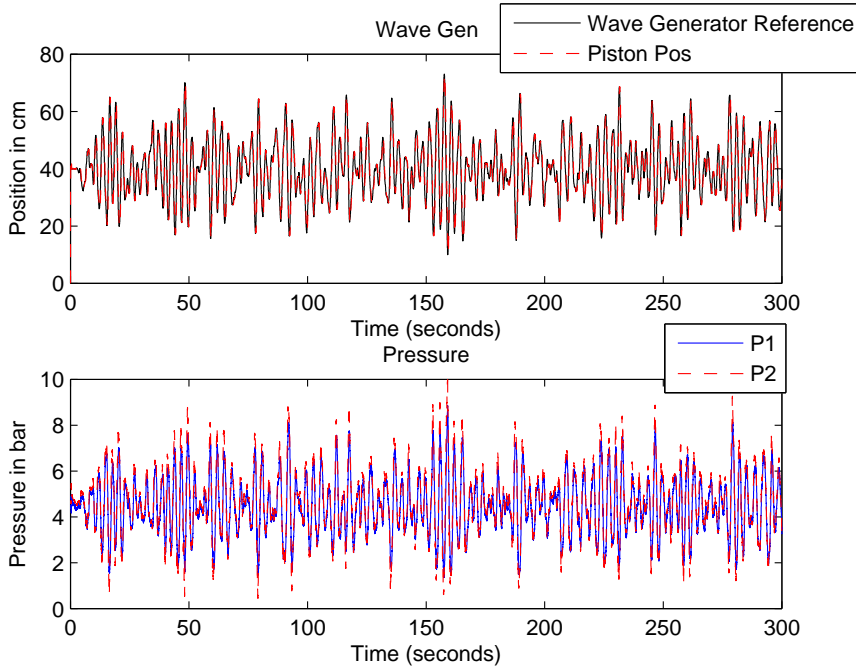
---

ha noe raskere periodetider for å få større trykksvingninger.

Som sagt i kapittel 2.3.2, kjører random-blokken i Simulink ut samme random tidsserie hver gang. Dette er mulig å se når man sammenligner de øverste plottene i 3.6, 3.7 og 3.8, men på grunn av de ulike periodetidene og bølgeintensiteten er det ikke enkelt. Øverst i figur 3.8 kan man også se opprampingen av random-tallet som medfører at bølgegeneratoren også blir opprampet ved sart.



Figur 3.7: Figuren viser bølgegeneratorreferansen, målt BHA-posisjon og resulterende trykk i brønnen, med 6s periodetid. Filter med knekkfrekvens 0.1 rad/s. Bølgeintensitet 1000.



Figur 3.8: Figuren viser bølgegeneratorreferansen, målt BHA-posisjon og resulterende trykk i brønnen, med 3s periodetid. Filter med knekkfrekvens 0.1 rad/s. Bølgeintensitet 1100.

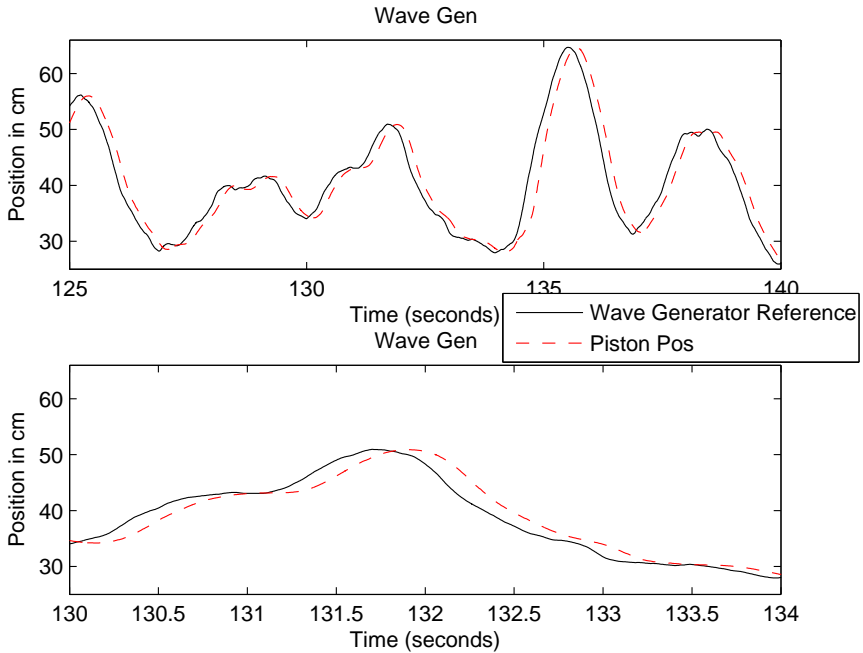
I figur 3.9 vises et utdrag av figur 3.8 for å demonstrere feilen som en risikerer ved bruk av bølgegeneratoren. Som figur 3.9 viser er ikke feilen ved bruk av filter med knekkfrekvens 0.1 rad/s nevneverdig stor. Endres derimot filteret til en knekkfrekvens lengre til høyre, for eksempel 5 rad/s, kan BHA ha noe problem med å følge de raskeste frekvensene og feilen øker. Grunnen til dette er at BHA har noe naturlig demping i seg som medfører at de raskeste frekvensene med lav amplitude blir problematisk å følge, som forklart under kapittel 2.3.2.

Et problem med bølgegeneratoren er at den har en oversving på noen få cm når den har raske bevegelser. Dette fører til at når BHA skal gå i metning i topp eller bunn, trigger den grensebryteren. Dette er enkelt løst ved å sette ned verdien den gikk i metning på. Metningsgrensen er dermed endret fra 0 og 10V

### 3.3. NEDSKALERT RIGGDATA-EKSPERIMENT

---

til 0.2 og 9.8V (tilsvarende 1.6 - 78.4cm), slik at den unngår å treffe grensebryterne.



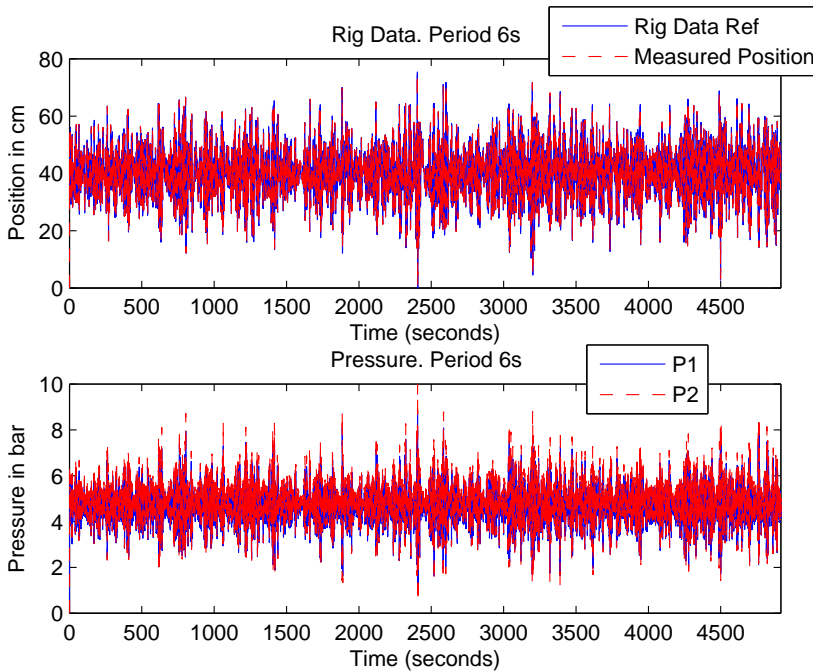
Figur 3.9: Figuren viser feilen mellom bølgegeneratorreferansen og målt BHA-posisjon.

### 3.3 Nedskalert Riggdata-eksperiment

Riggdata har i likhet med bølgegeneratoren få sikkerhetsfunksjoner, som beskrevet i 2.3.2. Riggdata benytter kun den skalerte dataserien hvor man velger periodetid som medfører at en strekker eller kryper dataserien.

