

Eksperimentell undersøkelse av frekvensstyrt regulering for å stabilisere gassløft-ustabilitet

Christer Andre Larsen

Petroleumsfag

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Harald Arne Asheim, IPT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for petroleumsteknologi og anvendt geofysikk

Sammendrag

Gassløft er et tiltak for å opprettholde oljeproduksjonen på et ønsket nivå ved å injisere gass inn i produksjonsrøret. Dynamikken til produksjonssystemet åpner for at store trykkvariasjoner kan oppstå. I slike tilfeller er det nødvendig å stabilisere produksjonen for å ivareta akseptabelt produksjonsnivå og sikkerhet.

Denne oppgaven undersøker muligheten til å stabilisere en ustabil gassløftet produksjonsbrønn, representert ved en fysisk strømningsmodell. Virkningen av kjente, passive stabiliseringstiltak ble undersøkt. Hovedsakelig for å verifisere at de dynamiske egenskapene til den skalerte modellen kunne sammenholdes med en reell gassløftet brønn. Hovedhensikten er å undersøke aktiv stabilisering av en brønn som opplever store variasjoner i trykk og strømningsrater, ved hjelp av en frekvensstyrt ventil. Stabiliseringen skjer ved at ventilen stenges syklisk for å oppnå en destruktiv interferens på svingningene observert i produksjonen. Modellen bruker luft som løfter vann opp et 7,5 meter langt rør. Kontrollventilen ble plassert ved injeksjonspunktet og ved rørets utløp.

Målingene viste at når ventilen var plassert ved injeksjonspunktet, hadde modellen en god stabiliserende effekt, uten å gå på bekostning av produksjonsmengden. Effekten var avhengig av frekvensen til den sykliske avstengningen av ventilen. I frekvensområder hvor brønnen viste tegn til flere frekvenskomponenter, var effekten lavere enn når brønnen kun viste en dominerende frekvens lik ventilens. En effekt på opptil 55 % økning i vanninnstrømningen, og en reduksjon på over 80 % i svingningene ble observert i forsøkene.

Når ventilen var plassert ved utløpet av produksjonsrøret, viste metoden en god stabiliserende effekt med over 90 % reduksjon i utslagene på vanninnstrømningen. Ulempen ved at ventilen var plassert ved brønnhode var at vanninnstrømningen ikke hadde en økning i forhold til den ustabile perioden. Selv om innstrømningen ikke økte i forhold til den ustabile perioden, var innstrømningen høyere enn hva som var tilfelle når brønnen ble strupt ned til stabilt område.

Resultatene fra oppgaven ble godtatt for publisering på en SPE konferanse.

Nøkkelord: Gassløft ustabilitet, eksperimentell studie, dynamisk stabilisering.

Abstract

Gaslift is a method to maintain oil production at a desired level by injecting gas into the production tubing. The dynamics of the production system may cause large pressure variations. In such cases it is necessary to stabilize the flow so that a desired level of production and safety can be maintained.

This paper examines the possibility to stabilize an unstable gas lifted well represented by a physical flow model. The effect of known, passive stabilization methods were examined, mainly to verify that the dynamic behavior of the scaled laboratory model could be compared with real gas lifted wells. The main purpose is to examine active stabilization of a well that experiences large variations in pressure and flow rates, using a frequency-controlled valve. The stabilization occurs when the valve closes cyclically to achieve a destructive interference to the variations observed in the production. The model uses air that lifts water up a 7.5 meter long tube. The valve was placed at the injection point and at the tube outlet.

The measurements showed that when the valve was located at the injection point, the model had a good stabilizing effect, without compromising the production quantity. The effect was dependent on the frequency of the cyclical valve closing. In frequency ranges where the well showed signs of multiple frequency components, the effect was lower than when only the well showed a dominant frequency equal to the closing valve. An effect of up to 55 % increase in water inflow, and a reduction of over 80 % in fluctuations were observed in the experiments.

When the valve was positioned at the outlet of the tubing, the controller showed a good stabilizing effect with over 90 % reduction in the fluctuations in the water inflow rate. One disadvantage when the valve was located at the wellhead was that the water inflow rate had not increased compared to the unstable period. Although the inflow did not increase compared to the unstable period, the inflow was higher than the case when the well was choked down to the stable area.

Keywords: Gaslift instability, experimental study, dynamic stabilization.

Forord

Et semester med mange tankefulle, reflekterende og krevende dager og uker med skriving, omskriving, blindspor og suksess har resultert i denne masteroppgaven. Masteroppgaven er skrevet som en avslutning på min mastergrad, og går under emnekoden TPG4905 Petroleumsteknologi – Petroleumsproduksjon ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU).

Jeg vil først og fremst takke min veileder Harald Arne Asheim for all veiledning, inspirasjon og kunnskap som har vært betydningsfullt for det ferdige resultatet i denne oppgaven. Spesielt vil jeg trekke frem tips og råd jeg fikk under konstruksjonen av laboratoriemodellen. Jeg vil også gi en takk til Åge Sivertsen som har hjulpet til med det elektriske til måleinstrumentene. Til slutt vil jeg takke min familie for all tålmodigheten og støtten dem har gitt meg gjennom skrivningen og studiegangen.

Innholdsfortegnelse

Liste over figurer	xiii
Liste over tabeller	xvii
Nomenklatur	xix
1. Innledning	1
1.1. Motivasjon.....	1
1.2. Problemstilling.....	1
1.3. Disposisjon	2
2. Gassløft: virkemåte og tiltak	5
2.1. Gassløft som kunstig løftemetode.....	5
2.2. Ustabilitet	9
2.2.1. <i>Mikroskopisk ustabilitet</i>	9
2.2.2. <i>Makroskopisk ustabilitet</i>	11
2.2.3. <i>Casing Heading</i>	12
2.2.4. <i>Tetthetsbølger</i>	12
2.3. Predikere ustabilitet	13
2.4. Eksisterende stabiliseringstiltak	14
2.4.1. <i>Overdimensjonering</i>	14
2.4.2. <i>Økt gassinjeksjonsrate</i>	15
2.4.3. <i>Redusere åpningen i injeksjonsventilen</i>	15
2.4.4. <i>Struping av produksjonen</i>	16
2.4.5. <i>Dynamisk kontroll</i>	16
2.5. Foreslått kontrollmetode.....	19
3. Tidligere laboratoriearbeid	21
3.1. Aamo, Eikrem, Siahaan, og Foss (2005).....	21

3.2. Sivertsen, Storakaas, og Skogestad (2010)	22
3.3. Sagberg (2013)	24
4. Eksperimentelt arbeid	27
<hr/>	
4.1. Formålet med eksperimentet.....	27
4.2. Modellbeskrivelse	27
4.2.1. Reservoaret	29
4.2.2. Produksjonsrøret.....	30
4.2.3. Knutepunktet.....	31
4.2.4. Gasstilførsel.....	32
4.2.5. Elektroniske måleinstrumenter.....	33
4.3. Modellens gyldighet og relevans	36
4.3.1. Produksjonstest	37
4.3.2. Observasjon av casing heading ustabilitet.....	38
4.3.3. Modellens respons på økt gasstilførsel og endret ventilåpning.....	40
5. Forsøk	43
<hr/>	
5.1. Generell fremgangsmåte.....	43
5.2. Første forsøk	46
5.2.1. Resultat av avstengt ringrom	47
5.2.2. Resultat av økt gasstilførsel.....	49
5.2.3. Resultat av kritisk strømning over injeksjonsventilen	50
5.2.4. Resultat av 0,1 Hz ventilavstengning	51
5.2.5. Resultat av 0,3 Hz ventilavstengning	52
5.2.6. Resultat av 0,5 Hz ventilavstengning	53
5.2.7. Resultat av 0,7 Hz ventilavstengning	54
5.2.8. Sammenligning av resultatene i første forsøk	55
5.3. Andre forsøk	58
5.3.1. Resultat av 0,1 Hz ventilavstengning	58
5.3.2. Resultat av 0,3 Hz ventilavstengning	60
5.3.3. Resultat av 0,5 Hz ventilavstengning	61

5.3.4. Resultat av 0,7 Hz ventilavstengning	62
5.3.5. Sammenligning av resultatene i andre forsøk	63
5.4. Tredje forsøk.....	68
5.4.1. Resultat av 0,1 Hz ventilavstengning ved brønnhode	69
5.4.2. Resultat av 0,3 Hz ventilavstengning ved brønnhode	71
5.4.3. Resultat av 0,5 Hz ventilavstengning ved brønnhode	72
5.4.4. Resultat av 0,7 Hz ventilavstengning ved brønnhode	73
5.4.5. Sammenligning av resultatene i tredje forsøk	74
6. Diskusjon	77
<hr/>	
6.1. Ventilavstengningens effekt på stabilisering.....	77
6.2. Ventilavstengningens effekt på produksjonen	79
6.3. Ventilavstengningens effekt på gassinjeksjonen	81
6.4. Veien videre	83
7. Konklusjon	85
Litteraturliste	87
<hr/>	
Appendiks A	
<hr/>	
A.1. Fourier-transformasjon	
<hr/>	
Appendiks B	
<hr/>	
B.1 Måleprogram	
B.1.1 Frontpanelet til måleprogrammet	
B.1.2 Blokkdiagrammet til måleprogrammet	
B.2 Analyseprogram	
B.2.1 Frontpanelet til analyseprogrammet	
B.2.2 Blokkdiagrammet til analyseprogrammet	

Liste over figurer

Figur 2-1: Gassløftet produksjonssystem,(Hu, 2005)	5
Figur 2-2: Strømningsregimer, hentet fra Griffith (1984).....	10
Figur 2-3: Mikroskopisk og makroskopisk ustabilitet	11
Figur 2-4: Oljeproduksjon som funksjon av injeksjonsrate, Hu (2005).....	15
Figur 3-1: Kontrollstruktur for PI kontroller. Hentet fra Aamo et al. (2005)	22
Figur 3-2: Modelloppsett, hentet fra Sivertsen et al. (2010).....	23
Figur 4-1: Modelloppsett.....	28
Figur 4-2: Reservoartank.....	30
Figur 4-3: Produksjonsrøret	31
Figur 4-4: Knutepunktet i modellen	32
Figur 4-5: Rotametrene som er brukt i modellen	33
Figur 4-6: Kontroll av nøyaktigheten til vannratemåleren	34
Figur 4-7: Kontroll av nøyaktigheten til gassinjeksjonsmåleren	35
Figur 4-8: Kontroll av nøyaktigheten til trykktransmitteren	36
Figur 4-9: Laboratoriemodellens produksjonskurve	37
Figur 4-10: Produksjonskurve for 1. test (gassinjeksjon i rødt, vanninnstrømning i blått).....	38
Figur 4-11: Et utsnitt av en test med modelloppsettet.....	39
Figur 4-12: Produksjonskurve, gradvis økning av gasstilførsel	40
Figur 4-13: Produksjonskurve, gradvis åpning av injeksjonsventilen	41
Figur 5-1: Frontpanelet til måleprogrammet	44
Figur 5-2: Blokkdiagrammet til måleprogrammet	44
Figur 5-3: Frontpanelet til analyseprogrammet.....	45
Figur 5-4: Blokkdiagrammet for analyseprogrammet.....	46
Figur 5-5: Avstengning av kompressibelt volum	48
Figur 5-6: Frekvensspekter av referanseperiode, avstengt ringrom	48
Figur 5-7: frekvensspekter etter stabiliseringsforsøk, avstengt ringrom.....	48
Figur 5-8: Økt gasstilførsel	49
Figur 5-9: Frekvensspekter for referanseperiode, økt gasstilførsel	49
Figur 5-10: Frekvensspekter etter økt gasstilførsel	50

Figur 5-11: Kritisk strømning over injeksjonsventilen	50
Figur 5-12: Frekvensspekter etter start av stabiliseringstiltaket kritisk strømning	51
Figur 5-13: Plot for 0,1 Hz ventilavstengning, 1. forsøk	51
Figur 5-14: Frekvensspekter etter start av stabiliseringstiltaket 0,1 Hz ventilavstengning	52
Figur 5-15: Plot for 0,3 Hz ventilavstengning, 1. forsøk	52
Figur 5-16: Frekvensspekter etter start av stabiliseringstiltaket 0,3 Hz ventilavstengning	53
Figur 5-17: Plot for 0,5 Hz ventilavstengning, 1. forsøk	53
Figur 5-18: Frekvensspekter etter start av stabiliseringstiltaket 0,5 Hz ventilavstengning	54
Figur 5-19: Plot for 0,7 Hz ventilavstengning, 1. forsøk	54
Figur 5-20: Frekvensspekter etter start av stabiliseringstiltaket 0,7 Hz ventilavstengning	55
Figur 5-21: Endring i utslag i forhold til referanseperiode for gjennomkjøringene, 1. forsøk	56
Figur 5-22: Endring i volum og gjennomsnittsverdi i forhold til referanseperiode, 1. forsøk	57
Figur 5-23: Innstrømningsvolum for alle gjennomkjøringene, 1. forsøk	58
Figur 5-24: Plot for 0,1 Hz ventilavstengning, 2. forsøk	59
Figur 5-25: Frekvensspekter for referanseperiode med 0,1 Hz ventilavstengning, 2. forsøk	59
Figur 5-26: Frekvensspekter for periode med 0,1 Hz ventilavstengning, 2. forsøk	60
Figur 5-27: Plot for 0,3 Hz ventilavstengning, 2. forsøk	60
Figur 5-28: Frekvensspekter for periode med 0,3 Hz ventilavstengning, 2. forsøk	61
Figur 5-29: Plot av 0,5 Hz ventilavstengning, 2. forsøk	61
Figur 5-30: Frekvensspekter for periode med 0,5 Hz ventilavstengning, 2. forsøk	62
Figur 5-31: Plot for 0,7 Hz ventilavstengning, 2. forsøk	62
Figur 5-32: Frekvensspekter for periode med 0,7 Hz ventilavstengning, 2. forsøk	63
Figur 5-33: Prosentvis endring i utslag i forhold til referanseperiode, 2. forsøk	63
Figur 5-34: Prosentvis endring i volum og gjennomsnitt i forhold til referanseperiode, 2. forsøk	64
Figur 5-35: Sammenligning av gjennomsnittlig ringromstrykk for 1. og 2. forsøk	65
Figur 5-36: Sammenligning av vanninnstrømning for 1. og 2. forsøk	65
Figur 5-37: Sammenligning av utslag på ringromstrykket for 1. og 2. forsøk	66
Figur 5-38: Sammenligning av utslag på vanninnstrømning for 1. og 2. forsøk	67
Figur 5-39: Modifisert modelloppsett ved brønnhode	68
Figur 5-40: Strømning med og uten brønnhodeventilen stengt	69
Figur 5-41: Plot av 0,1 Hz ventilavstengning ved brønnhode	70

Figur 5-42: Frekvensspekter for referanseområde for 0,1 Hz ventilavstengning, 3. forsøk	70
Figur 5-43: Frekvensspekter etter aktivering av 0,1 Hz ventilavstengning ved brønnhode	71
Figur 5-44: Plot av 0,3 Hz ventilavstengning ved brønnhode.....	71
Figur 5-45: Frekvensspekter etter aktivering av 0,3 Hz ventilavstengning ved brønnhode	72
Figur 5-46: Plot av 0,5 Hz ventilavstengning ved brønnhode.....	72
Figur 5-47: Frekvensspekter etter aktivering av 0,5 Hz ventilavstengning ved brønnhode	73
Figur 5-48: Plot av 0,7 Hz ventilavstengning ved brønnhode.....	73
Figur 5-49: Frekvensspekter etter aktivering av 0,5 Hz ventilavstengning ved brønnhode	74
Figur 5-50: Sammenligning av endringen i utslag for gjennomkjøringene	74
Figur 5-51: Sammenligning av endringen i volum og gjennomsnittsverdi.....	75
Figur 6-1: Sammenligning av resultatene i forsøkene.....	78
Figur 6-2: Prosentvis endring i innstrømning og snittrykk	80
Figur 6-3: Gassinjeksjon som funksjon av ventilavstengningsfrekvens	81
Figur 6-4: Ringromstrykk som funksjon av ventilavstengningsfrekvens	82
Figur A-1: Grafisk fremstilling av en Fourier-transformasjon (nederste figur).....	1
Figur A-2: Grafisk fremstilling av Aliasing.....	3
Figur A-3 DFT av funksjonen med 50 Hz målefrekvens.....	4
Figur A-4 Målefrekvens lik 150 Hz	4
Figur A-5: N=10.....	5
Figur A-6: N=100.....	6
Figur A-7: N=104, diskontinuerlig trunkering	6
Figur A-8: Illustrasjon av diskontinuitet som følge av trunkering.....	7
Figur B-1: Frontpanel for måleprogrammet.....	9
Figur B-2: Frontpanel for frekvenskontroller.....	10
Figur B-3: Blokkdiagram av måleprogrammet	11
Figur B-4: Frontpanelet til analyseprogrammet	12
Figur B-5: Blokkdiagrammet til analyseprogrammet	13

Liste over tabeller

Tabell 1: Fluid og komponentspesifikasjoner	29
---	----

Nomenklatur

A_c	=	Tverrsnittareal ventil	$[m^2]$
BT	=	Buffertank	
d	=	Diameter rør	$[m]$
f	=	Friksjonsfaktor	
g_x	=	Tyngeakselerasjon	$[m/s^2]$
J	=	Produktivitetsindeks	$[Sm^3/s/bar]$
L	=	Lengde rør	$[m]$
m	=	Masse	$[kg/m^3]$
M	=	Molekylær masse	$[kg/kmol]$
P_g	=	Trykk ringrom	$[barg]$
P_{th}	=	Brønnhodetrykk	$[barg]$
P_w	=	Trykk i produksjonsrør	$[barg]$
PI	=	Proposjonal- Integral	
Q_{gi}	=	Rate gasstilførsel	$[Sm^3/s]$
Q_g	=	Injeksjonrate gass	$[Sm^3/s]$
q_o	=	Oljerate	$[Sm^3/s]$
R	=	Universalkonstant for gass	
T	=	Temperatur	$[K]$
v_c	=	Kinematisk bølgefart	$[m/s]$
v_m	=	Superfisialfart	$[m/s]$
V_r	=	Volum ringrom	$[m^3]$
ρ_g	=	Tetthet gass	$[kg/m^3]$
ρ_{TP}	=	Tofase tetthet	$[kg/m^3]$
ΔP_c	=	Trykkforskjell injeksjonsventil	$[bar]$

1. Innledning

1.1. Motivasjon

Oljeproduksjonen på norsk kontinentalsokkel har vart i flere tiår. Etter mange år med produksjon vil et felt nå moden fase, og hvor det vil være nødvendig å ta i bruk kunstige løftemetoder for å kunne opprettholde produksjonen på et ønsket nivå. Gassløft er en ofte brukt løftemetode. Under gassløftet produksjon kan små trykkvariasjoner i brønnen gjøre at store ratevariasjoner oppstår. Store ratevariasjoner er ugunstig av flere grunner. Økt sikkerhetsrisiko og økonomisk tap som følge av økte driftskostnader og redusert produksjon er konsekvenser av ustabil produksjon.