Figur 3.10 viser referansen, målt BHA posisjon og resulterende trykk i brønnen, med en periodetid på 6s. Figur 3.11 viser tilsvarende eksperiment, men med en periodetid på 3s. Begge figurene viser en hel dataserie, som er på

10650 sampler. I figur 3.11 må en merke seg at amplituden er redusert på grunn av trykkbegrensningen, som forklart i kapittel 2.3.2. Likevel er trykket tilfredsstillende når man sammenligner med trykket i 3s periodetid med trykket i 6s periodetid (figur 3.11 og 3.10). Dette kan forklares med den økte hastigheten ved 3s periodetid. Med periodetider over 6s vil trykket falle gradvis på grunn av den reduserte hastigheten. Noe som kan sammenlignes med bølgegeneratoren kapittel 3.2, figur 3.6. For å få maks trykksvingninger er det dermed nødvendig med periodetid mindre eller lik 6s. I figurene 3.10 og 3.11 kan man også se at trykket holder seg innenfor de tillatte verdiene gjennom hele dataserien.



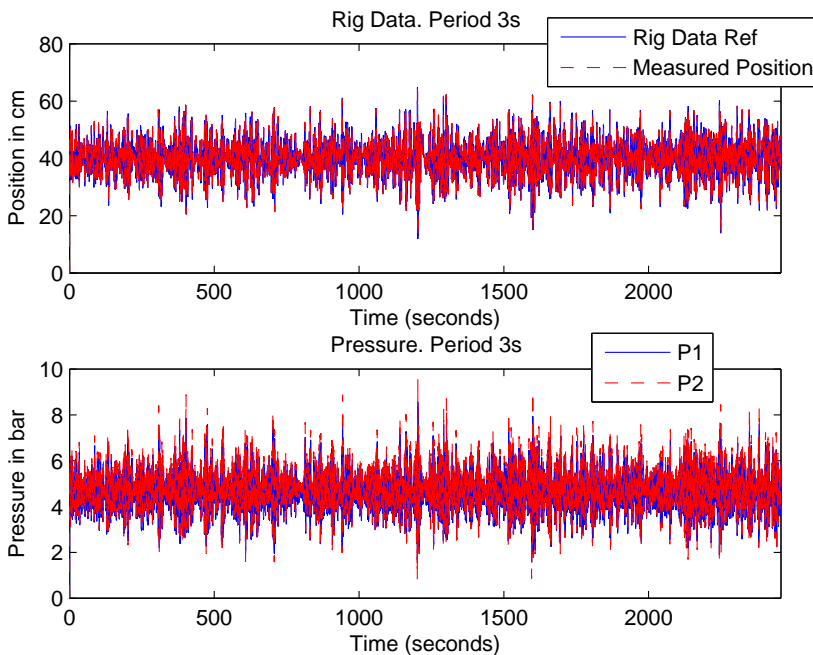
Figur 3.10: Figuren viser Riggdatareferansen og målt BHA-posisjon øverst, samt resulterende trykk i brønnen nederst, med 6s periodetid.

Riggdataserien har enkelte operasjoner som kan være tidkrevende, noe som kan bidra til å dra ned hastigheten til Simulink-programmet. Når Riggdata-

### 3.3. NEDSKALERT RIGGDATA-EKSPERIMENT

---

referansen benyttes blir hele dataserien hentet fra workspace i MATLAB, for hvert sampleintervall i Simulink. I tillegg må det interpoleres dersom et sampleintervall ligger mellom to verdier i dataserien. Da må muligens dataserien søkes gjennom punkt for punkt til den finner de to punktene verdien ligger i mellom. Det vil si at om det er de to siste verdiene som skal hentes, må hele dataserien gjennomkjøres. Det er vanskelig å si om dette kan gjøres på en enklere måte, men en forbedring kan eksistere. På en annen side trenger dette ikke være noe problem og tilbakemeldinger fra de andre deltagerne i prosjektet, tilsier at programmet er hurtig nok.

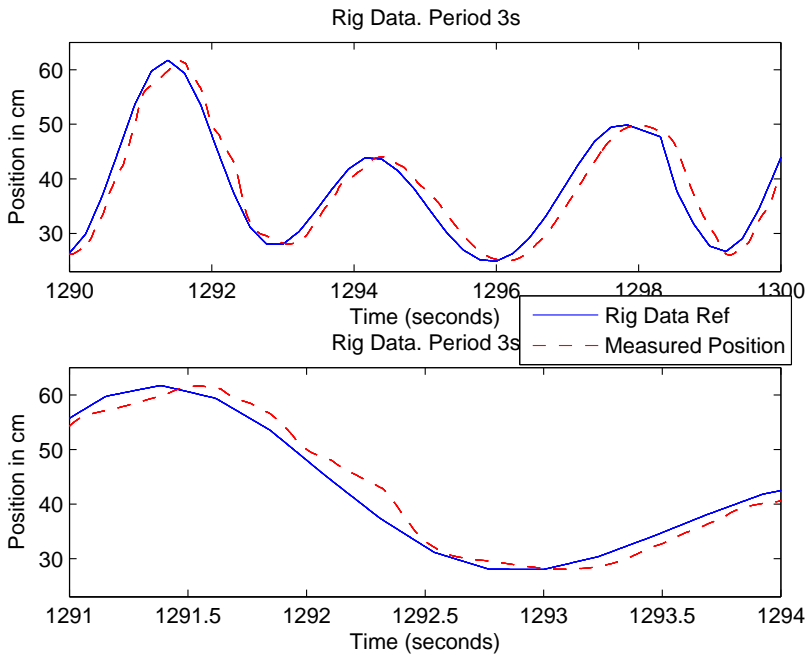


Figur 3.11: Figuren viser Riggdatareferansen og målt BHA-posisjon øverst, samt resulterende trykk i brønnen nederst, med 3s periodetid.

Figur 3.12 viser hvordan BHA følger riggdatabeferansen. Det er et utdrag fra figur 3.11 der periodetiden er 3s. Riggdata har jevne og rolige svingninger som



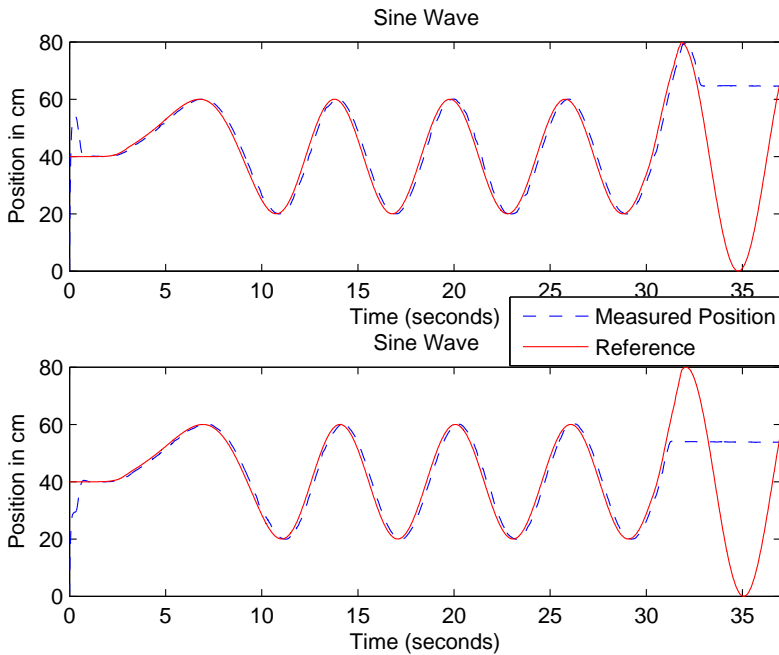
BHA ikke har problemer med å følge. En kan likevel se at BHA beveger seg litt urytmisk i forhold til riggdatareferansen. Dette bør ikke by på noen problemer, da feilen uansett ikke er stor. Det er også mulig å se på figur 3.12 at dataserien ikke er lipschitz kontinuerlig. Grunnen til dette er trolig at dataserien inneholdt to like punkter rett etter hverandre. Det siste punktet ble derfor erstattet med et midtpunkt mellom de like punktene og neste verdi i dataserien, som forklart i kapittel 2.3.2. Likevel ser det ut til at en får en liten diskontinuitet i dataserien, men dette er bedre enn total stopp. Utenom at feilen blir noe større rett i etterkant, har ikke dette stor betydning. Muligens kan dette løses ved å fjerne én av de to like punktene, istedenfor å sette inn et midtpunkt. Eventuelt kan en bruke en kvadratisk interpolering i stedet for en lineær.



Figur 3.12: Figuren viser feilen mellom riggdatareferansen og målt BHA-posisjon, med 3s periodetid. Referansen har jevne svingninger som BHA ikke har store problemer med å følge.

### 3.4 Illustrasjon av Trykkbegrensning

Som nevnt i 2.3.2 er det implementert trykkbegrensning for å bevare laben mot store trykk som kan ødelegge den.

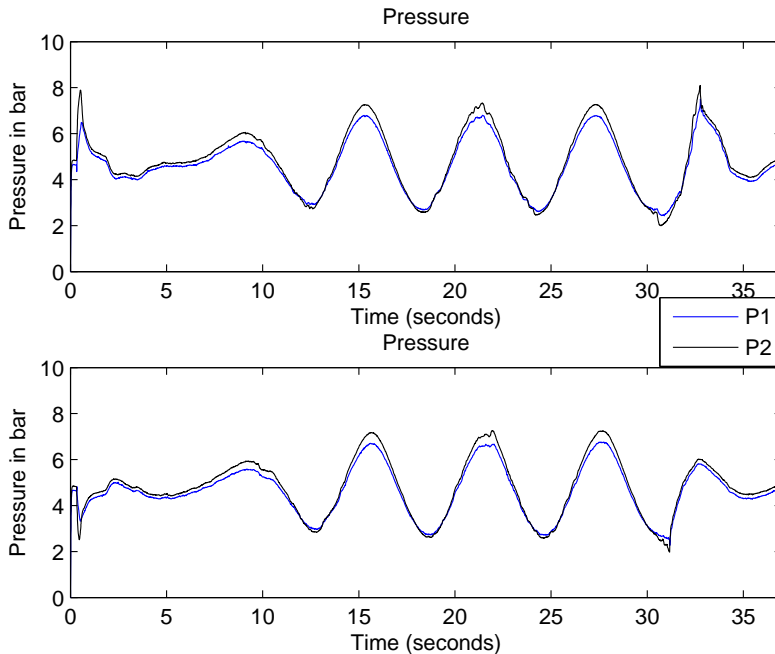


Figur 3.13: Figuren viser to eksperiment om hvordan BHA stopper når trykket bryter den innlagte trykkbegrensningen. Trykkbegrensningen er henholdsvis 8 bar og 2 bar i øverste og nederste graf.

For å vise hvordan trykkbegrensningen fungerer, er oppsettet fra 2.3.2 erstattet med en funksjon der Simulink-utgangen blir satt til 0 når trykkbegrensningen brytes. Trykkbegrensningen er også redusert fra -0.5 til 10.5 bar, til mellom 2 og 8 bar. I figur 3.13 er det først benyttet en sinus med periodetid 6s og amplitude på 20cm, som medfører at trykket ligger innenfor den reduserte trykkbegrensningen. Etter 30 sekund blir sinusen endret til en amplitude på 40cm, noe som

### 3.4. ILLUSTRASJON AV TRYKKBEGRENSNING

medfører at trykket bryter den redusert trykkbegrensningen. På figur 3.14 ser man at trykket øyeblikkelig faller inn i gyldig område. Øverste plottet i figur 3.13 og 3.14 viser når 8 bars begrensningen blir brutt. Mens nederste plotet er et nytt eksperiment som viser når 2 bars begrensningen blir brutt. Eksperimentene er utført på like linje.



Figur 3.14: Figuren viser to eksperiment om hvordan trykket faller innenfor gyldig område når BHA stopper pga. trykkbegrensningen. Trykkbegrensningen er henholdsvis 8 bar og 2 bar i øverste og nederste graf.



# Kapittel 4

## Diskusjon

Et hovedfokus gjennom prosjektet har vært å sørge for at Simulink er hurtig nok til å kjøre i sanntid på laben. Det ble i første omgang brukt Interpreted MATLAB Function, der det var nødvendig å bruke MATLAB-funksjoner i Simulink. Dette ble benyttet for å ha tilgang til skrive- og lese mulighetene til/fra base workspace i MATLAB. Etterhvert som flere funksjoner og referansevalg ble tilført, ble Interpreted MATLAB function for treg. Dermed var det nødvendig å skifte ut så mange av de som mulig. Dette gjøres ved å bruke vanlige Simulink-blokker eller endre Interpreted MATLAB Function til vanlige MATLAB Function som er mye raskere. Forskjellen på de er at MATLAB Function blir konvertert til C-kode på lik linje med resten av Simulink, mens Interpreted MATLAB Function blir værende som et vanlig MATLAB Script. Ulempen med MATLAB Function er at man da ikke får tilgang til base workspace i MATLAB og må dermed bruke andre metoder for å kunne hente ut tidligere verdier som er nødvendig. Dette er løst ved å sette inn en memory-blokk i Simulink, som lagrer verdien i ett tidssteg, for så å kjøre denne inn igjen til MATLAB Function.

Et annet viktig fokus har vært brukervennlighet. Det har vært lagt en del arbeid i å få Simulink oversiktlig, slik det ble enkelt og sikkert å bruke. Det har blant annet blitt lagt vekt på at det skal være enkelt å endre ønsket referanse. Dessverre er det ikke mulig å endre referansemetoder under kjøringen, da dette er ansett som unødvendig. I sinusoppsettet er det fokusert på sikkerhet og at det enkelt skal være mulig å endre både frekvens og amplitude under kjøring. Dermed kan man enkelt finne den sinusen man ønsker som referanse under kjøring, uten unødvendige avbrytelser. I bølgegeneratoren og riggdata har dette

---

ikke blitt prioritert, da det mest sannsynlig er ønskelig å kjøre en lengre test med bestemt periode. Det eneste som er skjult er filteret for bølgegeneratoren, hvor man må finne filteret i subsystemene i Simulink for å kunne endre det. Simulink er naturlig oppbygd og det skal dermed ikke være vanskelig å finne dette.

Både amplitude og perioderampingen i sinusoppsettet, trenger noe tid for å nå satt verdi i starten, samt når de blir endret under kjøring. Dette gir en fin og rolig start, i tillegg til en jevn og rolig overgang fra en amplitude/periodetid til en ny. Etter ønske ble det forsøkt og øke hastigheten på dette, noe som medførte at lave periodetider fort kunne bryte trykkbegrensningene når amplitude og frekvens ble endret fra et setpunkt til et nytt. Dermed ble dette et kompromiss mellom rampingshastighet og hvor ofte trykket skulle bryte begrensningene. Derfor er det nødvendig å være forsiktig når man endrer referansen ved lave periodetider, som mellom 3s og 6s. Kjøres systemet på en 3s periodetid, bør periodetiden økes før amplituden eventuelt økes. Kjøres det med en periodetid på 6s og en ønsker å redusere denne, bør amplituden reduseres før periodetiden reduseres.

Filteret som er implementert på målingen fra BHA ble valgt når BHA kun fulgte sinuser. Det ble derfor valgt en knekkfrekvens på en dekad til høyre for raskeste tillatte sinusfrekvens. Filteret har vist seg og være et robust filter selv om flere referansemeter har blitt lagt til etterhvert, og filteret er dermed beholdt som det er.

Som nevnt i kapittel 3.2 er bølgegeneratorens amplitude begrenset mellom 0.2 og 9.8V på grunn av oversving av BHA. Hvorfor dette skjer er noe uklart, da sinusoppsettet fungerer utmerket med amplitudebegrensning på 0 og 10V. Anser ikke dette som noe problem og mener at bølgegeneratoren er et godt valg som referansemeterode.