I dag benyttes det flere tiltak for å oppnå stabil produksjon. Mange av tiltakene går på bekostning av produksjonsmengden, og nye metoder er nødvendig slik at en stabilisering ikke vil redusere produksjonsnivået. I dag finnes det dynamiske kontrollmetoder som har vist gode resultater med hensyn på stabilisering uten produksjonstap, men metodene er sensitive for støy og avhenger av måle- og kontrollinstrumenter som gjør metodene mindre robust mot komponentsvikt. En ny stabiliseringsmetode som kun benytter et enkelt kontrollprinsipp, hvor produksjonsnivået opprettholdes og som kan fungere selv om måleinstrumenter svikter eller inneholder støy, er derfor nødvendig.

1.2. Problemstilling

Avhandlingen undersøker om en ny foreslått stabiliseringsmetode har en stabiliserende effekt på en ustabil gassløftet produksjonsbrønn. For å besvare problemstillingen er en eksperimentell modell konstruert. For at eksperimentet skal kunne gjennomføres, må modellen inneha flere egenskaper.

Modellen må:

- *Bestå av enheter som simulerer et reservoar, et produksjonsrør, et ringrom og en gasstilførsel.*
- *Kunne gjenskape en ustabil produksjon, hvor ustabiliteten drives av kjente mekanismer som observeres i felt.*

- *Ha kontrollventiler som kan regulere produksjonen og gasstilførselen etter prinsippet som foreslåes i oppgaven..*
- *Kunne måle og analysere injeksjonsrate, trykk, og innstrømningsrate.*

For å undersøke den stabiliserende effekten til den foreslåtte metoden, vil metoden sammenlignes mot velkjente stabiliseringstiltak som benyttes i praksis. Først vil den stabiliserende effekten kvantifiseres ved å se på den prosentvise endringen i svingningene og innstrømningsmengden før og etter kontrollmetoden iverksettes. Deretter vil det gjøres en sammenligning mellom den stabiliserende effekten den nye metoden har i forhold til vanlige stabiliseringstiltak. Robustheten til den nye stabiliseringsmetoden vil bli undersøkt ved å endre kontrollmekanismen, som i dette tilfelle er ventilens avstengningsfrekvens. Dette vil bli forklart nærmere i et senere kapittel. I tillegg vil robustheten undersøkes ved å endre controllerens plassering i brønnen.

Problemstillingen begrenses til undersøkelsen av stabiliseringseffekten, og hvordan denne endrer innstrømningsmengden. Det vil ikke bli utført noen optimalisering av metoden for å maksimere den stabiliserende effekten eller innstrømningsmengden på grunn av tidsbegrensninger.

1.3. Disposisjon

Opgaven starter med en introduksjon av gassløft. Introduksjonen vil inneholde en kort beskrivelse av et typisk gassløftet produksjonssystem, hvor prinsippet til gassløft vil bli forklart. En matematisk beskrivelse av strømmingen i produksjonsbrønnen vil bli gitt. Beskrivelsen er ment til å gi leseren en forståelse av hvilke parametere som kan innvirke på strømmingen i produksjonsbrønnen. Siden oppgaven tar for seg ustabilitet i form av svingninger i trykk og strømningsrater, er ligningene utformet slik at de skal gi en oversikt over hvor stor påvirkning en endring i trykket har på raten i produksjonsbrønnen.

Etter introduksjonen vil ulike stabiliseringstiltak bli presentert. Først vil to stabilitetskriterier bli gitt for å gi en forståelse av påvirkningen de forskjellige parameterne har på stabiliteten. Videre vil velkjente tiltak bli gjennomgått. Noen av tiltakene vil bli undersøkt i det eksperimentelle arbeidet. Undersøkelsen skal gi et sammenligningsgrunnlag på hvor godt den foreslåtte stabiliseringsmetoden virker. Siden den nye metoden er en dynamisk kontrollmetode, vil også et moderne stabiliseringstiltak bli beskrevet for å gi et overblikk på ulikheter mellom de to dynamiske kontrollmetodene. Tiltaket som er foreslått i oppgaven vil dernest bli beskrevet.

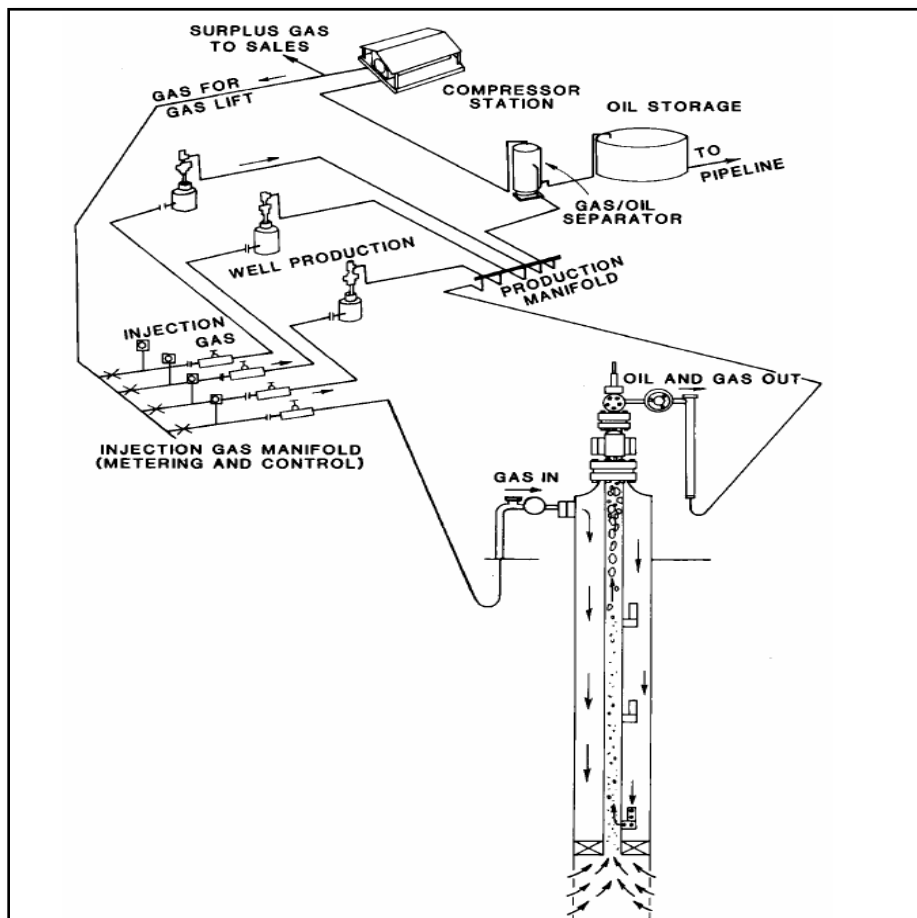
Siden oppgavens resultater bygger på eksperimentelt arbeid, er et kapittel viet til tidligere laboratoriearbeid. Siden stabiliseringsmetoden som undersøkes ikke tidligere er omtalt vil det legges mest vekt på laboratoriemodellens gyldighet. Dette innebærer å se på likheter og forskjeller på laboratoriemodellen benyttet i denne oppgaven, i forhold til andre laboratoriemodeller. Oppgavene som er omtalt i tidligere laboratoriearbeid har også tatt for seg ustabilitet under produksjon, men stabiliseringstiltakene, og hva som er undersøkt, er forskjellig fra denne oppgaven.

Etter gjennomgangen av tidligere arbeider vil formålet og oppsettet til laboratoriemodellen som er benyttet i denne oppgaven bli beskrevet. Kapitlet inneholder en detaljert beskrivelse av laboratoriemodellen. Videre vil prosedyren til forsøkene som er utført i oppgaven bli gjennomgått, og resultater og sammenligning av resultatene bli gitt. Det gjøres tre forsøk, hvorav hvert forsøk inneholder flere gjennomkjøringer. En diskusjon av resultatene er utført i kapittel 6, og en konklusjon er tatt i kapittel 7.

2. Gassløft: virkemåte og tiltak

2.1. Gassløft som kunstig løftemetode

Gassløft er betegnelsen på en kunstig løftemetode hvor gass injiseres inn i produksjonsrøret. Gassen som injiseres blander seg med reservoarfluidet, slik at den hydrostatiske trykkgradienten reduseres. Ved å redusere trykkgradienten senkes bunnhullstrykket, og trykkforskjellen mellom reservoaret og produksjonsrøret stiger. Dette fører til en høyere innstrømning av reservoarfluid. Mengden gass som injiseres inn i produksjonsrøret bestemmer potensialforskjellen, og dermed produksjonsraten. En typisk gassløftet produksjonsbrønn, hentet fra (Hu, 2005), er vist i Figur 2-1.



Figur 2-1: Gassløftet produksjonssystem, (Hu, 2005)

Produksjonsbrønnen består blant annet av et ringrom og et produksjonsrør. Ringrommet er adskilt fra produksjonsrøret, og kommunikasjonen mellom dem forekommer ved injeksjonspunktet over en injeksjonsventil. Injeksjonsgassen tilføres ringrommet, og injiseres inn til produksjonsrøret ved injeksjonspunktet. Videre vil det presenteres ligninger som gir sammenhengen mellom strømmingen i ringrommet, gjennom injeksjonsventilen, og strømmingen i produksjonsrøret. Ligningene er utledet fra et arbeidsnotat gitt av Asheim (2014).

Når brønnen produserer med gassløft, vil ringrommet ha en gasstilførsel ved toppen av brønnen, og en gassinjeksjon til produksjonsrøret ved injeksjonspunktet. Strømmingen i ringrommet kan beskrives gjennom en enkel massebalanse. Om strømmingen antas å være friksjonsfri og i konstant volum, kan massebalansen bli gitt som:

$$\frac{\delta m}{\delta t} = m_{gass,inn} - m_{gass,ut} \quad (2.1)$$

Siden det ofte forekommer trykkforandringer i ringrommet og produksjonsrøret, vil det være ønskelig å ha en sammenheng på hvordan trykkvariasjoner påvirker den volumetriske strømmingen i ringrommet. Ved å anta at den ideelle gasslov gjelder, kan trykk, volum og masse bli uttrykt ved:

$$P_g V_r = \frac{m}{M} RT \quad (2.2)$$

Ved å differensiere (2.2) vil endringen over tid bli gitt:

$$V_r \frac{\delta P_g}{\delta t} = \frac{RT}{M} \frac{\delta m}{\delta t} \rightarrow \frac{\delta m}{\delta t} = \frac{M V_r}{RT} \frac{\delta P_g}{\delta t} \quad (2.3)$$

Masseraten inn og ut kan uttrykkes gjennom volumetrisk strømming og fluidtetthet:

$$m_{inn} - m_{ut} = \rho_g \cdot (Q_{gi} - Q_g) \quad (2.4)$$

Med (2.3) og (2.4) innsatt i (2.1) vil trykkforandringen over tid bli uttrykt med volumetrisk strømming:

$$\frac{\delta P_g}{\delta t} = \frac{P_g}{V_r} (Q_{gi} - Q_g) \quad (2.5)$$

Ved å anta at strømningsrater og trykk kan uttrykkes med en konstant verdi og en liten endring; $P(t) = P + \delta P$, $Q(t) = Q + \delta q$, kan (2.5) uttrykkes via linearisering.

$$\frac{\delta}{\delta t} (\delta P_g) = \frac{P_g}{V_r} (\delta q_{gi} - \delta q_g) \quad (2.6)$$

Ligning (2.6) uttrykker hvordan en strømningsendring av gass påvirker trykket i ringrommet.

Siden ringrommet kommuniserer med produksjonsrøret gjennom injeksjonsventilen, vil trykkpåvirkningen avhenge av injeksjonsventilen. Sammenhengen mellom trykkforskjellen over, og strømmingen gjennom ventilen kan uttrykkes med likning (2.7) (Asheim, 1988).

$$\delta q_g = \frac{A_c^2}{\rho_g q_g} (\delta P_g - \delta P_w) \quad (2.7)$$

Siden en endret injeksjonsrate vil føre til en trykkendring i produksjonsrøret, vil innstrømmingen fra reservoaret endres. Ved å anta at reservoaret har en konstant produktivitetsindeks og reservoartrykk, vil endringen kunne uttrykkes som funksjon av produktivitetsindeksen og trykkforandringen:

$$\delta q_o = -J \delta P_w \quad (2.8)$$

Under gassløftet produksjon strømmer injeksjonsgass og reservoarfluid i produksjonsrøret. Om strømmingen i produksjonsrøret antas stasjonær og i konstant volum, kan trykktapet i produksjonsrøret uttrykkes gjennom gjennomsnittstettheten i røret.

$$p_w = p_{th} + \left(\bar{\rho}_{TP} g_x + \frac{1}{2} \bar{\rho}_{TP} f \frac{\bar{v}_m^2}{d} \right) L \quad (2.9)$$

Om innstrømmingen varierer vil tettheten variere. Variasjonene vil forplante seg med strømningsfarten. Ved å anta at trykk- og fartsendringer utlignes umiddelbart kan

tetthetsvariasjonene som oppstår uttrykkes med den kinematiske bølgefarten, v_c , og endringen i

strømningsgjennomsnittlig tetthet, $\rho_m = \frac{\rho_g Q_g + \rho_o Q_o}{Q_g + Q_o}$:

$$\frac{\partial}{\partial t} \delta \bar{\rho}_{TP} = \frac{\bar{v}_c}{L} (\delta \bar{\rho}_m(0) - \delta \bar{\rho}_m(L)) \quad (2.10)$$

Siden strømmingen ut av brønnen er lik strømmingen i brønnen ved injeksjonspunktet etter en tidsforsinkelse, kan Ligning (2.10) uttrykkes som:

$$\frac{\partial}{\partial t} \delta \bar{\rho}_{TP} = \frac{\bar{v}_c}{L} (\delta \bar{\rho}_m(t) - \delta \bar{\rho}_m(t - \Delta t)) \quad (2.11)$$

Slik som i ringrommet, kan strømningsrater og trykk over tid uttrykkes gjennom en middelvei og en endring, $Q_o = Q_o + \delta q_o$ og $Q_g = Q_g + \delta q_g$. En endring i strømningsgjennomsnittlig tetthet kan dermed bli gitt gjennom endringer i strømningsrate:

$$\delta \rho_m = \frac{(\rho_o - \rho_g) Q_o}{(Q_g + Q_o)^2} \left(\frac{Q_g}{Q_o} \delta q_o - \delta q_g \right) \quad (2.12)$$

Siden brønnhodetrykket i (2.9) er konstant, vil en trykkendring i produksjonsrøret, δP_w , bli gitt av (2.9), (2.11) og (2.12):

$$\delta p_w = \left(g_x L + \frac{1}{2} f \frac{\bar{v}_m^2}{d} L \right) \delta \bar{\rho}_{TP} + f \frac{\rho_{TP} \bar{v}_m}{d} \frac{L}{A_t} (\delta q_g + \delta q_o) \quad (2.13)$$

Ved å derivere (2.13) kan trykkresponsen uttrykkes som en funksjon av endringen i strømningsrater:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \delta p_w = & G \frac{\bar{Q}_g}{\bar{Q}_o} \delta \bar{Q}_o(t) - G \delta \bar{Q}_g(t) + F \frac{\partial}{\partial t} \delta \bar{Q}_o(t) + F \frac{\partial}{\partial t} \delta \bar{Q}_g(t) \dots \\ & - G \frac{\bar{Q}_g}{\bar{Q}_o} \delta \bar{Q}_o(t - \Delta t) + G \delta \bar{Q}_g(t - \Delta t) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Hvor G og F er konstanter:

$$G = (\bar{\rho}_o - \bar{\rho}_g) \left(g_x + \frac{1}{2} f \frac{\bar{v}_m^2}{d} \right) \frac{\bar{v}_c}{\bar{v}_m} \frac{1}{A_t},$$

$$F = f \frac{\bar{\rho}_{TP} \bar{v}_m}{d} \frac{L}{A_t}$$

Av ligningene (2.6), (2.7), (2.8) og (2.14) fremkommer det at graden av endring i trykk avhenger av konstante parametere. Brønnens utforming med hensyn på volum, lengde og ventilkarakteristikk vil derfor ha en innvirkning på hvordan strømmingen påvirkes av trykkforandringer.

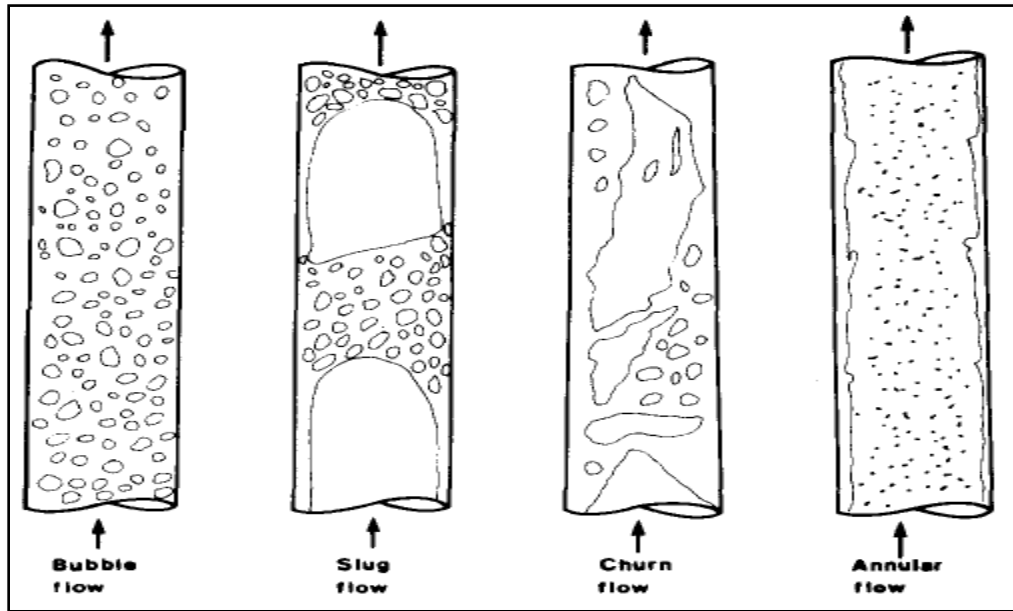
2.2. Ustabilitet

Ustabilitet under produksjon betegner sykliske variasjoner i gass- og væskerate. Svingningene i produksjonen er ofte betydelige, og kan skape operasjonelle problemer. Ofte vil separatoren ikke klare å takle de store svingningene, som kan forårsake fakling av gass og dårlig separering (Hu & Golan, 2003). Om svingningene er alvorlige nok kan det bli en midlertidig nedstengning av brønnen (Slupphaug, Hole, & Bjune, 2006). I tillegg vil ustabilitet gjøre det vanskelig å opprettholde ønsket produksjon. Dette vil føre til at det tar lengre tid for å oppnå tilsvarende utvinningsgrad, og øker dermed de operasjonelle kostnadene (Hu & Golan, 2003).

Hu (2005) beskrev to former for ustabilitet i gassløftede produksjonsbrønner. De to formene var definert som mikroskopisk og makroskopisk ustabilitet.

2.2.1. Mikroskopisk ustabilitet

Mikroskopisk ustabilitet, også kjent som hydrodynamisk slugging, betegner ustabilitet som forekommer i gass-væske kontakten. Når gassen injiseres inn i produksjonsrøret vil produksjonen bestå av flere faser; reservoarfluid og gass. Når flere faser strømmer i samme rør, kan det oppstå flere typer strømningsregimer. Strømningsregimene som kan oppstå er blant annet avhengig av tettheten til fasene, hastigheten og rørdimensjoner (Taitel, Bornea, & Dukler, 1980). I Figur 2-2, hentet fra Griffith (1984), er fire typer strømningsregimer vist.

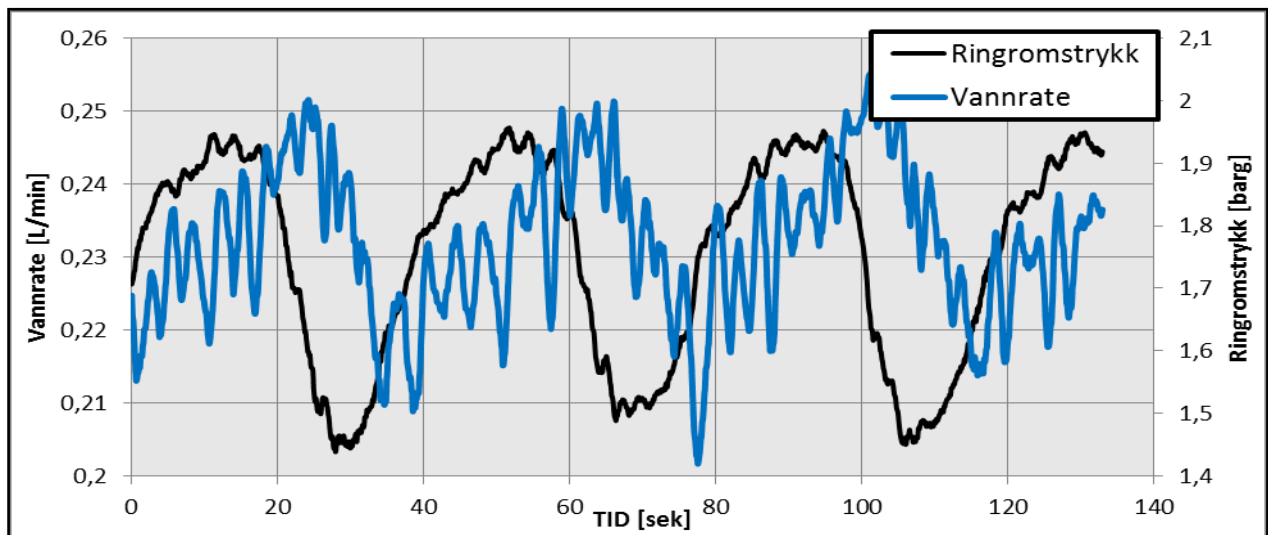


Figur 2-2: Strømningsregimer, hentet fra Griffith (1984)

Under tofasestrømning i et vertikalt rør er det disse fire strømningsregimene som oftest observeres under produksjon. I tillegg er det overgangssoner mellom de forskjellige regimene. På grunn av distribueringen av væske og gass under de forskjellige regimene, er det forskjell på trykkfall, produksjonsrater, etc. For denne oppgaven vil Slug- og Churnstrømning være strømningsregimene som er av interesse. Dette skyldes den vekslende variasjonen mellom høy gassandel og høy væskeandel. Dette fører til et varierende bunnhullstrykk og innstrømning fra reservoaret under produksjon. Taitel et al. (1980) beskrev at Slug-strømning oppstår når strømmingen av gass oppnår en tilstrekkelig hastighet slik at de mange små boblene i boblestrømningen kolliderer, og danner en større boble. Boblen som dannes vil ha en diameter som er nærme diameteren til røret, kun adskilt med en tynn væskefilm. Boblene blir kalt Taylor-bobler og har en uniform stige-hastighet, og som er adskilt med en «slugg» av væske. Væskefilmen mellom boblene har en negativ fartsretning i forhold til sluggene og gassboblene. Om gassraten økes, har Taylor-boblene en tendens til å bli ustabile. Væskesluggen klarer ikke å opprettholde en jevn strømning, og væskefilmen mellom boblene penetrerer gassboblen. Gassboblen kollapser slik at sluggen av væske faller til et punkt hvor den akkumuleres og begynner å stige på nytt. Når slike tilfeller observeres blir strømningsregime kalt Churnstrømning (Taitel et al., 1980).

2.2.2. Makroskopisk ustabilitet

Makroskopisk ustabilitet er ustabilitet som involverer hele produksjonssystemet. I en gassløftet produksjonsbrønn vil systemet blant annet innebefatte ringrommet, produksjonsrøret, manifolder og ventiler. Denne formen for ustabilitet er årsaken til de mange problemene som er omtalt tidligere.



Figur 2-3: Mikroskopisk og makroskopisk ustabilitet

I Figur 2-3 vises mikroskopisk og makroskopisk ustabilitet som ble observert under en test av laboriemodellen som benyttes i forsøkene. Vannraten viser variasjoner med en høy svingfrekvens som skyldes hydrodynamisk slugging. I tillegg vises det svingninger som har en lavere frekvens, men med et større utslagsområde. Disse svingningene kommer av makroskopisk ustabilitet. Av figuren er det tydelig at makroskopisk slugging har en større påvirkning på produksjonen enn hydrodynamisk slugging. De to vanligste formene for makroskopisk ustabilitet er *casing heading* og *tetthetsbølger*.

Forskjellen mellom casing heading og tetthetsbølger ligger i hvordan systemet bidrar til ustabiliteten. Figur 2-1 viser at kommunikasjonen mellom ringrommet og produksjonsrøret forekommer ved injeksjonspunktet. Ventilen i dette punktet vil virke inn på hvordan trykkendringer i produksjonsrøret vil endre gassinjeksjonen fra ringrommet. Hvor stor påvirkningen er, avhenger av strømningshastigheten over restriksjonen i ventilen som vist i Ligning (2.7). Siden strømningshastigheten ofte er høy over restriksjonen i en ventil, kan man

oppnå hastigheter nær lydets hastighet. Ved slike hastigheter vil tetthetsvariasjonene i fluidet være betydelige, og strømmingen blir karakterisert som kompressibelt (White, 2008). Lydens hastighet er en termodynamisk egenskap til et fluid, og betegner hastigheten som en trykkpuls har i fluidet. Det er ved strømningshastigheter over lydets hastighet som kalles *kritisk strømming*. Kritisk strømming over injeksjonsventilen hindrer at eventuelle trykkendringer i produksjonsrøret vil påvirke gassinjeksjonen fra ringrommet. For at casing heading skal oppstå må strømmingen over injeksjonsventilen være lavere enn kritisk hastighet. Tetthetsbølger er ustabilitet som ikke skyldes dynamikken i ringrommet, og er derfor ikke avhengig av trykkommunikasjon mellom ringrommet og produksjonsrøret.

2.2.3. Casing Heading

I arbeidet til Bertuzzi, Welchon, og Poettman (1953) ble det postulert at gassløftustabilitet kunne bli beskrevet ved at en trykkendring i produksjonsrøret medførte en plutselig økning av gass fra ringrommet. Gassinjeksjonen er avhengig av trykket og volumet av gass i ringrommet. Om gasstilførselen til ringrommet er lavere enn injeksjonsraten, vil ringromstrykket synke, og gassinjeksjonen minke. Når den volumetriske tettheten avtar som følge av lavere injeksjonsrate, vil trykket i produksjonsrøret stige, og trykket i ringrommet vil bygge seg opp til et punkt hvor injeksjon av gass til produksjonsrøret igjen stiger. Syklusen beskriver casing heading ustabilitet. Graden av trykkommunikasjon mellom ringrommet og produksjonsrøret vil påvirke graden av ustabilitet produksjonen opplever. Hu og Golan (2003) mente at to betingelser var nødvendig for at casing heading skulle forekomme. Den ene betingelsen var at strømmingen i produksjonsrøret var gravitasjonsdominant, og den andre var at ringrommet hadde et stort volum med kompressibel gass.

2.2.4. Tetthetsbølger

Alhanati, Schmidt, Doty, og Lagerlef (1993) observerte at noen av brønnene i Prudhoe Bay hadde ustabilitet som ikke skyldtes casing heading. De observerte store oscillasjoner i trykket i produksjonsrøret, men kun svake oscillasjoner i ringrommet. Dette impliserer tilnærmet konstant gassinjeksjon til ringrommet, og skiller seg fra syklusen beskrevet for casing heading. Hu og Golan (2003) beskrev at tetthetsbølger kunne oppstå når gassinjeksjonen fra ringrommet var konstant. Enhver endring i innstrømming fra reservoaret ville dermed føre til en endret volumetrisk tetthet i bunnen av produksjonsrøret. Denne tetthetsvariasjonen vil forplante seg

oppover røret som en tetthetsbølge. Ofte har denne tetthetsbølgen en selvkontrollerende effekt. Dette skyldes at den økte volumetriske tettheten vil redusere innstrømningen fra reservoaret. Men den selvkontrollerende effekten har en tidsforsinkelse på grunn av tidsforsinkelsen innstrømningen har på trykkøkningen. I enkelte tilfeller vil tidsforsinkelsen være så stor at den selvkontrollerende effekten bryter sammen, og skaper oscillerende ratevariasjoner (Hu & Golan, 2003).

2.3. Predikere ustabilitet

På grunn av de mange problemene gassløftustabilitet medfører, er det er gjort forsøk på å forutsi når en kontinuerlig gassløftet brønn vil bli ustabil. Asheim (1988) publiserte to stabilitetskriterier som gir en sammenheng mellom stabil strømning og enkle gassløftparametere. Kriteriene tar utgangspunkt i makroskopisk ustabilitet, og at ustabiliteten skyldes positiv tilbakekobling fra ringrommet. Det første stabilitetskriteriet baseres på at innstrømningen fra reservoaret er mer sensitiv for trykkendringer enn tettheten av fluidet. Om dette er tilfelle så vil en reduksjon av trykket i produksjonsrøret føre til en økt volumetrisk fluidtetthet. En økning i fluidtettheten vil gjøre at trykket i produksjonsrøret vil stige og stabilisere strømningen. Det første kriteriet er gitt med ulikheten $F_1 = \frac{\delta \rho_i}{\delta P_{ti}} < 0$. Uttrykt med kjente parametere kan kriteriet skrives som:

$$F_1 = \frac{\rho_{gsc} B_g q_{gsc}^2}{q_{lsc} (EA_i)^2} > 1 \quad (2.15)$$

Ligning (2.15) kan omskrives slik at F_1 uttrykkes ved hjelp av trykktapet over injeksjonsventilen,

$$2\Delta P_c = \frac{\rho_g Q_g^2}{(EA)^2}, \text{ og trykkforskjellen mellom reservoaret og produksjonsrøret, } \Delta P_R = \frac{Q_o}{J} :$$

$$F_1 = 2 \frac{\Delta P_c}{\Delta P_R} \quad (2.16)$$

Ligning (2.16) gir at et høyere trykktap over injeksjonsventilen, en høy produktivitetsindeks eller en lav oljeproduksjon bidrar til økt stabilitet.

Om det første kriteriet brytes, vil en trykkreduksjon i produksjonsrøret medføre en økt innstrømning av gass fra ringrommet. Ved å anta en konstant tilførsel av gass til ringrommet, vil den økte injeksjonen redusere trykket i ringrommet.

Det andre kriteriet gir at om trykket i ringrommet synker hurtigere enn trykket i produksjonsrøret, vil gassinjeksjonen minke og dermed stabiliseres brønnen. Det andre kriteriet er gitt i Ligning (2.17).

$$F_2 = \frac{V_l}{V_c} \frac{P_{gi}}{(\rho_l - \rho_g)gL} \frac{Q_g + Q_l}{Q_l} \frac{1}{1 - F_1} > 1 \quad (2.17)$$

Kriteriene gjør det mulig å estimere om ustabilitet vil forekomme med den planlagte størrelsen på brønnen, og det valgte produksjonsnivået. Ved å ta hensyn til de forskjellige parameterne før brønnen er komplett, vil man kunne redusere risikoen for ustabil produksjon senere i brønnens liv. Parameterne som vil være av særlig interesse er ringrommets- og produksjonsrørets volum, samt ventilkarakteristikken til injeksjonsventilen. Av det første kriteriet vil et lite tverrsnittareal over ventilen virke stabiliserende på brønnen. Dette beskrives med at et lite tverrsnittareal vil øke strømmingen over tverrsnittet, og dermed komme nærmere kritisk strømning. Kritisk strømning vil som nevnt utelukke muligheten for at casing heading vil oppstå. Det andre kriteriet beskriver at et lavt volum i ringrommet vil virke stabiliserende. Dette skyldes kompressibiliteten til gassen. Et større kompressibelt volum, vil gi større tilbakekobling til produksjonsrøret ved trykkendringer.

2.4. Eksisterende stabiliseringstiltak

Vanlige tiltak for å bedre stabiliteten i gassløftede produksjonsbrønner er behandlet i forfatterens tidligere prosjektarbeid. Et sammendrag fra deler av prosjektarbeidet gitt i Larsen (2013) er derfor tatt med.

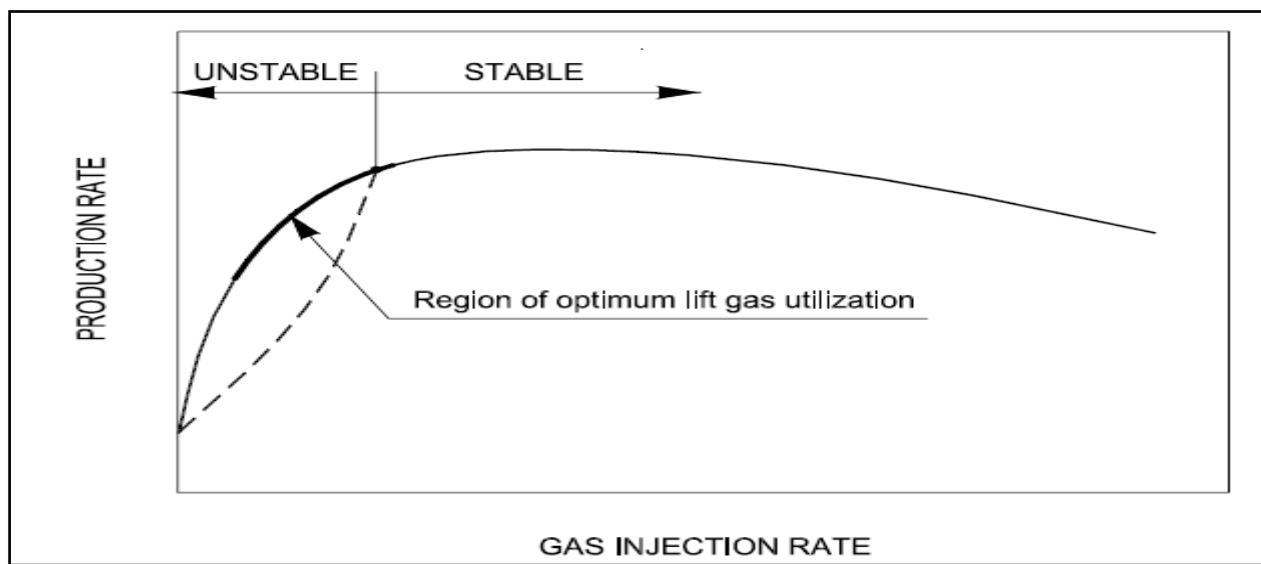
2.4.1. Overdimensjonering

De store strømningsvariasjonene som forekommer under ustabil strømning vil ofte medføre at produksjonssystemet ikke kan håndtere produksjonen. En naturlig løsning vil være å overdimensjonere produksjonssystemet. Ved å øke kapasiteten på produksjonssystemet vil ikke de store variasjonene i trykk og strømningsrater medføre noen risiko. Problemet ligger i at

overdimensjonering er en dyr løsning, og som opptar stor plass. På grunn av plassmangelen som det som oftest er på en plattform, er overdimensjonering en lite attraktiv løsning. Et alternativ til overdimensjonering er å øke gassinjeksjonsraten.