Med bølgegeneratoren må man forvente noen egne justeringer av bølgeintensitet når periodetid og filter er valgt (Se kapittel 2.3.2). Ved å benytte verdiene som er anbefalt i tabell 2.2 og noe testing, bør ikke dette ta for mye tid. Når det i tillegg er fullt mulig å simulere optimale bølgeintensitetverdier på perioder ned til 6s, kan man ha alt klart før man går ned i laben. Forhåpentligvis vil det etterhvert eksistere en god modell av laben, slik at man også kan finne gode verdier for periodetider 6s og nedover før man går i lab.

Et annet godt alternativ som referansemeterode er riggdata-oppsettet, som

---

består av virkelige verdier målt fra Nordsjøen. Dette fungerer utmerket og man får en realistisk bevegelse på BHA. Tidsserien er også lang (10650 samples), så selv med en periodetid på 3s får man ca 40 min med data (beregnet ved hjelp av formel 2.4). Dataserien er også meget variert, men det er nødvendig med noe rask periodetid for å få gode trykksvingninger (Se kapittel 3.3). I tillegg starter dataserien på nytt når siste verdi i dataserien er ferdig. Man kan dermed kjøre veldig lange tester om det er ønskelig.

Som man kan se på figurene 3.5, 3.9 og 3.12, har feilen likheter. Man kan se at amplituden ikke blir dempet nevneverdig, dermed er det mest sannsynlig ikke dynamikken til BHA som foresaker feilen. Siden både referansen og målingen må innom mange konverteringen og komponenter er det mest sannsynlig en ren tidsforsinkelse. Blant annet blir referansen fra Simulink først konvertert til et analog signal før Lenze-kontrolleren må konvertere det til et digitalt signal igjen. Målingen går blant annet innom Lenze-kontrolleren før Simulink mottar den. I tillegg filtreres målingen, noe som også bidrar til tidsforsinkelse. Med alt dette summert er det naturlig at målingen av BHA blir tidsforsinket i forhold til referansen. Dette er uansett ganske lite og når man samtidig tenker på at BHA bare skal lage forstyrrelsen til systemet, er en liten tidsforsinkelse ikke noe problem.

Trykkbegrensningen i Simulink er den viktigste delen av sikkerhetsfunksjonene som er implementert for å ta vare på laben. Denne bør derfor ikke endres. Begrensningene er satt til -0.5 bar opptil 10.5 bar for å ta hensyn til målestøy. Dersom trykket passerer en av de begrensningene vil Simulink stoppe. Dette er da en klar indikasjon på at referansen som blir kjørt er for aggressiv, og dermed må parameterne endres.

Oppsettet i Engineer og Lenze-kontrolleren er tilfredsstillende. Forhåpentligvis er det ikke nødvendig å gjøre noen endringer der. Om man likevel må bruke Engineer er det viktig at man ikke endrer på oppsettet. En bør da laste ned oppsette fra kontrolleren, slik at man ikke bruker et gammelt oppsett som ligger på datamaskinen, og dermed endrer oppsette i kontrolleren. Det er spesielt viktig når man skal online med kontrolleren. Et tips i Engineer er å resette feil herifra i stedet for å slå av og på kontrollerne. Dette kan gjøres ved å trykke Go Online, velge kontrolleren, for så å trykke på fanen Diagnostic og trykke Reset error. Dersom en grensebryter er aktivert, må BHA manuelt trekkes vekk fra denne først. For å gå inn i Engineer se vedlegg C.





# Kapittel 5

## Konklusjon

Et viktig punkt i målsetningen til Simulink-programmet var hastighet og brukervennligheten. Eksperimenter utført i lab tilsier at dette er tilfredsstillende. Hastigheten er hurtig nok til å kjøre i sanntid på laben. Simulink er bygd opp naturlig for brukeren og det er enkelt både å endre referanseoppsett og endre parametere til ønsket referanse. Som nevnt tidligere er det bare i sinusoppsettet det er mulig å endre parametrene under kjøring. I de to andre referansemetodene er det antatt at man ønsker å kjøre lengre tester, der man vil unngå å endre periodetid under kjøring og dermed er ikke dette implementert.

I starten av prosjektet var det en del frustrasjon på Lenze-kontrolleren. Det meste av tiden gikk med på å lese dokumentasjon og teste forskjellige oppsett i Engineer. Etter hjelp fra Lenze, endret prosjektet karakter og ble betydelig mer interessant. Lenze satt kontrollere opp på et tilnærmet optimalt nivå, noe som førte til at videre arbeid på kontrollere ikke var nødvendig. Dermed vil en ikke måtte endre på dette i etterkant.

Sinusoppsettet er et sikkert oppsett med frihet og mange sikkerhetsbegrensninger, noe som var ønskelig fra start. Oppsettet er trygt og enkelt, som gjør det mulig å teste ulike regulatorer og virkninger. Det er fulgt mulig å legge til flere sinuser enn de tre som alt er implementert, men noe programmering må da medregnes.

Bølgegeneratoren er en mer tilfeldig og realistisk BHA referanse. Noe planlegging må en regne med da det er mange frie parametere som kan velges. Som

---

nevnt tidligere kan bølgegeneratoren ofte optimaliseres ved hjelp av simuleringer i forkant. Ved hjelp av tabell 2.2 skal en ikke bruke lang tid på å finne riktige verdier. Bølgegeneratoren gir en mer realistisk hivbevegelse som kan forekomme i Nordsjøen. Dette er en fordel når man skal teste kontrollere for BHP. Dermed kan bølgegeneratoren være en god referanse når en skal teste systemet på vanskeligere referanser enn vanlige sinuser.

Riggdata, som er målt hiv fra en rigg i Nordsjøen, er i likhet med bølgegeneratoren en realistisk referanse for BHA. Ved å velge lave periodetider vil man få gode trykksvingninger i brønnen som igjen er mer tilfeldig enn vanlige sinuser. Hovedforskjellen mellom riggdata og bølgegeneratoren er at bølgegeneratoren er mer aggressiv. I tillegg kan trykket i brønnen bli noe lavt ved lengre periodetider med bruk av riggdata. Både riggdata og bølgegeneratoren kan benyttes for mer tilfeldige referanser, noe som gir en eventuell regulator og estimator større utfordringer.

Alt i alt er referansestyringen til BHA ferdig. Dersom en ikke ønsker å benytte noen av de forhåndslaget referansemåteodene kan egen referanse lages og settes inn. Et forslag til forbedring er å lage en realistisk riggmodell som kan erstatte lavpassfilteret på bølgegeneratoren. Dette kan da gi mer realistiske verdier fra bølgegeneratoren som referanse for BHA.

# Bibliografi

- [1] *L-force Drives 8400 Software Manual v.3-0.*
- [2] *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control.* Wiley, 2011.
- [3] D.Hannegan. Case studies - offshore managed pressure drilling. San Antonio, Texas, U.S.A. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. 24-27/9-2006.
- [4] D.Hannegan. Mpd - drilling optimization, risk management tool, or both. Denver, Colorado, U.S.A. SPE Annual Conference and Exhibition. 21-23/2-2006.
- [5] D.Hannegan. Managed pressure drilling, distinguished lecturer series, a “new” way of looking at drilling hydraulics overcoming conventional drilling challenges. SPE 2006-2007 Distinguished Lecture Series, 2006-2007.
- [6] D.Hannegan and K. Fisher. Managed pressure drilling in marine environments. Doha Qatar. International Petroleum Technology Conference. 21-23/11-2005.
- [7] Robert Drønnen. Disturbance attenuation in managed pressure drilling: Mimicking heave-like disturbance in an experimental lab setup. Technical report, MITK, 2012.
- [8] Camilla Sunde Gjengseth. Lab for heave motion during managed pressure drilling. Master’s thesis, NTNU, 2012.
- [9] John-Morten Godhavn. Control requirements for high-end automatic mpd operations. Amsterdam, The Netherlands. SPE/IADC Conference and Exhibition. 17-19/3-2009.