2.4.2. Økt gassinjeksjonsrate

Å øke gassinjeksjonsraten er et stabiliseringstiltak som ofte brukes i praksis. Fra stabilitetskriteriet gitt i (2.15) vises det at en økt injeksjonsrate virker stabiliserende på brønnen. I Hu (2005) er det gitt en sammenheng mellom gassinjeksjonsrate og oljeproduksjon. Sammenhengen er vist i Figur 2-4.



Figur 2-4: Oljeproduksjon som funksjon av injeksjonsrate, Hu (2005)

I den oppadgående delen av kurven er oljeproduksjonen gravitasjonsdominant. Det er her brønnen er mest utsatt for ustabil strømning. Punktet for optimal produksjonsrate er i dette område. Ved å øke gassinjeksjonen vil brønnen stabiliseres, men en økt injeksjonsrate vil øke kostnadene blant annet i form av ugunstig oljeproduksjon og økt gassforbruk. I mange tilfeller vil det være en begrensning på hvor mye gass som kan injiseres slik at tiltaket ikke kan brukes.

2.4.3. Redusere åpningen i injeksjonsventilen

Når en økning i gassinjeksjon ikke er mulig, kan en reduksjon i ventilåpningen ved injeksjonspunktet være et alternativ. Ligning (2.7) viser at graden av endringen på injeksjonsraten som følge av trykkvariasjoner i produksjonsrøret, avhenger av ventilåpningen til

injeksjonsventilen. En større ventilåpning vil øke påvirkningen en trykkforandring har på injeksjonsraten. Ved en tilstrekkelig liten ventilåpning vil strømmingen over ventilen nærme seg kritisk strømning. Trykkvariasjoner i produksjonsrøret vil dermed ikke påvirke injeksjonsraten, og injeksjonsraten vil være tilnærmet konstant. En konstant injeksjonsrate vil bryte den ustabile syklusen, forutsatt at ustabiliteten skyldes casing heading. Om ustabiliteten skyldes tetthetsbølger, vil en innsnevring i ventilåpningen ikke ha en effekt. Injeksjonsventilen er som oftest også statisk. Dette betyr at ventilåpningen ikke kan endres på en enkel måte. En reduksjon i ventilåpningen vil dermed medføre at brønnen må stenges, og en brønnintervensjon er nødvendig. Denne metoden er derfor kostbar, og i tillegg er det ikke en garanti for at metoden vil stabilisere brønnen. Både på grunn av typen ustabilitet, men også ved at en forandring i injeksjonsraten påvirker graden av kommunikasjon mellom ringrommet og produksjonsrøret. Som et enklere alternativ er det vanlig å strupe strømmingen ved brønnhode (Slupphaug et al., 2006).

2.4.4. Struping av produksjonen

Ved å redusere ventilåpningen ved brønnhode vil trykket før ventilen stige. Jansen og Shoham (1994) beskrev at når ventilåpningen reduseres, vil trykket stige proporsjonalt med akselerasjonen til væskesluggen. Dette fører til en senket strømningshastighet, og en jevnere gassdistribusjon som virker stabiliserende på brønnen. Bakdelen ved å strupe strømmingen ved brønnhode er at produksjonsraten reduseres. Metoden er dermed ikke en god løsning for å stabilisere en brønn langsiktig (Hu & Golan, 2003).

2.4.5. Dynamisk kontroll

Dynamiske kontrollmetoder som er uttestet baseres ofte på virkemåten til en PI kontroller. En PI kontroller benytter en kontrollstrategi som heter *feedback kontroll*. Slik som alle prosesskontrollere, så bygger feedback kontroll på tre grunnleggende operasjoner som må være tilstede (Smith & Corripio, 1997):

1. *Måling*: Målinger av variabelen som skal kontrolleres.
2. *Avgjørelse*: På bakgrunn av målingene blir det tatt en avgjørelse på hva som må gjøres for å beholde variabelen på en ønsket verdi.
3. *Handling*: Handlingen gjøres på bakgrunn av avgjørelsen. Ofte er dette en endring av en ventil.

Virkemåten til en feedback kontroller er at en handling utføres når en avgjørelse tas på bakgrunn av en ligning. Ligningen er basert på differansen mellom den målte verdien og setpunktet (Smith & Corripio, 1997). Setpunktet er den ønskede verdien som variabelen ideelt skal ha.

PI kontroller står for Proporsjonal-Integral kontroller. PI er likningen som benyttes til å danne en avgjørelse for hvordan handling som skal utføres. En PI kontroller har to ledd i ligningen som kalkuleres. Det første leddet er proporsjonalleddet:

$$m(t) = \underbrace{\bar{m} + K_c e(t)}_{\text{Pr oporsjonal ledd}} \quad (2.18)$$

I Ligning (2.18) er $m(t)$ kontrollerens output i %. Dette kan være for eksempel prosent av maks spenningssignal til en kontrollventil. Konstanten \bar{m} er verdien til kontrollerens output når differansen mellom setpunktet og målingen er null. Denne verdien er ofte satt til 50 % av kontrollerens output. Feilverdien $e(t)$ er differansen mellom setpunktet og målingen i prosent av transmitterens output. K_c er forholdet mellom kontrollerens output og transmitterens output til kontrolleren, og beskriver hvor stor endring som skal gjøres på kontrolleren ved et gitt avvik fra setpunkt.

Om kontrolleren kun benytter proporsjonalleddet vil det kunne oppstå en offset når feilverdien er lik 0. Et eksempel på hvordan offset kan oppstå er gitt på bakgrunn av eksempelet i Smith og Corripio (1997), og kan bli beskrevet ved å lage en kontrollstruktur som styrer vannivået i en tank. Om tanken får en fødestrøm på 10 liter i minuttet, som tilsvarer en transmitter output til en ventil som styrer strømmen ut av tanken på 50 %. Ved starten er vannivået på 1 meter, som er setpunktet, og strømmingen ut er lik strømmingen inn. Om strømmingen inn endres til 15 L/min, vil vannivået stige og kontrolleren vil derfor endre åpningen på ventilen for å senke vannivået igjen. Men for at ventilen skal gi ut 15 L/min slik at vannivået ikke endres, må ventilåpningen være annerledes enn hva den er for 50 % signal. For enkelhetsskyld er denne verdien antatt 60 % transmitter output. Den eneste måten for at signalet skal kunne gi ut 60 % er ved en feilverdi på 10 % i proporsjonalleddet. Det betyr at vannivået ikke vil være på setpunkt ved den nye strømningsraten på 15 L/min. Forskjellen mellom setpunkt og den nye stabile strømmingen blir kalt offset. For å hindre at offset skal oppstå blir kontrolleren tilført et integralledd som vist i Ligning (2.19).

$$m(t) = \underbrace{\bar{m} + K_c e(t)}_{\text{Pr oporsjonal ledd}} + \underbrace{\frac{K_c}{\tau_I} \int e(t) dt}_{\text{Integral ledd}} \quad (2.19)$$

I ligningen er τ_I integraltiden, og verdien må justeres for å oppnå en tilfredsstillende kontroll. Siden integralleddet fortsetter å endre kontrollereens output så lenge en feilverdi er tilstede, vil integralet gjøre at offset-verdien fra proporsjonalleddet elimineres (Smith & Corripio, 1997).

2.4.5.1. bruksområde på en gassløftet produksjonsbrønn

Feedback-kontrollere har blitt benyttet for å stabilisere ustabile gassløftbrønner. Generelt når en feedback-kontroller blir benyttet på en produksjonsbrønn er trykket ved et punkt i brønnen satt med et setpunkt. Målinger fra dette punktet, eller andre punkter for deretter å estimere trykket ved punktet, blir benyttet som utgangspunkt for endringen som gjøres med kontrolleren. Kontrolleren er som oftest produksjonsventilen ved brønnhode.

Hu og Golan (2003) simulerte en ustabil gassløftet produksjonsbrønn ved å bruke simuleringverktøyet *OLGA*. Formålet med simuleringen var å måle produksjonsgevinsten ved å bruke en dynamisk kontroller, fremfor statisk struping av brønnen med produksjonsventilen. Kontrollmetoden baserte seg på virkemåten til en PI kontroller, hvor setpunktet var optimalt bunnhullstrykk. Bunnhullstrykket ble regulert ved å styre produksjonsventilen ved brønnhode. Proporsjonalkonstanten ble bestemt med prøving og feiling. Integraltiden var basert på perioden til svingningene når brønnen produserte ustabil. Simuleringene ga at metoden kunne stabilisere brønnen, og samtidig opprettholde en høy produksjon.

Dalsmo, Halvorsen, og Slupphaug (2002) satt opp en feedback-kontroller på en produserende brønn på Bragefeltet i Nordsjøen. Brønnen hadde en ukontrollert sluggstrømning under gassløftet produksjon, men som ikke var forårsaket av casing heading. Manuell kontroll av produksjonsventilen hadde ingen god stabiliseringseffekt. Feedback-kontrolleren som var satt opp benyttet målinger av bunnhullstrykket til å justere produksjonsventilen automatisk. Kontrolleren viste god stabiliserende effekt når den var aktiv. Et problem oppsto når bunnhullstrykkmåleren sviktet. Svikten førte til at kontrolleren ikke fungerte, som førte til at brønnen igjen startet med ustabil produksjon. En kontrollstruktur som enkelt kan ta høyde for at målere kan svikte, slik at andre målere kan benyttes i stede, er nødvendig for å øke robustheten til

kontrolleren. En lignende kontrollmetode ble benyttet under det eksperimentelle arbeidet til Eikrem, Aamo, og Foss (2008). I tillegg ble kontrollstrukturen endret for å undersøke muligheten til å benytte andre variabler for å oppnå stabilitet.

2.5. Foreslått kontrollmetode

I beskrivelsen av casing heading ble det forklart at en drivende kraft i den ustabile syklusen var dynamikken som forekommer i ringrommet. Den foreslåtte metoden har til formål å begrense denne drivende kraften ved å benytte en ventil som stenger injeksjonsraten ved injeksjonspunktet. Stengingen av ventilen ved injeksjonspunktet skjer med en dynamisk kontroller, hvor frekvensen av stengningen bestemmes manuelt.

Ved ustabil produksjon vil strømningsraten og trykket i ringrommet svinge med en spesifikk svingefrekvens. Svingefrekvensen avhenger av volumet i ringrommet og produksjonsrøret, trykk og strømningsrater. For å avgjøre systemets svingefrekvens kan Fourier-transformasjon benyttes. Fourier-transformasjon er en matematisk metode som transformerer gitte måledata fra tidsdomene til frekvensdomene. En beskrivelse av Fourier-transformasjon og dens virkemåte er gitt i Appendix A. Siden svingningene som observeres i brønnen kan måles i både trykk- og ratemålinger kan svingefrekvensen bli funnet fra flere måleinstrumenter. I prosjektoppgaven til Larsen (2013) ble en brønn i Norskehavet undersøkt med frekvensanalyse. Når brønnen viste ustabil strømning var svingefrekvensen lavere desto høyere amplitude det var på svingningene. Ved å stenge injeksjonsventilen med en gitt frekvens, som er høyere enn systemets naturlige svingefrekvens, er tanken at stengningen vil fremprovosere en høyere svingefrekvens som hindrer forekomsten av de naturlige svingningene. Når produksjonen stabiliseres med en høyere svingefrekvens vil amplituden på svingningene reduseres. Om injeksjonsraten stenges med en satt frekvens, vil syklusen til casing heading brytes. Trykket i ringrommet vil ikke kunne synke like langt, slik at trykkoppbygningen i ringrommet ikke vil ta like lang tid. Dermed vil injeksjonsraten holdes jevnere når ventilen åpnes. Dette fører til en jevnere distribuering av gass i produksjonsrøret, slik at den volumetriske tettheten holdes jevn og vil føre til en stabil produksjon.

Siden metoden baseres på å skape en destruktiv interferens som forhindrer at brønnen kan opprettholde en ustabil syklus, vil metoden testes ved et annet punkt i produksjonsrøret. Punktet er satt til toppen av røret, som tilsvarer plasseringen til produksjonsventilen ved brønnhode på en

virkelig brønn. En avstengning av ventilen på dette punktet vil forårsake en trykkforandring i produksjonsrøret. En syklisk avstengning kan derfor skape trykkvariasjoner som destruerer produksjonens ustabile svingninger på lik linje som ved injeksjonspunktet. Endringen i plassering gjøres for å fastslå om metoden kan benyttes ved flere punkter i brønnen.

3. Tidligere laboratoriearbeid

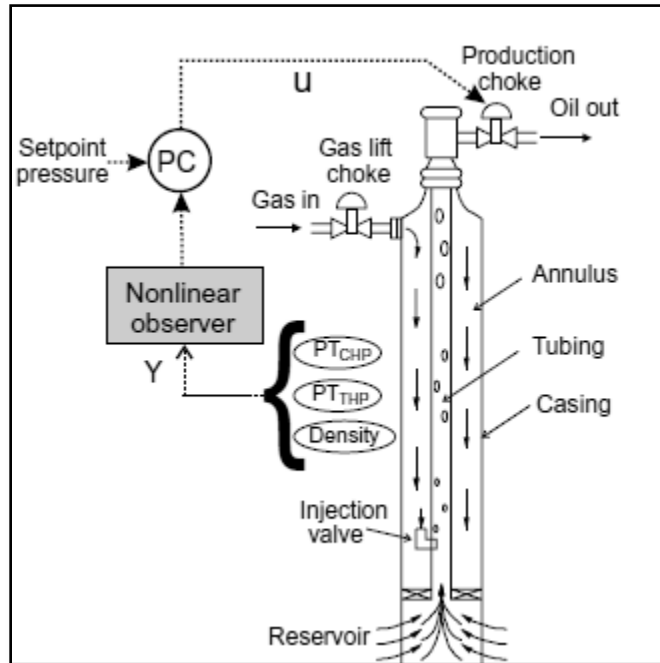
Det er utført flere eksperimentelle forsøk tidligere som undersøker tiltak som kan virke stabiliserende på en ustabil produksjonsbrønn. Det vil i dette kapittelet bli gitt en beskrivelse av tidligere utført laboratoriearbeid som har en relevans opp i mot laboratoriearbeidet som er gjort i sammenheng med denne oppgaven. Hovedformålet vil være å sammenligne modelloppsettet til de tidligere eksperimentene med modelloppsettet i denne oppgaven. Løsningsmetodene som har blitt benyttet i hvert av eksperimentene vil også bli belyst i korthet.

3.1. Aamo, Eikrem, Siahaan, og Foss (2005)

En laboratoriemodell ble laget med et formål om å stabilisere en gassløftet brønn med en PI Kontroller. Laboratoriemodellen har mange likhetstrekk med modellen som ble laget til denne oppgaven. Laboratoriemodellen besto av et 18 m høyt produksjonsrør, med 20 mm indre diameter. Reservoaret besto av et tilsvarende høyt rør med en indre diameter på 80 mm. Reservoartrykket tilsvarte trykket fra den hydrostatiske væskekolonnen i røret. Modellen hadde en gassflaske som representerte volumet i ringrommet, hvor injeksjonspunktet var ved bunnen av produksjonsrøret.

Under forsøkene hadde modellen en fødestrøm av gass til ringrommet, hvor gasstilførselen var konstant 11 L/min ved standard betingelser. Målingene som ble tatt under testene var tettheten ved toppen av røret, ringromstrykket og brønnehodetrykket. Tetthetsmålingene ble benyttet til å beregne trykket ved bunnen av produksjonsrøret. PI kontrolleren justerte ventilåpningen ved brønnehode, ved å benytte trykkmålingene og tettheten. Et skjema for kontrollstrukturen er vist i Figur 3-1.

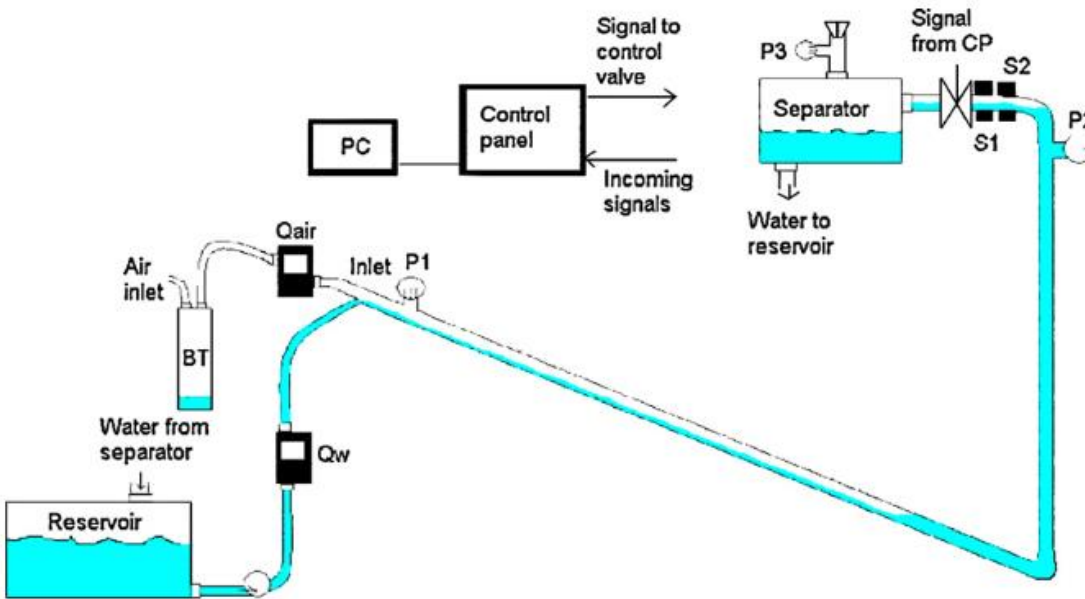
Resultatene viste en stabilisering av brønnen med en ventilåpning på 79 % ved brønnehode. Forsøkene viste at modellen produserte ustabil med en ventilåpning på 70 % uten kontrolleren. Produksjonen var 5 % høyere når kontrolleren var aktivert, enn om brønnen hadde produsert ved en maksimal stabil produksjonsrate uten bruk av kontrolleren.



Figur 3-1: Kontrollstruktur for PI kontroller. Hentet fra Aamo et al. (2005)

3.2. Sivertsen, Storakaas, og Skogestad (2010)

Hovedformålet med laboratoriemodellen beskrevet i Sivertsen et al. (2010) var å undersøke stabilisering av *stigerørs-slugging*. Stigerørs-slugging er en ustabilitet som er forårsaket av en oppsamling av væske i overgangen fra rørledningen langs havbunnen og stigerøret. Væsken som samles hindrer gassen i å strømme. Det vil derfor bli en trykkoppbygning i gassen opp til et punkt hvor gasstrykket overkommer det hydrostatiske trykket til den blokkerende væsken (Sivertsen et al., 2010). Selv om opprinnelsen til stigerørs-slugging er forskjellig fra opprinnelsen til casing heading, er det eksperimentelle arbeidet til Sivertsen et al. (2010) relevant på grunn av utformingen av modellen som benyttes. Modellen er bygd opp med gasstilførsel, en reservoartank, en rørledning, en resirkulasjon av vannet og måleinstrumenter som skal overvåke og kontrollere produksjonen. En skjematisk skisse over produksjonssystemet er vist i Figur 3-2. For at ustabiliteten skulle oppstå var det nødt til å være en buffertank for gassen før injeksjonspunktet, tanken er betegnet som *BT*.



Figur 3-2: Modelloppsett, hentet fra Sivertsen et al. (2010)

Fra reservoaret pumpes det vann inn til produksjonssystemet. Dette skiller seg fra laboriemodellen brukt i denne diplomoppgaven. Produksjonsrøret består av et fleksibelt rør med en diameter på 20 mm. Røret før stigerøret er på 3 meter, og stigerøret er på 2,7 meter. Likhetene mellom modellen og modellen som benyttes i denne diplomoppgaven er at vann og luft benyttes som fluider, det er en gasstilførsel med et kompressibelt volum som er drivkraften til ustabiliteten, rørledningens diameter er i samme størrelsesorden, samt at ustabiliteten som oppstår har store likhetstrekk. En vesentlig forskjell er rørets fasong. Dette kommer følgelig av at modellen skal simulere to forskjellige drivende mekanismer til ustabiliteten. Modellen som er gitt ovenfor hadde en forstyrrelse i gasstilførselen som kom av trykksettingen i laboriets luftsystem. Luftsystemet hadde en trykkoppbygningsperiode på 200 sekunder som ga utslag på gasstilførselen, og påvirket derfor hele systemet. I modellen i denne oppgaven er dette forhindre ved at en trykkregulator holder konstant trykk ved gasstilførselen, samt at en kritisk hastighet holdes over ventilen.

Kontrollmetoden som ble brukt under eksperimentet var en feedback kontroller. Resultatet av kontrolleren viste blant annet at tidspunktet for når kontrolleren ble aktivert hadde innvirkning på hvor lang tid kontrolleren brukte på å stabilisere strømmingen. En utvidelse til et medium-skala modelloppsett ble utført i Sivertsen, Alstad, og Skogestad (2009), hvor et 10 meter høyt stigerør

med indre diameter på 7,6 cm ble benyttet. Eksperimentene viste lignende resultater som de observert i små-skala eksperimentet. Tidspunktet for når kontrolleren ble aktivert var også viktig for dette eksperimentet. Ved riktig tidspunkt klarte kontrolleren å stabilisere strømmingen, men ved feil tidspunkt var stabilisering ikke mulig. Dette var forskjellig fra små-skala eksperimentet, hvor kun tiden det tok før stabiliseringen fant sted var lengre ved feil tidspunkt. En del av konklusjonen i rapporten var at resultatene fra små-skala eksperimentet kunne overføres til mer realistiske brønnforhold.

3.3. Sagberg (2013)

Laborariemodellen som ble laget i diplomoppgaven til Sagberg (2013) er en småskala rigg. Eksperimentene som er utført i oppgaven undersøker stabilisering av en gassløftet brønn på bakgrunn av kjente stabilitetsteorier. Modellen bygger på de samme prinsippene som laborariemodellen i denne oppgaven, men med andre størrelser på komponentene.

Produksjonsrøret består av et 198 cm vertikalt rør med 42 mm diameter. Reservoaret har en tilsvarende høyde som produksjonsrøret, men med en diameter på 185 mm. Produksjonsrøret har en gassinjeksjon ved bunnen av røret. Gassen blir tilført via en kompressor, og gassen strømmer igjennom et kompressibelt volum før den injiseres inn i produksjonsrøret. Under forsøkene blir trykket i det kompressible volumet målt med et manometer. Gasstilførselen og injeksjonsraten blir målt med hvert sitt rotameter. Et u-rørsmanometer måler trykktapet over injeksjonsventilen, og et rørmanometer måler trykkfallet mellom reservoaret og produksjonsrøret. Et vannrotameter måler vanninnstrømmingen. Disse målemetodene er visuelle målemetoder. Det betyr at målingene ikke blir logget med en datainnsamler. Det er kun en impedansmåler som logges elektronisk. Impedansmåleren logger fasefraksjonen i produksjonsrøret, og benyttes til frekvensanalyse av produksjonen. Fluidene som benyttes er vann og luft. Siden impedansmåleren måler motstanden mellom to elektroder, vil målingene inneholde naturlig støy. Grafer som viser motstanden over tid i oppgaven viser store svingninger i motstanden slik at frekvensspekteret har betydelige utslag over et større område, og dermed skygger brønnens naturlige svingefrekvens.

Resultatene til Sagberg (2013) viste at forsøkene hadde god overensstemmelse mellom observerte endringer og hva som predikeres gjennom stabilitetsteoriene. Forsøkene viste blant annet at en lavere innstrømningsmotstand virket stabiliserende på produksjonen. En økt gassinjeksjonsrate virket stabiliserende, men ved endret gassinjeksjonsrate ble det i tillegg observert et avvik

mellom predikert og observert produksjon. Modellen hadde en stabiliserende effekt ved lave gassinjeksjonsrater. Dette skiller seg fra reelle produksjonsbrønner og hva stabilitetsteoriene predikerer. Forfatteren hevdet at årsaken ligger i at ventilen ved injeksjonspunktet justeres for å beholde konstant trykktap. Dette er ikke tilfelle i reelle brønner hvor ventilåpningen som oftest holdes konstant. Videre hevdet forfatteren at dette kun er av teoretisk interesse siden produksjonsraten er i et område som ikke vil være aktuell under reell produksjon.

Laboratoriemodellen til Sagberg (2013) har mange likhetstrekk med modellen som benyttes i denne avhandlingen. Laboratoriemodellen viser også at den simulerer casing heading ustabilitet godt. Et problem med modellen er målemetodene. Siden målingene i oppgaven er visuelle, med unntak av impedansmåleren, vil det settes spørsmålstegn til nøyaktigheten av målingene. I denne oppgaven er måleinstrumentene som ikke logges elektronisk kun brukt til å initiere forsøkene. Under forsøkene er det elektroniske måleinstrumenter som måler trykk og strømning slik at en analyse kan gjøres i ettertid på måledataene.

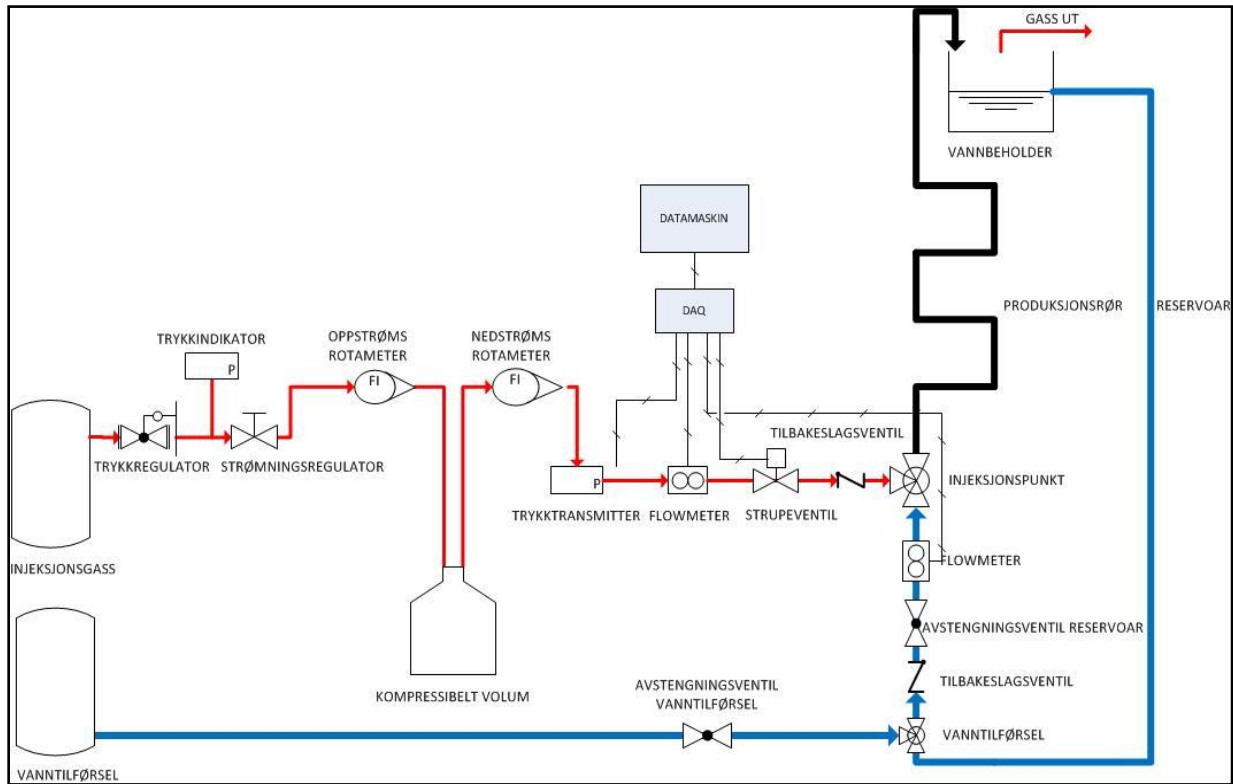
4. Eksperimentelt arbeid

4.1. Formålet med eksperimentet

Formålet til det eksperimentelle arbeidet er å undersøke muligheten til å stabilisere en brønn med den foreslåtte stabiliseringsmetoden. Metoden rettes mot stabilisering av casing heading. Metoden har ikke tidligere blitt omtalt, og effekten er ikke kjent. Det er derfor usikkerheter i hvorvidt metoden vil klare å stabilisere en brønn på en tilfredsstillende måte. Hvis metoden viser seg å være effektiv, hvor effektiv er den i forhold til eksisterende metoder som benyttes i praksis i dag?

4.2. Modellbeskrivelse

Modelloppsettet er konstruert for å kunne simulere en ustabil gassløftet produksjonsbrønn. Modellen vil derfor inkludere enheter som representerer et reservoar, et produksjonsrør, en gasstilførsel som injiseres inn i produksjonsrøret fra et ringrom, samt diverse måleinstrumenter og kontrollere. Et prosessdiagram av modelloppsettet er gitt i Figur 4-1.



Figur 4-1: Modelloppsett

Fluid og komponentspesifikasjoner er oppgitt i Tabell 1, og en detaljert beskrivelse over reservoaret, produksjonsrøret, knutepunktet og måleinstrumentene som benyttes under forsøkene er gitt i de påfølgende avsnitt.

Tabell 1: Fluid og komponentspesifikasjoner

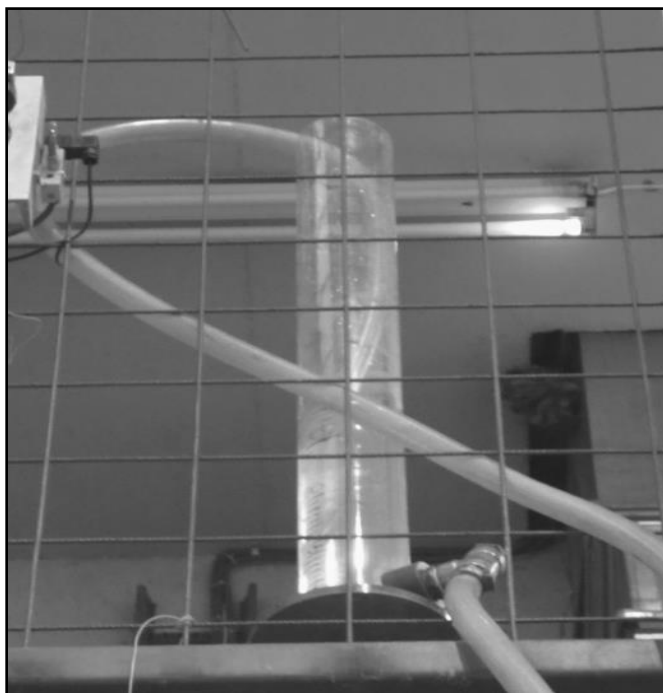
FLUIDEGENSKAPER		
	Reservoarfluid	Gass
Komposisjon	H_2O	Luft
Tetthet	1000 kg/m ³	1,2 kg/m ³

GASSTILFØRSEL		
Gasstank	Volum	20 L / 60 L
Gasslange	Indre diameter	10 mm
	Lengde	7,80 meter
	Volum	0,6 L

VÆSKETILFØRSEL		
Reservoar	Lengde	6,0 meter
	Høyde	4,2 meter
	Indre diameter	25 mm
	Volum	2,9 L
Vannbeholder	Volum	30 L
Produksjonsrør	Lengde	7,5 meter
	Indre diameter	25 mm
	Volum	3,7 L

4.2.1. Reservoaret

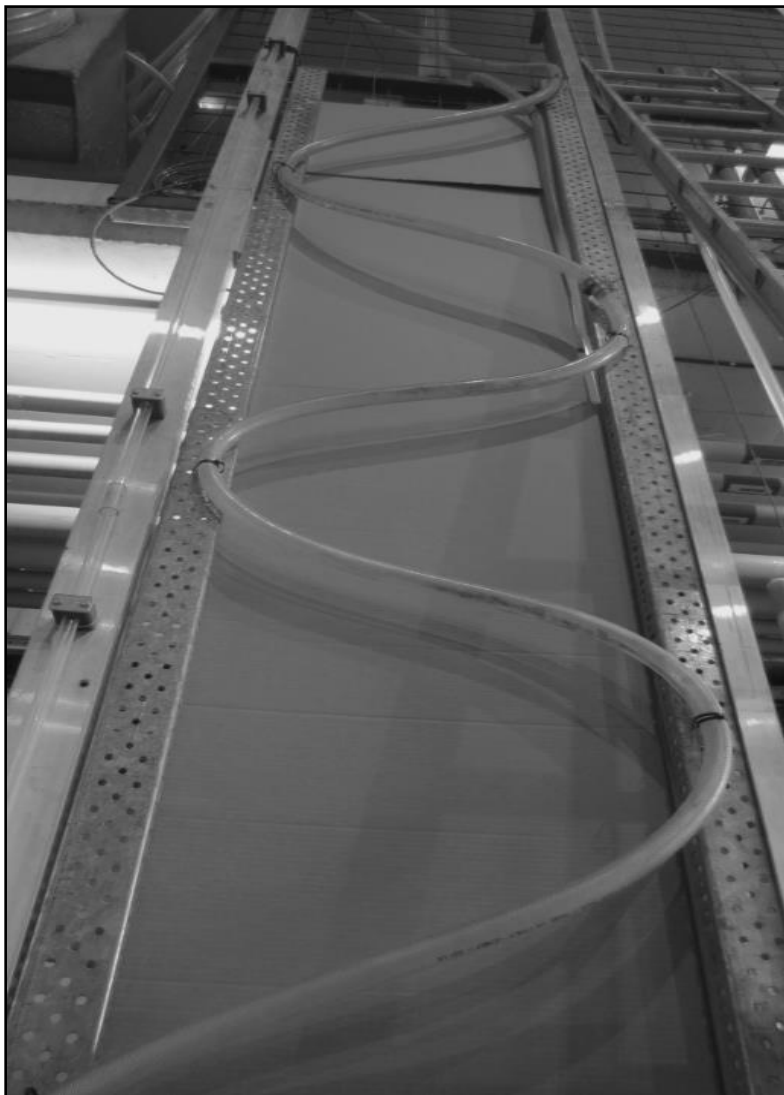
Reservoaret består av en åpen tank, vist i Figur 4-2, som er plassert ved en høyde på 4,2 meter. Et vertikalt rør er tilkoblet tankens underside, og strekker seg ned til bakkenivå. Ved bakkenivået er røret tilkoblet et knutepunkt som sammenkobler produksjonsrøret med reservoaret. Ved koblingen er det plassert en avstengningsventil, samt en tilbakeslagsventil for å hindre tilbakestrømning til reservoaret under produksjon. Tanken er delvis fylt med væske, og væskekolonnen i røret skaper bunnhullstrykket. Under forsøkene blir tanken fylt opp til et angitt punkt på tanken, slik at høyden til væskekolonnen vil være lik for alle gjennomkjøringene. Væsken som fylles i reservoaret er rent vann.