## BIBLIOGRAFI

---

- [10] John-Morten Godhavn, Alexey Pavlov, Glen-Ole Kaasa, and Nils Lennart Rolland. Drilling seek automatic control solutions. Milano, Italy. 18th IFAC World Congress. 28/8-2/9 - 2011.
- [11] J.Saponja, A.Adeleye, and B.Hucik. Managed-pressure drilling(mpd field trials demonstrate technology value. Maiami, Florida, U.S.A. IADC/SPE Conference and Exhibition. 21-23/2-2006.
- [12] Kenneth P Mallow et al. Managed-pressure drilling: What it is and what it is not. San Antonio, Texas, U.S.A. IADC/SPE Managed Pressure Drilling and Unbalanced Operations Conference and Exhibition. 12-13/2-2009.
- [13] Camilla s. Gjengseth and Tollef Svenum. Heave compensated manage pressure drilling: A lab scaled rig design. Master's thesis, NTNU, 2011.
- [14] Tollef Svenum. Lab for heave motion during managed pressure drilling. Master's thesis, NTNU, 2012.
- [15] Øvind Nistad Starnes, Jing Zhou, Glenn-Ole Kaasa, and Ole Morten Aamo. Adaptive observer design for the bottmhole pressure of a managed pressure drilling system. Cancun, Mexico. 47th IEEE Conference on Decision and control. 9/11-2008.

**Tillegg A**

# **List of Input Channels**

---

Input Channel	Name	Description
2	P2	Bottom Pressure transmitter in the wellbore
3	P1	Top Pressure transmitter in the wellbore
4	C2	Pressure transmitter (behind the choke(right))
5	C1	Pressure transmitter (ahead of the choke(left))
6	PT1	Pressure transmitter
7	Water Tank	Water Level
8	PT8	Pressure transmitter
9	PT6	Pressure transmitter
10	PT9	Pressure transmitter
11	PT2	Pressure transmitter
12	PT3	Pressure transmitter
13	PT7	Pressure transmitter
14	PT4	Pressure transmitter
15	PT10	Pressure transmitter
16	PT5	Pressure transmitter
18	FT1	Flow transmitter
19	FT3	Flow transmitter
20	FT2	Flow transmitter
21	FT4	Flow transmitter
27	FT1 direction	Flow direction
28	BHA Velocity	
31	BHA Position	
32	Choke Position	

# Tillegg B

## English Summary

In this short summary there will be a explanation of BHA and how it works. No experiments will be shown.

### B.1 Engineer

During this project Lenze was contacted to help set up the Lenze controller and handle the reference tracking problem we had in the TTK 4551 project last semester. There were no big changes for the BHA. The output from Simulink is gained by four. A converter was inserted in Enginner so the reference signal from Simulink is between 0 and 10V, where 0V is bottom of the well and 10V is the top. The constraints on acceleration and deacceleration in the Lenze controller is also disabled, so the motor can accelerate as fast as possible. In short, the Lenze controller is set to a Servo control with a speed follower as MCK. It is also using the homing to reset the encoders.

### B.2 Simulink

In Simulink you set a position reference, and this reference is compared with the measured BHA position. The error that occurs will be sent from Simulink to the Lenze controller as a velocity reference.. The measured position is filtered

with a filter one decade to the left from the quickest valid sine wave.

In Simulink you have four reference choices. The Reference Choice block allows you to choose the reference you want. Alternative 1 is Sine waves, where it is possible to add one, two, or three sine waves. 2 is the Wave Generator, where one can choose the period and wave intensity. 3 is Heave data, that is measured heave from an oil rig in the North Sea. 4 is an open input where you can add an own made reference on your own risk.

To stop the BHA, you change a manual switch from the run block to the stop block. The stop block sends a zero velocity reference to the Lenze controller. If you change the manual switch to stop when running, you should stop Simulink before you start again, to avoid flying starts.

To avoid big pressures in the lab, there are implemented a pressure safety stop. The safety stop uses the measure in the wellbore P1 and P2 to control the pressure. If the pressure gets below -0.5 bars or above 10.5 bars the BHA will stop.

### B.2.1 Sine Waves

As mention the Sine Waves is option 1 in the Reference Choice block in Simulink. In Sine Wave Parameters you can choose the sine waves amplitude and period. The amplitude is bounded to a total 40cm and the period is bounded between 3s and 15s. If one choose a total amplitude higher than the 40cm allowed, the BHA will stop. If one choose a period higher then 15s it is automatically change to 15s. If one choose a period lower then 3s the sine wave is removed. The BHA also centring itself before it starts to travel.

One of the strengths to sine waves reference is that you can change the amplitude and frequency while running. In addition you can add and remove sine wave as you wish. To avoid discontinuity, both the amplitude and period is ramped up or down when it is changed. This results in a smooth transition between a period or amplitude to a new one.



## B.2.2 Wave Generator

To use the wave generator it is necessary to press 2 in the Reference Choice block in Simulink. In the Wave Parameters block you can choose dominating period and wave intensity  $\sigma$ . The only safe function in the wave generator is a saturation block limiting the period to higher than 3s and lower than 15s. Therefore Simulink should be stopped if you need to change the period. To make a more calm start, the wave generator ramps the random number amplitude when it starts. The BHA, like the sine waves, centres itself before it starts to travel.

The wave generator is taken from the Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control by Fossen [2].

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{\omega 1} \\ \dot{x}_{\omega 2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_0^2 & -2\lambda\omega_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\omega 1} \\ x_{\omega 2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_\omega \end{bmatrix} \omega \quad (\text{B.1})$$

$$y_\omega = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\omega 1} \\ x_{\omega 2} \end{bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

$\omega_0$  is the dominating wave frequency,  $\lambda$  is a damping coefficient and  $\omega$  is a zero-mean white noise process. [2].

$$K_\omega = 2\lambda\omega\sigma \quad (\text{B.3})$$

$\sigma$  is a constant describing the wave intensity [2].

The wave generator is based on JONSWAP. Fossen recommends to use  $\lambda = 0.1017$ . The  $\omega_0$  and  $\sigma$  are parameters the user chooses.

The white noise is made by the Uniform Random Number block in Simulink. The block gives the same series with random numbers every time it is executed. This is done because Simulink is using Variable Step that requires a stable sequence.

After the wave generator a low pass filter, to imitate an oil rig, is implemented. This filter is possible to change if desired.

## B.2. SIMULINK

---

In table C.2 (Start Guide), suggested values are presented. Many variables makes it difficult to recommend these values strongly. Own adjustments may be required. The 3s period is bounded by the pressure in the well. The 6s and 15s period is bounded by how often the amplitude reaches the maximum. Therefore with period between 6s and 15s, one can do simulations to choose the wave intensity  $\sigma$ . For these simulations, make sure you use the same C-compiler as the lab. Period between 3s and 6s must be tested in the lab. If the Seed parameter in the Uniform Random Number or the C-compiler is changed, the values in table C.2 are not valid.

### B.2.3 Heave

The Heave set is number 3 in the Reference Choice block in Simulink. In the Rig Data Period block, one can choose desired period to the rig data. The only safety function implemented, is a saturation block to the period, the same as wave generator. Therefore it is recommended to stop Simulink and start all over again, if the period shall be changed. Before it starts to travel, the BHA is moved to the first value in the set.

The data set includes measured heave movement in meters with a sample time of one second. The estimated significant wave height  $H_s$  was 6.5m.

The data set has been scaled down to lab sizes. From 6s period to 15s period you get the maximum allowed amplitude. From 6s period down to 3s period the amplitude decrease linearly to 28cm because of the pressure constrain in the lab. This is done automatically. To use the Heave set, each sample is interpolated with a linear interpolation. When the set reach its final value, the set starts all over again. To calculate the time to reach the last sample, you can use the formula  $\frac{10650 \cdot period}{13 \cdot 60}$ .

### B.2.4 Open input

The open input is a free input where you can add your own BHA reference. To do this you need to type 4 in the Reference Choice block in Simulink. A saturation block is implemented to make sure that the reference do not cross the 10V constrain in the lab. In addition, a cm to V converter are available if cm as reference is simpler to use instead of voltage. Beyond this, there are no

safety functions at the reference, that means all the responsibility lies with the users. It still have the pressure safety implemented, so if the pressure constrain is violated the BHA will stop.