Figur 4-2: Reservoartank

4.2.2. Produksjonsrøret

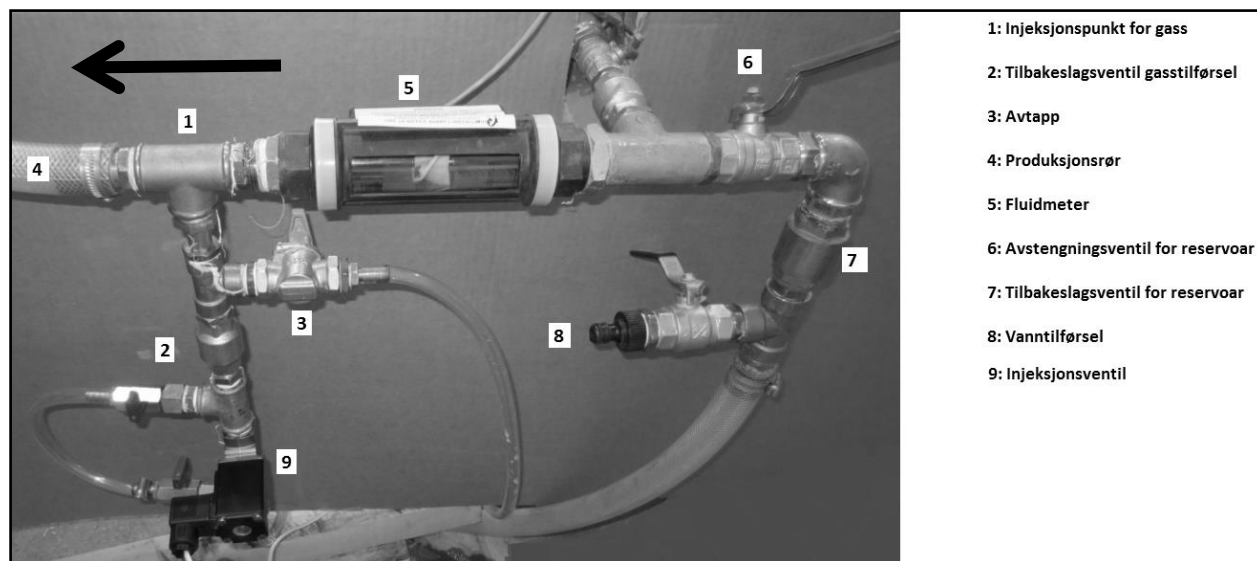
Produksjonsrøret, vist i Figur 4-3, består av et fleksibelt rør med en indre diameter på 25 mm og en lengde på 7,5 meter. Produksjonsrøret er kveilet rundt to pilarer med en avstand på 1 m. Produksjonsrøret kveiles for å øke ganglengden til den produserende væsken. Forlengelsen gjør at en eventuell variasjon i injeksjonsrate vil bruke lengre tid til å forplante seg oppover i produksjonsrøret. Enden av røret er åpen mot atmosfære, og væsken sirkuleres tilbake i tanken som er koblet til reservoaret. Siden modellen ikke har et strømningspotensial, er produksjonen avhengig av gassløft for å produsere.



Figur 4-3: Produksjonsrøret

4.2.3. Knutepunktet

Knutepunktet betegner den delen av modellen som sammenkobler reservoaret med produksjonsrøret. Knutepunktet innehar et fluid-meter, injeksjonspunktet for gass, en avtapp og en vanntilførsel til reservoaret. I Figur 4-4 er knutepunktet vist. En tilbakeslagsventil er plassert ved gassinjeksjonspunktet for å hindre væskestrømning inn til ringrommet. Væskestrømmens retning er vist med en pil.



Figur 4-4: Knutepunktet i modellen

4.2.4. Gasstilførsel

Gassen som benyttes under forsøkene er komprimert luft. Trykket reguleres ved hjelp av en reguleringsventil. Ringrommet består av en lukket tank, samt en gasslange på 7,8 meter. Gasslangen har en indre diameter på 10 mm. Volumet på gasstanken kan endres til enten 20 liter eller 60 liter. Gasstilførselen kan omdirigeres utenom tanken, slik at den dynamiske effekten i ringrommet reduseres. Det er tilkoblet et rotameter oppstrøms for tanken. Et rotameter er en strømningsmåler hvor strømningshastigheten blir indikert ved hjelp av en flottør. Flottøren er plassert i et vertikalt rør, og når strømmingen passerer røret løftes flottøren til et punkt som avhenger av strømningshastigheten. Rotameteret har en angitt maksimal kapasitet, og flottørens posisjon indikerer prosent av denne verdien. Rotametrene oppsett i denne modellen er vist i Figur 4-5. Rotameteret til venstre i figuren benyttes til å bekrefte konstant gasstilførsel inn til ringrommet. Rotameteret til høyre er plassert etter tanken og skal kun vise indikasjoner på eventuelle ratevariasjoner som oppstår ved injeksjonspunktet, ikke til kvantitative målinger.



Figur 4-5: Rotametrene som er brukt i modellen

De kvantitative målingene gjøres med en trykktransmitter og en strømningsmåler som er koblet til gasslangen etter gasstanken. Etter strømningsmåleren er det en slange som fører gassen videre til knutepunktet. Ved knutepunktet er det en injeksjonsventil som åpner for kommunikasjon mellom ringrommet og produksjonsrøret. Ventilen vil være uten trykktap for ikke å redusere den dynamiske effekten ringromsvolumet har på ustabiliteten som oppstår under produksjon.

4.2.5. Elektroniske måleinstrumenter

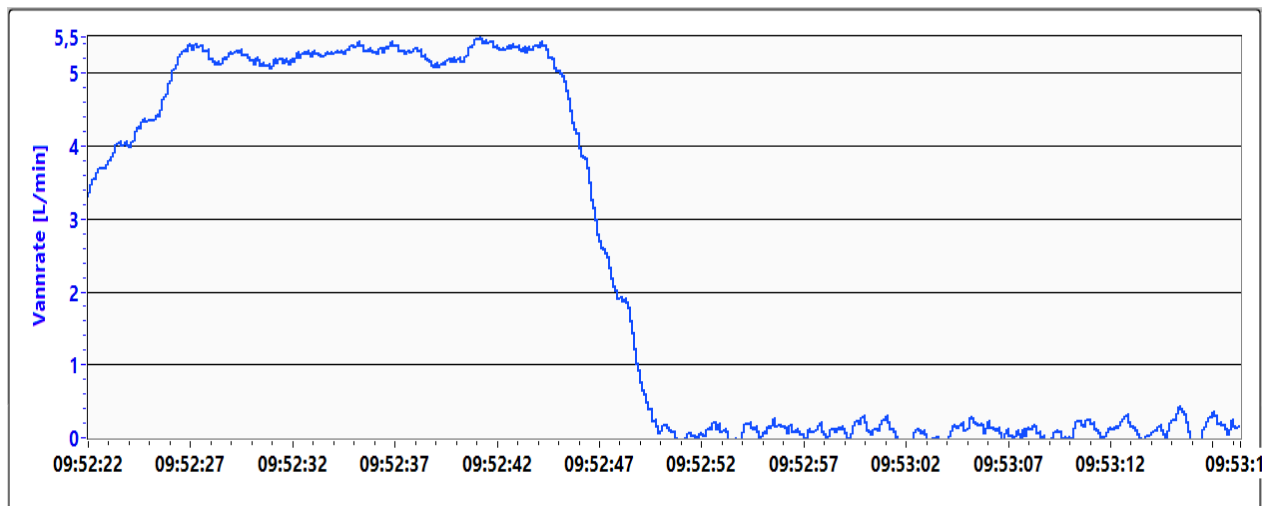
For å kunne gjennomføre en analyse med modellen er det påkoblet flere elektroniske måleinstrumenter. Måleinstrumentene er ment til å skape et vurderingsgrunnlag for justeringer som skal gjøres i produksjonen. Måleinstrumentene sender et analogt signal til en datainnsamler, slik at målingene kan overvåkes og analyseres. De elektroniske instrumentene innebefatter et fluidmeter, en trykktransmitter og en gassratemåler.

4.2.5.1. Fluidmeter

Fluidmetret har til formål å måle vanninnstrømningen. Plasseringen til fluidmetret er vist i punkt 5 i Figur 4-4, og er plassert før gassinjeksjonsventilen i knutepunktet. Den er plassert før

gassinjeksjonen siden målingene fra fluidmetret kun er nøyaktige for enfaset strømming. Målingene vil dermed indikere vanninnstrømmningen fra reservoaret. Spenningen måleren sender har et utslagsområde mellom 2-10 volt, og har en lineær strømningskala mellom 0-100 L/min . Programmet som tolker signalet skalerer derfor rådataene som en lineær funksjon.

Det ble utført en strømmingstest for å kontrollere nøyaktigheten til fluidmetret. Oppsettet til testen besto av en vanntilførsel, et rotameter og fluidmåleren. Vanntilførselen kunne reguleres, og vannet fra tilførselen strømmet gjennom et rotameter med en vannkapasitet opp til $0,313 \text{ m}^3 / h \approx 5,217 \text{ L} / \text{min}$. Deretter strømmet vannet gjennom fluidmetret og ut i en tank som var åpen mot luft. Testen ble utført ved at vannstrømmingen ble regulert til 100 % av strømningskapasiteten til rotameteret, deretter ble vanntilførselen stengt. Resultatet av testen er vist i Figur 4-6. Testen viser at fluidmetret har en sentrering rundt 5,2 L/min, noe som stemmer godt med den målte verdien på rotameteret. Fluidmetret har en større grad av støy på målingene enn hva de andre måleinstrumentene har vist. Dette kommer frem av målingene når vanntilførselen er skrudd av, og vannraten er lik 0. I denne perioden har målingene flere utslag, men er sentrert rundt 0 L/min. Ut i fra testen er det gitt at fluidmetret har god nok nøyaktighet til å kunne brukes i laboratorieforsøkene.



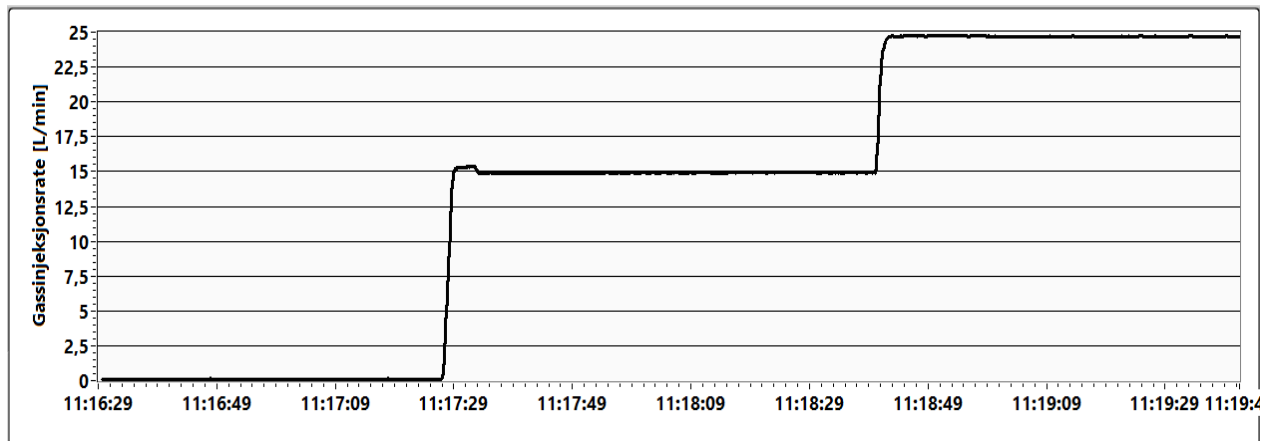
Figur 4-6: Kontroll av nøyaktigheten til vannratemåleren

4.2.5.2. Gassratemåler

Gassratemåleren gir ut et spenningsignal mellom 1 og 5 volt. Måleren er kalibrert med N_2 gass, hvor strømningsområde ligger mellom 0 og 25 L/min. Siden kalibreringen av gassratemåleren er

gjort med en annen gass-sammensetning enn luft, kan måleren angi en feil strømningsverdi. Siden strømmingen foregår under lave strømningsrater og trykk, vil ikke denne feilen være av betydning.

En test for å kontrollere nøyaktigheten til gassratemåleren ble også utført. En gasslange med komprimert gass ble tilkoblet et rotameter og den elektroniske gassratemåleren. Enden av slangen var åpen til atmosfære. Gassen tilføres slangen fra den samme kompressoren som benyttes i eksperimentene. Strømmingen ble regulert ved hjelp av en strupeventil. Testen startet målingene med gasstilførselen avstengt. I dette område viste gassratemåleren en konstant verdi lik null. Etter en kort periode ble ventilen åpnet, og regulert til et punkt hvor rotameteret viste en verdi på 15 L/min. Rotameterets verdi ble avlest visuelt. I denne perioden viste gassratemåleren en jevn strøm på 15 L/min, med kun små variasjoner. Etter en stund ble ventilen åpnet ytterligere til 25 L/min, noe som tilsvarer den høyeste strømmingen gassratemåleren er beregnet for. Under denne perioden var det et mindre avvik som var på under 1 L/min. Siden forsøkene som ble utført i eksperimentene hadde en gasstilførsel på 15,6 L/min, er strømmingen godt innenfor gassratemålerens nøyaktighetsområde. Siden analysen benytter gjennomsnittsverdier, antas det at de små feilmarginene som fremkommer av naturlig støy ikke innvirker på resultatet i nevneverdig grad. Testen av gassratemåleren er vist i Figur 4-7.

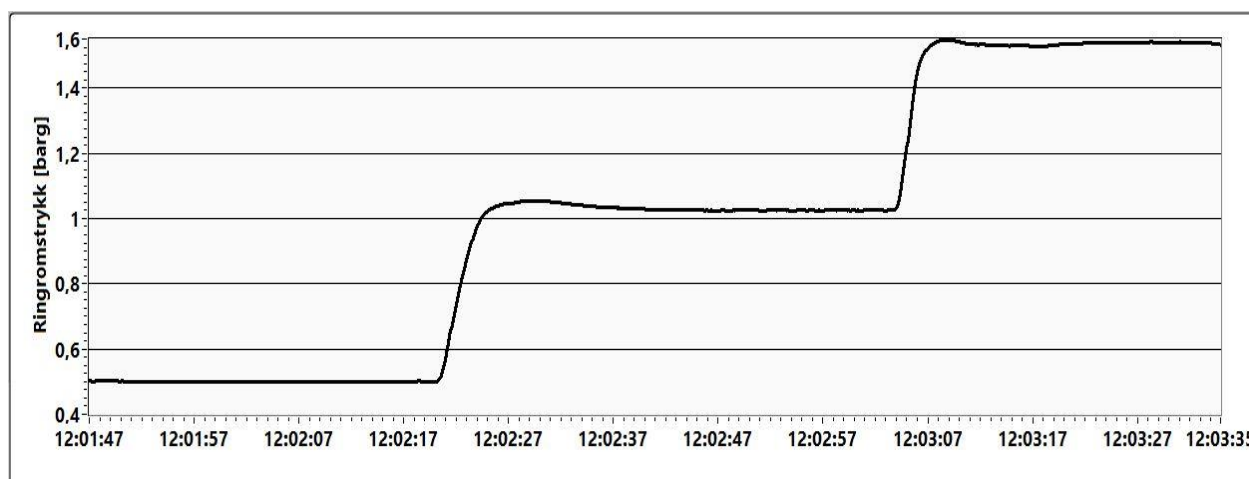


Figur 4-7: Kontroll av nøyaktigheten til gassinjeksjonsmåleren

4.2.5.3. Trykktransmitter

Trykktransmitteren måler ringromstrykket ved injeksjonspunktet. På lik linje med fluidmetret sender trykktransmitteren ut et spenningssignal. Signalets spenningsområde ligger mellom 2-10 volt, og skaleres lineært mellom 0-2,5 barg.

En lignende kontroll av nøyaktigheten ble utført med trykktransmitteren. I denne testen er gassratemåleren fra den tidligere testen skiftet ut med trykktransmitteren, og rotameteret er skiftet ut med et manometer. Enden på røret er blokkert. Røret trykkes til 0,5 barg. Trykket blir visuelt bekreftet med manometeret. Det er derfor en mulighet for feil i avlesningen av manometeret. I perioden hvor trykket er satt til 0,5 barg, viser trykktransmitteren målinger på tilsvarende trykk. Deretter settes trykket til 1 barg. Under denne perioden har trykktransmitteren trykkmålinger på rundt 1,03~1,05 barg. Når trykket økes til 1,5 barg viser trykktransmitteren målinger på 1,56~1,58 barg. Avlesningene er noe høyere enn hva manometeret tilsier. Selv om målingene er noe høyere enn satt trykk, er det vanskelig å utelukke feil i den visuelle avlesningen på manometeret. Feilverdien på trykktransmitteren kan derfor skyldes feil skalering av spenningssignalet fra måleren, eller feil avlesning på manometeret. Siden både manometeret og trykktransmitteren benyttes under forsøkene vil denne feilen være tilstede i resultatene.



Figur 4-8: Kontroll av nøyaktigheten til trykktransmitteren

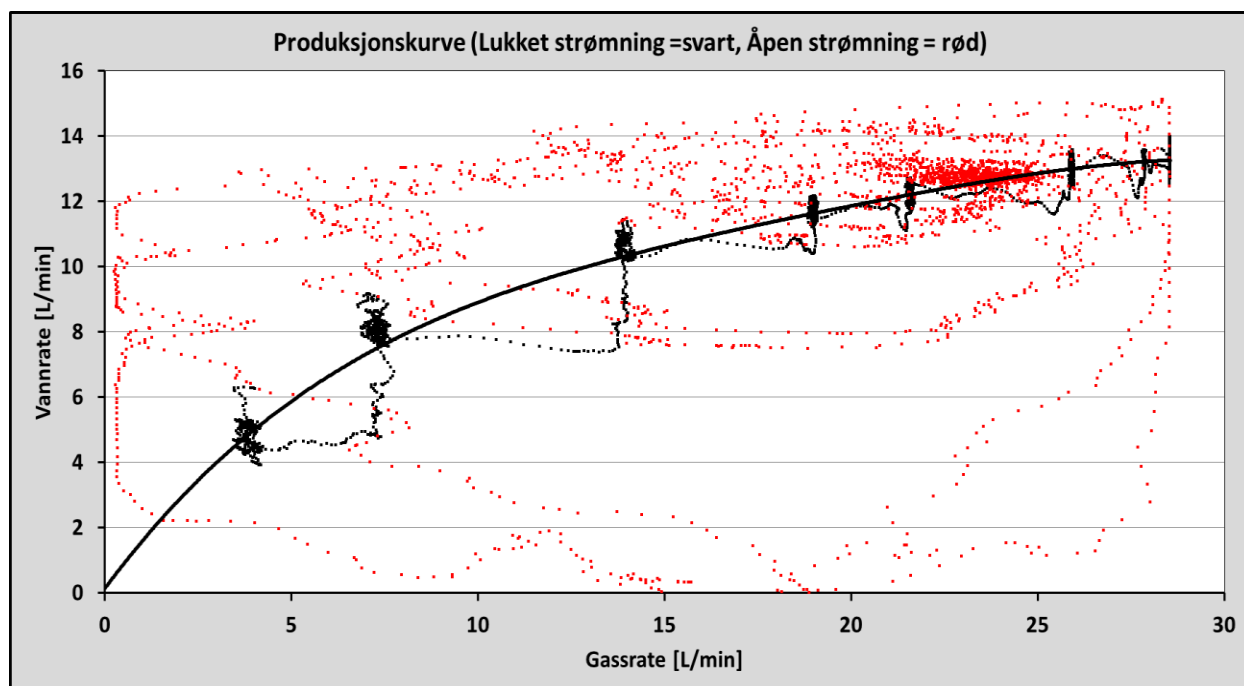
4.3. Modellens gyldighet og relevans

Trykk, strømningsrater og brønnparametere er sterkt forminskede i modelloppsettet. Dette skaper en usikkerhet i hvorvidt modellen klarer å gjenskape dynamikken som observeres i virkelige brønner. Forskjeller i gass- og væskesammensetning vil også kunne føre til at

laboratiemodellen vil ha en annerledes respons på endringer enn hva en reell brønn ville hatt. For å undersøke responsen til modellen er det utført en produksjonstest. Produksjonstesten skal fastslå om modellen reagerer på økt gassinjeksjon slik som det antydes i Figur 2-4. Om produksjonstesten er positiv må modellen være nødt til å kunne gjenskape en kontinuerlig ustabil syklus som kan identifiseres som casing heading. Målingene av trykk og strømming vil sammenlignes med hva man kan forvente av beskrivelsen til casing heading gitt i avsnitt 2.2.3. Om modellen viser en typisk ustabil syklus, vil vanlige stabiliseringstiltak bli utført på modellen for å se om modellen responderer på en forventet måte.

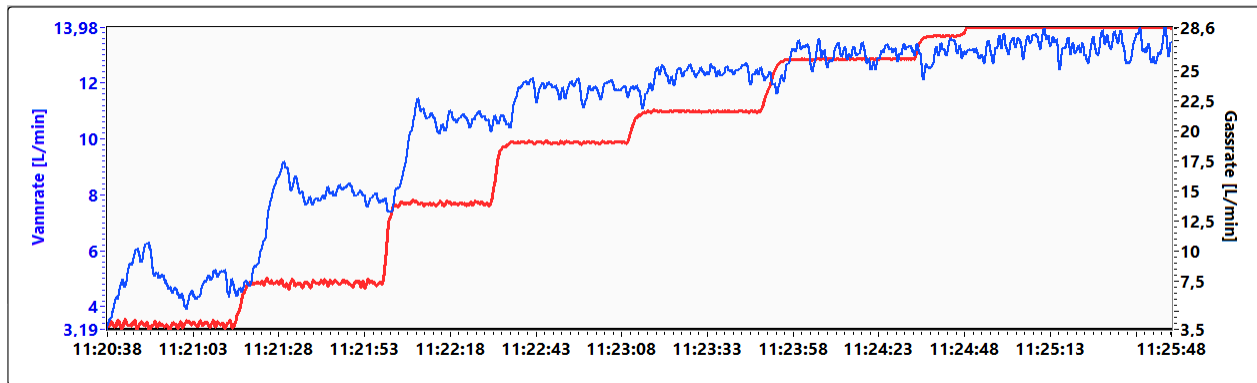
4.3.1. Produksjonstest

Produksjonstesten ble utført med stegvis økning i tilførselen av gass, og ble gjennomført to ganger. I den første testen var det kompressible volumet avstengt, slik at produksjonssystemet produserte stabilt for alle gassinjeksjonsrater. Denne testen er vist med svarte punkter i Figur 4-9.



Figur 4-9: Laboratiemodellens produksjonskurve

Punktene viser vanninnstrømning som funksjon av gassrate. Grafen viser områder med høy konsentrasjon av punkter. Dette er områdene hvor gassinjeksjonsraten er holdt konstant. Produksjonstesten i tidsdomene er vist i Figur 4-10. En 4.grads polynom trendlinje er tilpasset punktene. De røde punktene viser den andre produksjonstesten.



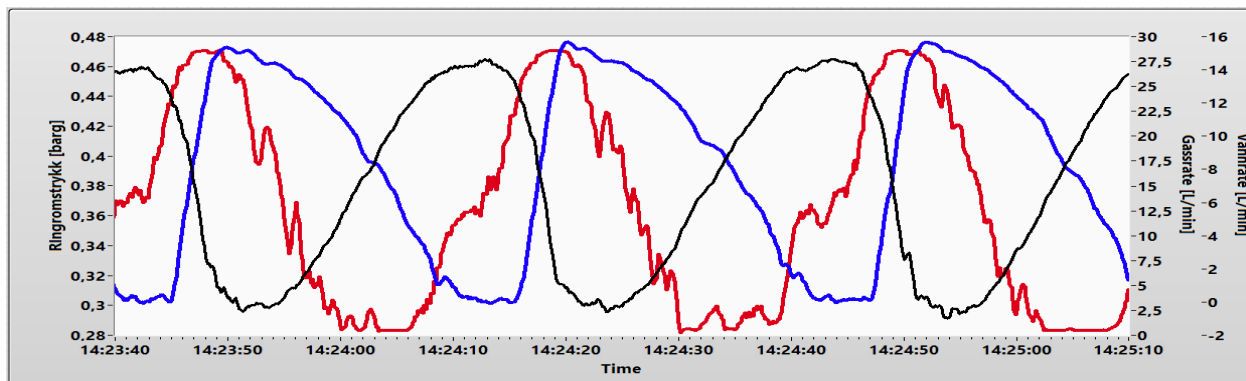
Figur 4-10: Produksjonskurve for 1. test (gassinjeksjon i rødt, vanninnstrømning i blått)

I den andre testen er det kompressible volumet åpent, slik at overgangen fra ustabil- til stabil strømning kan bli kartlagt. De røde punktene viser en konsentrering rundt 23 L/min injeksjonsrate, og vilkårlige punkter ellers. Laborieri modellen viste en ustabil produksjon for alle injeksjonsrater lavere enn denne.

Produksjonstesten viste at brønnen hadde en økende produksjon når gasstilførselen økte. Når friksjonskreftene i brønnen begynte å dominere, hadde brønnen en lavere produksjonsøkning når gasstilførselen økte. Brønnen produserte stabilt når friksjonskreftene dominerte. Denne trenden samsvarer med hva Hu (2005) karakteriserte som en typisk utvikling i sin doktoravhandling, og som ble vist i Figur 2-4. Laborieri modellen har en lignende trend som en virkelig produksjonsbrønn selv om brønnen er sterkt forminsket.

4.3.2. Observasjon av casing heading ustabilitet

Figur 4-11 viser et utsnitt av en testperiode som ble gjennomført med laborieri modellen. I utsnittet er ringromstrykket svart linje, vanninnstrømningen er gitt med blå linje og gassinjeksjonsraten er indikert i rødt. Ringromstrykket og gassraten måles ved injeksjonspunktet, og vannraten måles ved innstrømningspunktet fra reservoaret.

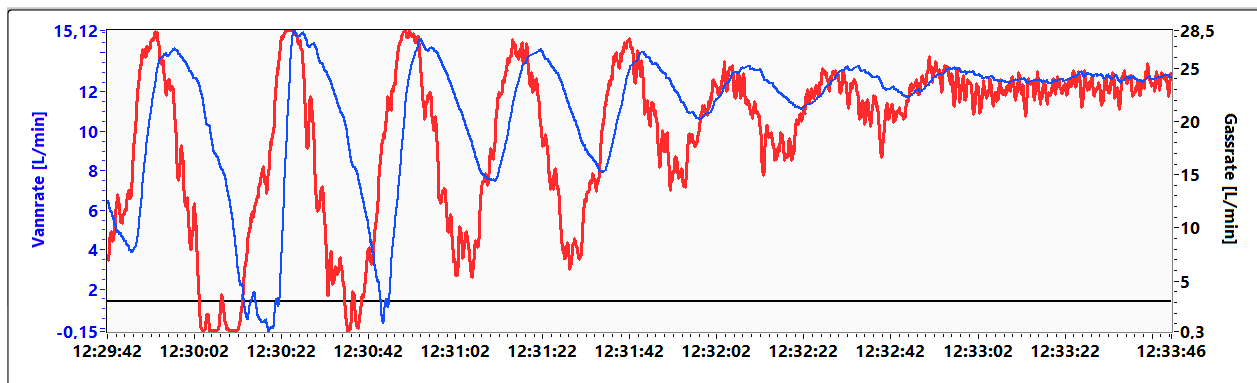


Figur 4-11: Et utsnitt av en test med modelloppsettet

Fra beskrivelsen av casing heading er det forventet at når ringrommet får et tilstrekkelig høyt trykk, vil injeksjonsraten av gass begynne å stige. Når injeksjonsraten øker vil den volumetriske tettheten i produksjonsrøret minke og innstrømningen fra reservoaret øker. Når Gasstilførselen blir mindre enn injeksjonsraten vil gassvolumet i ringrommet reduseres. Dette fører til en reduksjon i ringromstrykket. I Figuren vises dette tydelig ved at gassinjeksjonen økes og samtidig reduseres ringromstrykket. Vannraten stiger så lenge injeksjonsraten stiger. Ringromstrykket fortsetter å synke til et punkt hvor injeksjonsraten når sitt maksimum. Ved dette punktet begynner innstrømning fra reservoaret å synke i takt med injeksjonsraten. Når injeksjonsraten blir mindre enn gasstilførselen, begynner ringromstrykket å øke. Gassinjeksjonen fortsetter å minke helt frem til at ringromstrykket er høyt nok, og innstrømningen er lav nok til at injeksjonsraten igjen kan øke. En ny ustabil syklus starter. Syklusen som er observert med laboriemodellen samsvarer med casing heading ustabilitet. Perioden til svingningene i trykk og strømningsratene er lavere enn hva som er observert i virkelige brønner. Dette kommer av nedskaleringen. Lengden og volumet til ringrommet og produksjonsrøret på laboriemodellen er mindre enn hva som er vanlig for en virkelig produksjonsbrønn. Derfor vil svingeperioden og amplituden til svingningene være mindre for laboriemodellen. Siden årsaken til ustabiliteten i laboriemodellen har de samme drivkreftene som observeres i feltskala, er det rimelig å anta at laboriemodellen klarer å simulere ustabilitet som samsvarer med hva som observeres i felt. På bakgrunn av at modellen klarer å simulere ustabilitet under produksjon, er det utført to tiltak for å bedre stabiliteten. Tiltakene gjøres for å teste om laboriemodellen har en forventet respons.

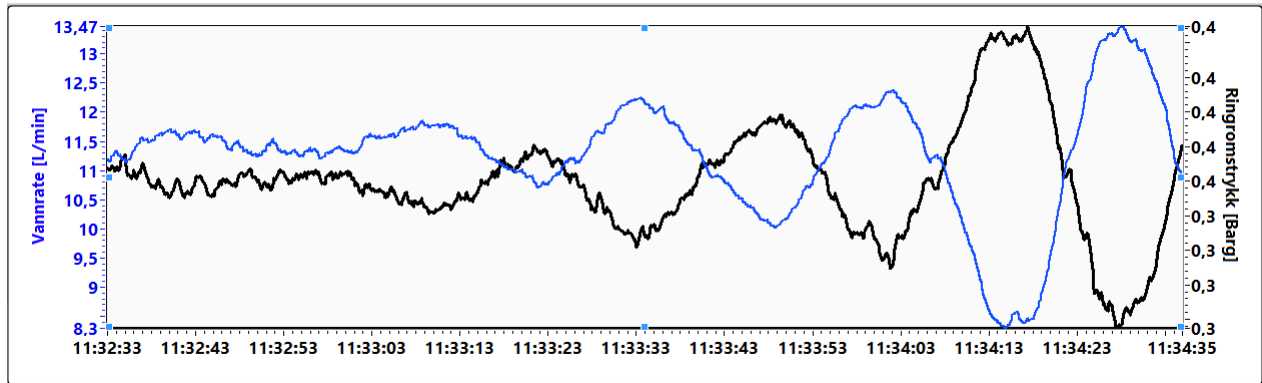
4.3.3. Modellens respons på økt gasstilførsel og endret ventilåpning

Stabiliseringstiltakene som ble brukt for å teste modellens respons var økning av gasstilførsel, og økning av ventilåpningen i injeksjonsventilen. I Figur 4-12 er produksjonskurven hvor gasstilførselen ble økt gradvis. Vannraten er vist i blått, og gassinjeksjonsraten er vist i rødt. Når gasstilførselen øker, ser man en reduksjon i svingningene til både vannraten og gassinjeksjonsraten. Reduksjonen når et punkt hvor gasstilførselen er lik gassinjeksjonsraten, og systemet begynte å produsere stabilt. Av Figur 2-4 er det forventet at produksjonen vil nå et stabilt område når gassinjeksjonsraten økes, noe systemet gjør. Fra produksjonstesten ble det gitt at gassinjeksjonsraten må være minimum 23 L/min for at produksjonen skal være stabil, noe som også fremkommer av Figur 4-12.



Figur 4-12: Produksjonskurve, gradvis økning av gasstilførsel

I Figur 4-13 vises produksjonskurven hvor injeksjonsventilen har en gradvis åpning. Ringromstrykket er vist i svart, og vannraten er vist i blått. I starten er ventilen lukket til et punkt hvor trykktapet over ventilen hindrer trykkommunikasjon mellom ringrommet og produksjonsrøret. I dette område er produksjonen stabil. Injeksjonsventilen ble gradvis åpnet slik at trykktapet over ventilen minket. Når trykktapet reduseres blir ringrommet mer påvirket av trykkvariasjoner i produksjonsrøret. Systemet viste en gradvis økning i ustabilitet. Utviklingen er i samsvar med hva som forventes av casing heading ustabilitet, og hva som predikeres av stabilitetskriteriet presentert av Asheim (1988), som er gitt i Ligning (2.15).