# Tillegg C

## IPT-Heave Lab Start Guide

### C.1 Startup Procedure

1. Turn on computer. Password: *Espen*.
2. Make sure the BHA does not trigger one of the limit switches and that there is water in the water tank, see appendix C.7. If necessary pull the BHA away from the limit switch, see appendix C.4.
3. Make sure the manual valves are set in desired positions, fig. C.1.
4. Turn on the Lenze controller with the switch on the electrical cabinet (placed to the left for the computer). Make sure the socket to the NI cards is plugged in (placed below the computer), fig. C.2.
5. Home the BHA by using the switches on the switch-box, procedure described in appendix C.6.
6. Turn on the feedpump and backpressure pumps, fig. C.3. Pressurize the system if desired by the procedure described in appendix C.8 or appendix C.9.
7. Choose desired reference for the BHA. It is set in the *Reference Choice* block in Simulink (fig. C.12) and choose the parameters in the chosen reference category. If a custom BHA reference is made, be sure it is correct, appendix C.12.
8. Choose desired input for choke, see appendix C.13.

9. Turn controllers for BHA and choke on.
10. Press the start button in SIMULINK.

## C.2 Shutdown Procedure

1. Stop the SIMULINK model
2. Store the results from experiment using MATLAB command `save('filename.mat')`.
3. Turn off BHA and choke controller by flipping all the switches down, except the enable controller switch which shall be flipped up. Shown in fig. C.7.
4. Turn off feed and backpressure pumps, fig C.3.
5. Turn off the Lenze controller with the switch on the electrical cabinet
6. Turn off computer

## C.3 Warnings

- Make sure the manual valves *MV5* and *MV6* are open when the pumps are running. Closing them could lead to rapid pressure increase and damage to equipment and personnel. Fig. C.1
- Do not change the reference choice for the BHA while running
- If wave generator or rig data is selected as reference signal for the BHA, do not change the parameters while running
- Pay attention to the pressure while running, the choke may cause big pressure rises in the system.
- Pressure in the system should not exceed 10.5 bars or be below -0.5 bars. The pressure transmitters are measuring gauge pressure and a measurement below -1 bar will indicate vacuum. Both a pressure exceeding 10.5 bars and vacuum may be damaging to the system. In the well these limits are ensured by a control box in the SIMULINK model that will stop the simulation if the limits are exceeded.

## **C.4 Pull BHA Away from Limit Switch**

The BHA is connected to a lower and an upper rod. These rods are connected to a sawtooth belt, which is controlled by an electrical motor. To ensure that the electrical motor does not attempt to run the BHA out of the PVC tube, two limits switches have been installed. Triggering one of these will lead to the motor being locked. To reset a limit switch see appendix C.5. The setup is shown in fig. C.4. If the end of the lower rod connected to the BHA is triggering the lower limit switch the BHA needs to be pulled away. To do this first make sure that the controller for the BHA is turned off and that the power of the electrical cabinet is switched to off. Then grab the sawtooth belt and physically pull until the end of the lower rod is clear of the lower limit switch.

#### C.4. PULL BHA AWAY FROM LIMIT SWITCH

---

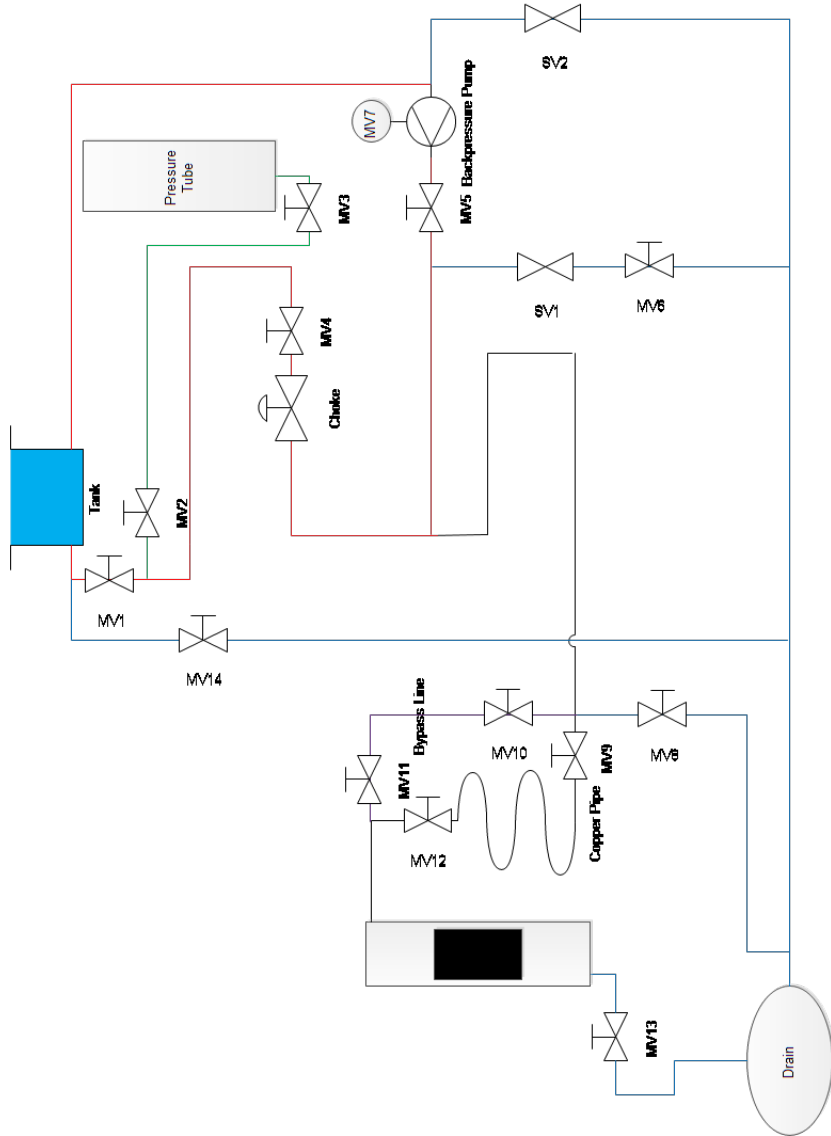


Figure C.1: The manual valves enables multiple flow paths for the system. In addition MV4 enables to manually close the choke. MV6 should always be open when the backpressure pump is on.





Figur C.2: Socket for NI cards

## C.5 Reset Limit Switch in Engineer

There are two ways to reset the limit switch. It can be done in the software Engineer or the Lenze controllers must be shut down and restarted.

To reset the errors in Engineer, follow this procedure:

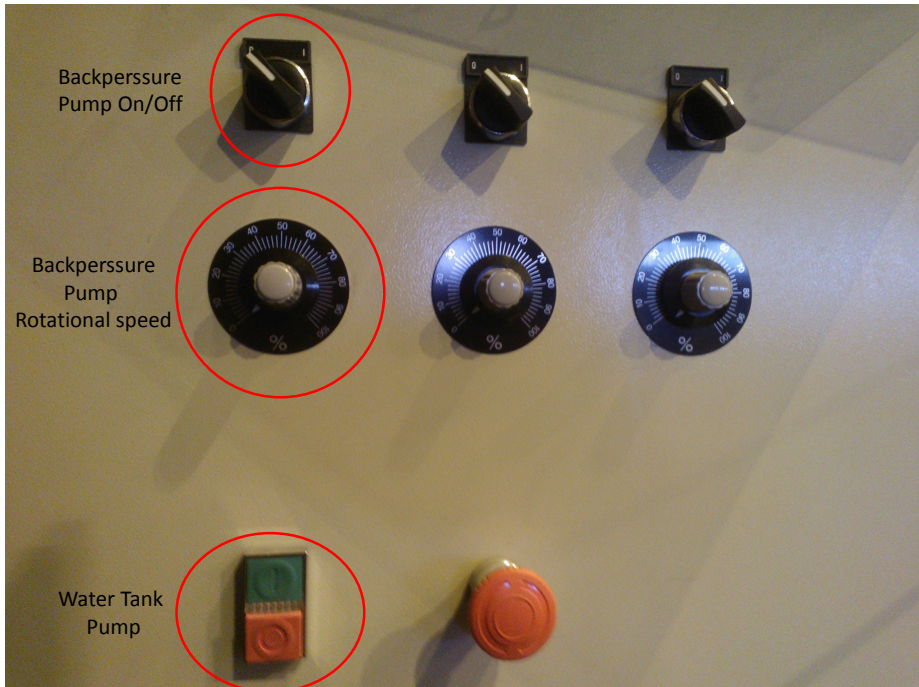
1. Plug the the network cable into the controller you want to access the setting for (BHA/choke). See fig. C.5.
2. Startup Engineer by double clicking on the *L-Force Engineer HighLevel* icon on the desktop
3. In the startup screen you get the choice between opening an existing Engineer project or make a new project. Select open an existing project.
4. For the choke, choose *LE1\_Anders* and for the BHA choose *LE2\_Anders*.
5. Once the project is opened up click the *Go online* button (marked in fig. C.6). Your screen should now look like fig. C.6.
6. You are now ready to make changes in the software for the controller.

Once Engineer is online, the limit switch can be reset:

1. Turn off the controller by flipping the *Enable controller* switch on the control box.

### C.5. RESET LIMIT SWITCH IN ENGINEER

---



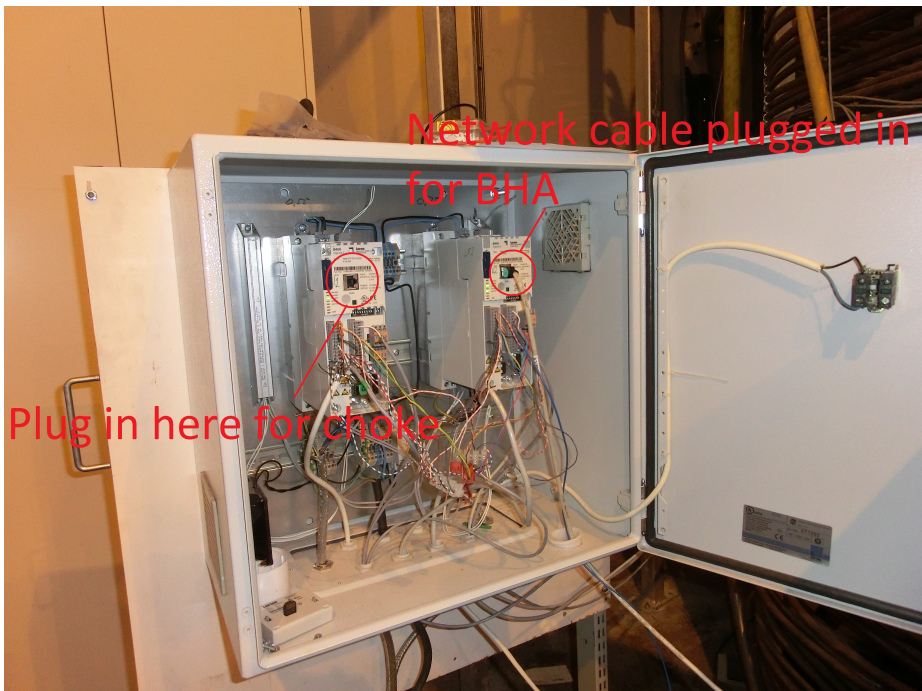
Figur C.3: Electrical cabinet to the feed and the backpressure pump. To turn them on first hit green button to turn on the feed pump. Then flip the switch on top, to turn on the backpressure pump. The scroll wheel enables adjusting the rotational speed of the backpressure pump. The pumps are turned off by first turn the scroll wheel to 0 %, flip the top switch to zero and hitting the red button (not the emergency stop)



Figur C.4: BHA with limit switches marked.

*C.5. RESET LIMIT SWITCH IN ENGINEER*

---



Figur C.5: How to plug in network cable

C.5. RESET LIMIT SWITCH IN ENGINEER

The screenshot displays the SIMATIC Manager software interface. At the top, a red banner reads "Go online" and "Download to controller". The main window shows the "Basic functions" tab with various drive parameters. A table at the bottom right lists several parameters:

0,06Hz	320V	0,72A	0rpm	OperationEnable	No Fail	00.0000.00000
--------	------	-------	------	-----------------	---------	---------------

The interface also shows a "Parameters" list on the right side of the main window, including items like "Digital outputs", "Analog outputs", and "Motion Control Kernel".

Figur C.6: Startup screen loaded project

Enable the Lenze Controllers	UP=OFF, DOWN=ON
Homing/Run (B2)	UP=Run, DOWN=Home
BHA (B1)	UP=ON, DOWN=OFF
Choke (B0)	UP=ON, DOWN=OFF

Tabell C.1: Switches on controller box

2. Pull the BHA away from the limit switch, see appendix C.4.
3. In Engineer click on the *Diagnostics* tab.
4. In the lower right corner there should be a button called *Reset Error*. Click this button
5. The status display at the bottom called *C166/3 Mess. - error state* should now change from *Ck02: Neg. HW-LimitSwitch* to *No Fail*.

## C.6 Homing Procedure

To use the BHA and the choke, a homing procedure must be performed. This enables the controllers to find their starting location. Figure C.7 shows the control box for the BHA and the choke. The different options for the controller are described in table C.1. Homing procedure:

1. Enable the controllers by flip the lower left switch down.
2. Make sure *B2* is flipped down. This keep the controllers in homing mode.
3. Flip *B1* and *B0* up to perform the homing procedure for the BHA and the choke.
4. Wait until the BHA and the choke has reached their positions and stopped moving.
5. Flip *B1* and *B0* back down again
6. Flip *B2* up to enable run mode and flip *B1* and *B0* to set BHA and choke in ready. The BHA and the choke are now ready to take input from SIMULINK.

The last step should not be performed before the experiment is ready to run. When the controllers are in homing mode the motors are locked. However if the BHA is in run mode, it will start to move downwards due to gravity. After



Figur C.7: Manual switches for control of the BHA and choke.

## C.7. FILL WATER IN THE TANK

---



Figur C.8: Tank

homing the BHA is close to the lower limit switch and it will not take much time before the lower limit switch will be triggered. If the limit switch gets triggered the BHA needs to be pulled away (appendix C.4) and the limit switch needs to be reset (appendix C.5). Waiting to put the controllers into run mode will prevent this.

The motors can also be locked in between experiments to avoid the BHA moving downwards towards the lower limit switch. This done by flipping the *enable controller* switch up to off. As long as the electrical cabinet power is turned on, it is unnecessary to perform a new homing procedure before running experiments. When a new experiment is ready just remember to flip the *enable controller* back down again.

## C.7 Fill Water in the Tank

The tank is located at the top of the copper pipe. The water level should be as shown in fig. C.8. If it is below this level, the crane should be turned on. Figure C.9 shows where the crane is and how to turn it on and off. After the crane has been turned on and water starts to flow out through the drain, the crane should be turned off.





Figur C.9: Crane

## C.8 Pressurize System with Backpressure pump

In order to perform certain experiments, it might be desirable to pressurize the system. There are multiple ways of doing this, but the simplest way is as follows:

1. Open the choke and make sure MV4 and MV5 are open. MV7 should be closed
2. Set the Backpressure pump to desired velocity.
3. Set the choke opening in SIMULINK that corresponds to the desired pressure in the system.

It is also possible to use the MV4 or MV7 to pressurize the system.

## C.9 Pressurize System with Pressure Tube

If one desires to perform experiments on the pressurized system without the backpressure pump running, then the pressure tube should be used. This tube is positioned upright and is approximately 4m long with an inner radius of around 4cm. It is filled partially with water and partially with air. The tube is pressurized with an air compressor which is connected to the top end of the tube. The pressure setpoint is set to 5bar (gauge) as default. In order to use the pressure tube instead of the backpressure pump to pressurize the system, the following steps should be performed:

*C.9. PRESSURIZE SYSTEM WITH PRESSURE TUBE*

---



Figur C.10: Backpressure pump with the pressurizing valve.

1. Make sure there is at least some water in the pressure tube. If the water level is too low, we risk that the air leaks from the tube and into the rest of the system. This may alter the system behavior and skew our results. If there is no water in the system, perform the steps in appendix C.10 before performing the following steps.
2. If there is enough water in the tube, it is important that the following manual valves are closed in order to prevent leaks from the system: MV5, MV6, MV1.
3. Once these valves are closed, one may open manual valves MV2 and MV3.
4. In addition, the pressurized air inlet to the pressure tank should be opened.

Once these steps are performed, the system should be set up to a pressure setpoint of around 5bar. Once the testing is completed, perform the following steps in order to switch back to the original setup. For safety reasons, this should always be done.

1. Shut the manual valves MV2 and MV3
2. Open manual valves MV1, MV5, MV5.
3. Refilling the Pressure Tube

## **C.10 Refilling Pressure Tube with Water**

If the water level in the pressure tube is not sufficiently high, we need to refill it with water. This is most easily done by using the backpressure pump. In order to do this, the following steps should be performed:

1. For safety reasons, make sure the following manual valves are open: MV6, MV5, MV1.
2. Make sure the following manual valves are closed: MV2, MV3.
3. Turn on the backpressure pump to around 30% power.
4. Gradually close MV1 until the manometer on the backpressure pump shows approximately 7bar. Leave MV1 in this position. Now water should flow up into the water tank above MV1, whilst the pressure in the system is higher than that in the pressure tube.

5. Open MV2.
6. Gradually open MV3 until the desired water level is reached. A water level of 30cm should be sufficient provided that there is no significant leak in the system.
7. Close MV3.
8. Open MV1 and turn off the backpressure pump.

## C.11 Removing Air from System

Inevitably some air will find its way into the system. To remove this air the system should be pressurized (appendix C.8 or appendix C.9) and the red bottom close to the piston, marked in figure C.11, should be pushed.

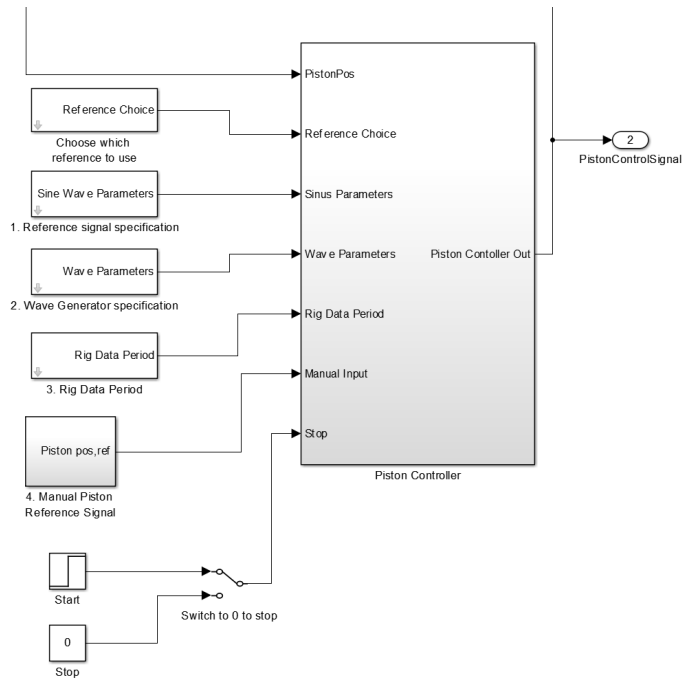
## C.12 BHA SIMULINK

A controller for the BHA is made in SIMULINK. This controller has four choices for reference signal (the choice is specified by number in the *Reference Choice* block shown in fig. C.12):

1. *Sine Wave Parameters*: This enables the user to set a reference signal as a combination of 1-3 sine waves.
2. *Wave Parameters*: This set the reference signal to follow a generated series of waves based upon a JONSWAP spectrum with user defined parameters. See table C.2 for proposed values. The filter is found in the subsystems for the Piston control.
3. *Rig Data Period*: This sets the dominant reference signal to follow a scaled down real rig series. The user specifies the dominate wave period of the wave series.
4. *Manual Piston Reference Signal*: This enables the user to set a manual reference signal for the choke. The signal should be between 0 and 80 cm, where 0 cm = bottom of well, 80 cm = top of well.
5. *Stop*: The BHA can be set to rest in case it is desired to only run the choke for example.



Figur C.11: Button for Releasing Air from the System



Figur C.12: BHA SIMULINK with three prefabricated reference choices.

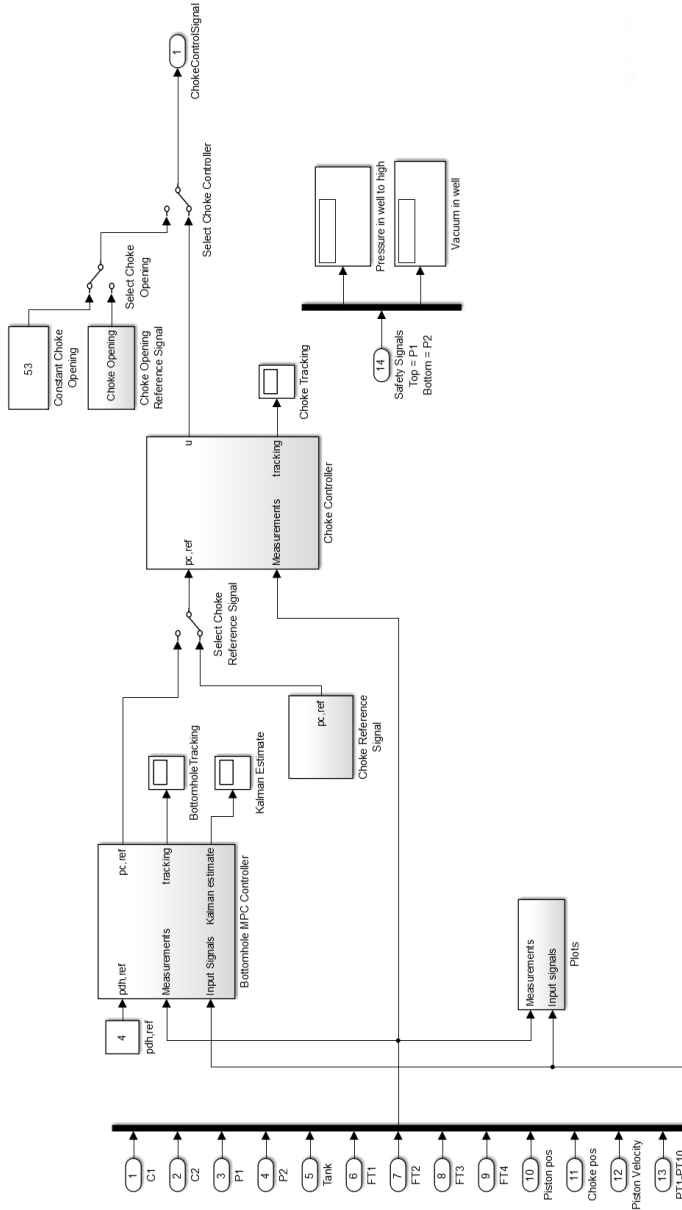
Filter $\omega_0$ [rad/s]	Period [s]	Wave intensity $\sigma$
0.1	3	1100
	6	1000
	15	600
0.5	3	200
	6	200
	15	200
1	3	100
	6	125
	15	150
2	3	75
	6	90
	15	150
5	3	50
	6	60
	15	150

Tabell C.2: List with suggestions to  $\sigma$  with chosen filter and Period. The Seed in Uniform Random Number block is set to 0. If the Seed or the C-compiler is change, these values are not valid.

## **C.13 Choke SIMULINK**

The choke opening is set by a signal in SIMULINK between 0 and 90 degrees. 90 degrees correspond to open choke and 0 degrees to closed. Figure C.13 shows the setup for in SIMULINK for the choke with controllers. The manual switches enable the user to choose between a constant choke opening, specify a reference signal for the choke to track, or to use the choke pressure controller. The choke pressure controller can both take in a user specified reference signal or reference signal from the bottomhole controller.





Figur C.13: Choke SIMULINK



# Tillegg D

## Digitale Tillegg

**TTK4551 Teknisk kybernetikk, fordypningsprosjekt rapport**

**Simulink Program**

Hentet 07.06.2013

**Engineer Program**

Hentet 07.06.2013