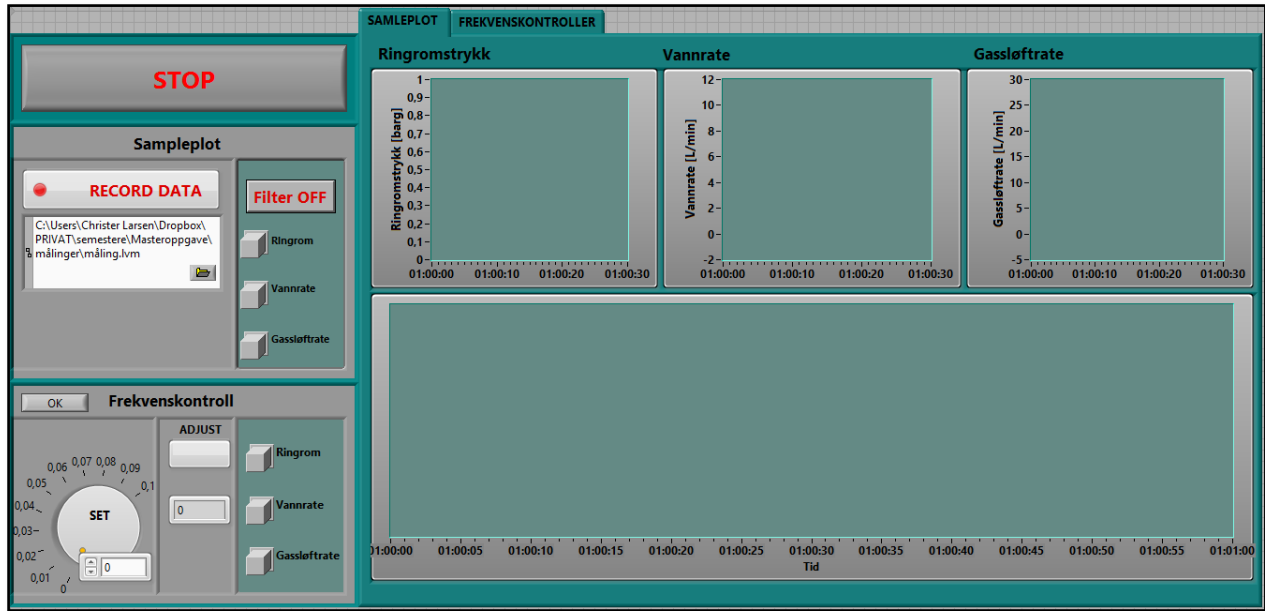
Figur 4-13: Produksjonskurve, gradvis åpning av injeksjonsventilen

5. Forsøk

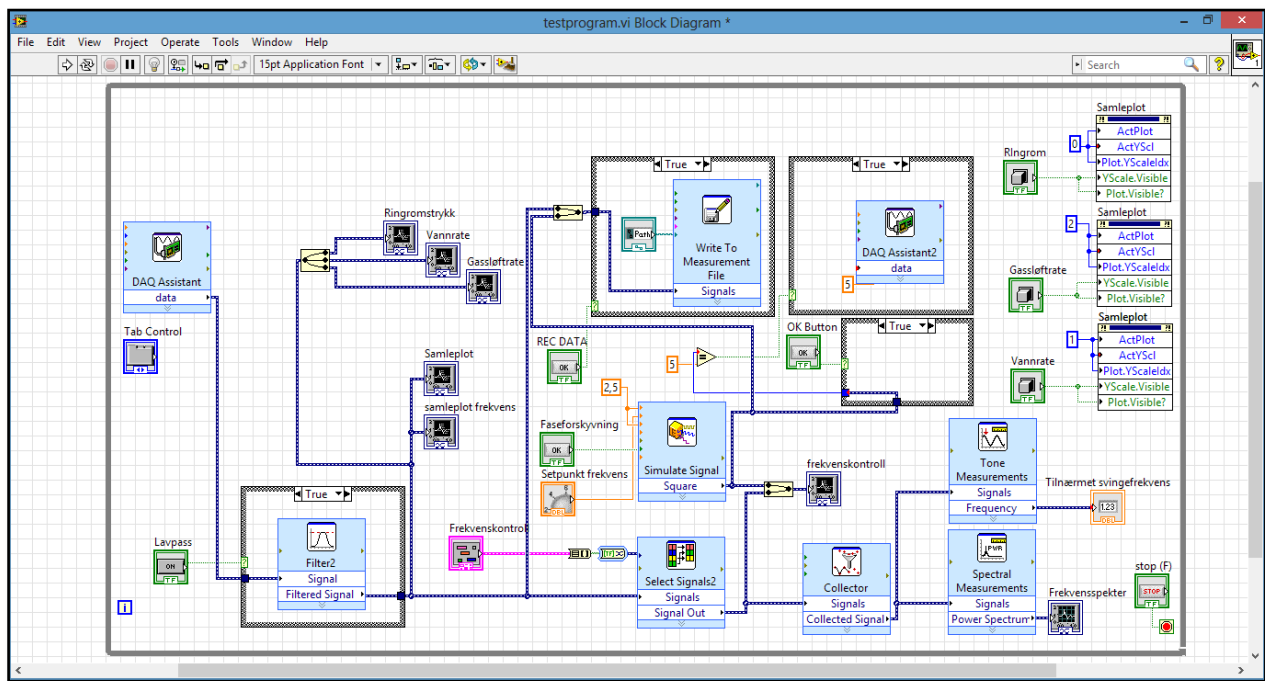
5.1. Generell fremgangsmåte

Før opptaket starter, settes trykket ut av gasskompressoren til en valgt verdi ved hjelp av trykkregulatoren. Gassinnstrømningen til ringrommet reguleres til ønsket rate når trykket er bekreftet. For å bekrefte en konstant gasstilførsel til ringrommet, overvåkes strømmingen visuelt med et rotameter gjennom hele forsøket. Størrelsen på det kompressible volumet blir satt til enten 0 liter, 20 liter eller 60 liter. Valget blir spesifisert i hvert forsøk. Reservoaret og produksjonsrøret fylles opp med vann til et satt nivå.

Dermed starter programmet å ta målinger fra de elektroniske komponentene, og injeksjonen av gass inn til produksjonsrøret igangsettes. Når produksjonssystemet viser en jevn ustabil syklus starter et opptak av målingene. Opptaket lagrer all informasjon om trykk og strømningsrater fra de nevnte elektroniske komponentene, slik at en analysing av informasjonen kan gjennomføres i ettertid av forsøket. Etter at en periode på minst 80 sekunder har gått, starter stabiliseringstiltaket. Den første perioden på 80 sekunder vil danne et sammenligningsgrunnlag med perioden etter at tiltaket er igangsatt. Når systemets respons på tiltaket stabiliseres, fortsetter opptaket av måledataene i minst 80 sekunder. Deretter tilbakestilles systemet og opptaket avsluttes. Perioden er valgt til 80 sekunder på bakgrunn av svingeperioden. Under testkjøring viste laboratoriemodellen en svingeperiode på maks 42 sekunder. Ved å måle i 80 sekunder vil minimum en hel svingeperiode bli registrert. Programmet som benyttes under eksperimentene er laget i *LabVIEW*. Programmet består av et frontpanel, vist i Figur 5-1, og et blokkdiagram som gir frontpanelets funksjoner. Blokkdiagrammet er vist i Figur 5-2. En detaljert beskrivelse av programmet er gitt i Appendiks B.



Figur 5-1: Frontpanelet til måleprogrammet

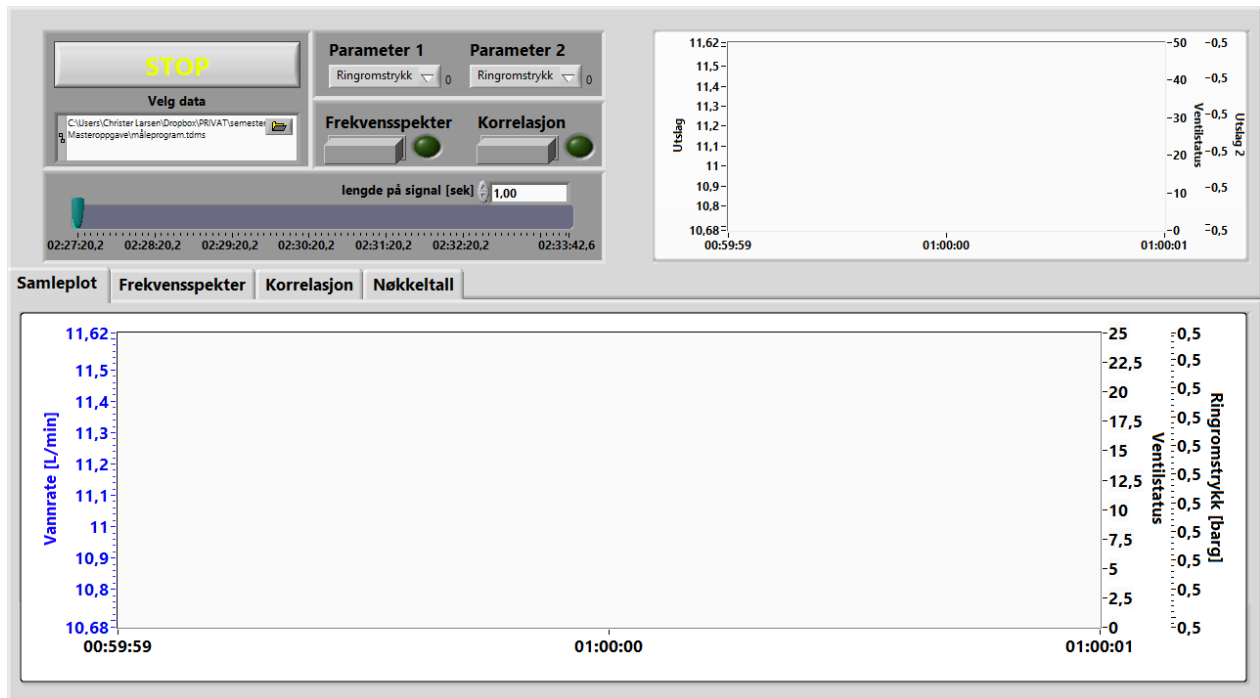


Figur 5-2: Blokkdiagrammet til måleprogrammet

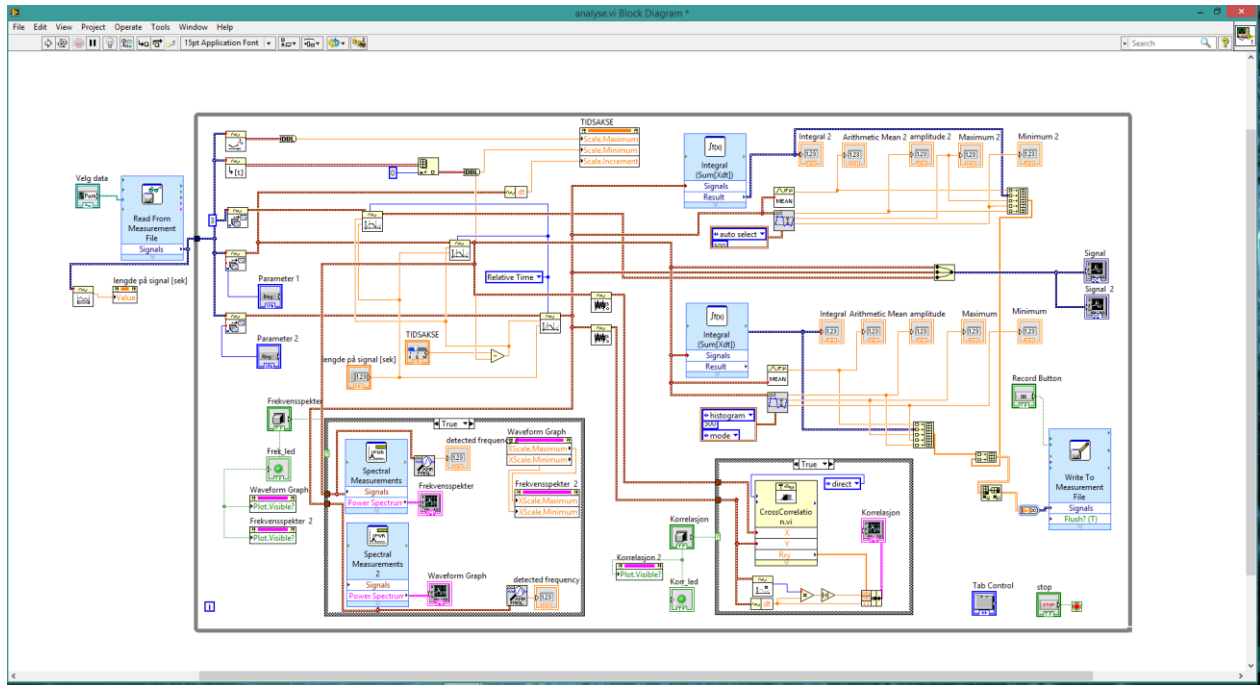
Analysen av dataene som ble logget blir gjort i et annet program. Analyseprogrammet har to hovedfunksjoner som benyttes i analysen; frekvensanalyse og beregning av nøkkeltall.

Frekvensanalysen består av en *Fourier-transformasjon*. Det er gitt en beskrivelse av Fourier-

transformasjon i Appendiks A. Nøkkeltallene beregnes på en valgt periode ved et satt tidsintervall, og vil bli benyttet når resultatene skal sammenlignes. Frontpanelet til programmet er vist i Figur 5-3, og det tilhørende blokkdiagrammet er vist i Figur 5-4. En detaljert beskrivelse av analyseprogrammet er gitt i Appendiks B.



Figur 5-3: Frontpanelet til analyseprogrammet



Figur 5-4: Blokkdiagrammet for analyseprogrammet

Stabiliseringstiltakene som blir undersøkt i denne oppgaven er kritisk strømming over injeksjonsventilen, økning av gassinjeksjonsrate, redusering av kompressibelt volum og frekvensstyrt struping av injeksjonsraten og brønnhode. De to førstnevnte er tiltak som benyttes i felt. Frekvensstyrt ventilavstengning er et tiltak som ikke er undersøkt tidligere, og en undersøkelse av tiltakets virkning på systemets stabilitet er hovedformålet med det eksperimentelle arbeidet.

For hvert forsøk gjennomføres det flere gjennomkjøringer, og hvert forsøk er gjort med et satt ringromsvolum, og en konstant gasstilførsel til ringrommet.

5.2. Første forsøk

Første forsøk gjennomføres med følgende gasstilførsel og ringromsvolum:

- **Gasstilførsel: 10 % (15,5 L/min)**
- **Ringromsvolum: 20 liter**

Sammenligningsgrunnlaget baseres på 8 stabiliseringstiltak. Stabiliseringstiltakene som gjøres i det første forsøket er listet opp under.

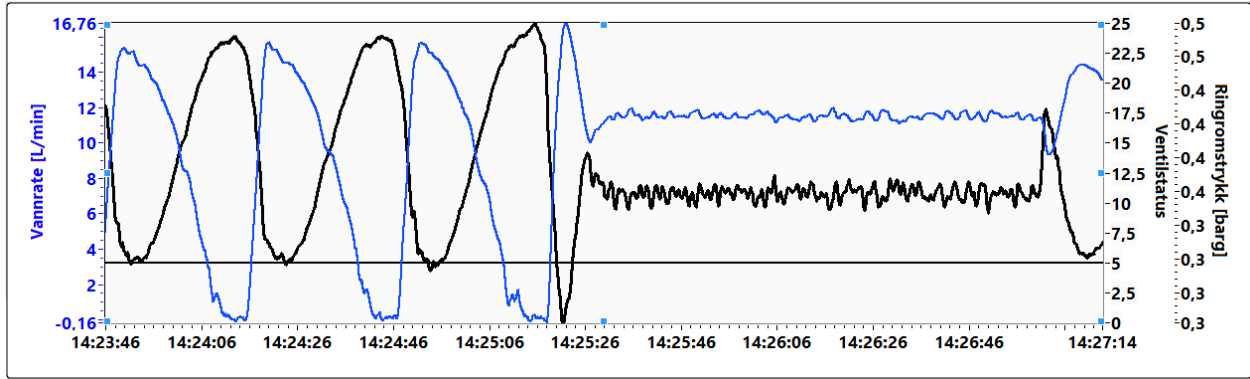
- **Avstengt ringrom**

- *10 % økning i gasstilførsel (totalt 30,9 L/min)*
- *Kritisk strømning*
- *0,1 Hz frekvens ventilavstengning ved injeksjonspunktet*
- *0,3 Hz frekvens ventilavstengning ved injeksjonspunktet*
- *0,5 Hz frekvens ventilavstengning ved injeksjonspunktet*
- *0,7 Hz frekvens ventilavstengning ved injeksjonspunktet*

I figurene som følger under er, om ikke annet er nevnt, parameter 1 vanninnstrømningen, og er vist i blå linje. Parameter 2 er ringromstrykket og er vist i sort linje. Den stiplede linjen er ventilstatus, hvor utslag på 5 medfører en åpen ventil og utslag på 0 en lukket ventil. Frekvensspektrene viser vanninnstrømningen til venstre, og ringromstrykket til høyre.

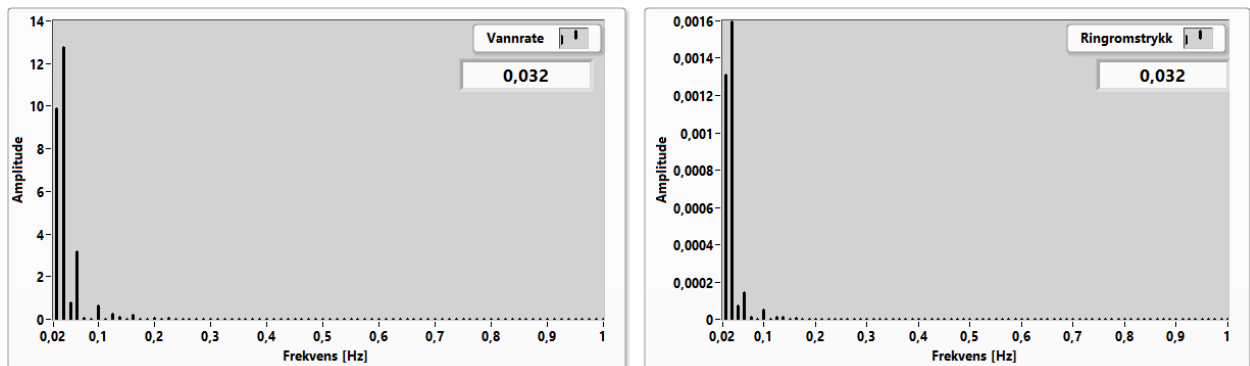
5.2.1. Resultat av avstengt ringrom

For å fastslå det kompressible volumets effekt på systemets ustabilitet, er det valgt å gjennomføre en gjennomkjøring der det kompressible volumet blir avstengt. Fra beskrivelsen av casing heading ustabilitet er det forventet at størrelsen på det kompressible volumet vil ha en stor innvirkning på stabiliteten til produksjonssystemet. I tidsrommet mellom 14:23:20 til 14:25:20 i Figur 5-5 vises det en tydelig syklisk variasjon i ringromstrykk og vanninnstrømning. Fra 14:25:20 blir volumet avstengt, slik at ringromsvolumet tilsvarer kun volumet til rørledningen. Produksjonen stabiliseres hurtig etter avstengning. Vanninnstrømningen ligger jevnt på omtrent 11 L/min, og ringromstrykket ligger på 0,38 barg etter avstengningen. Dette er en forventet utvikling. Stabiliseringen kommer av at ringrommet ikke klarer å gi en positiv tilbakekobling på trykkendringene i produksjonsrøret. Det ene leddet i syklusen for casing heading brytes, og en tilnærmet konstant gassrate injiseres inn i produksjonsrøret.

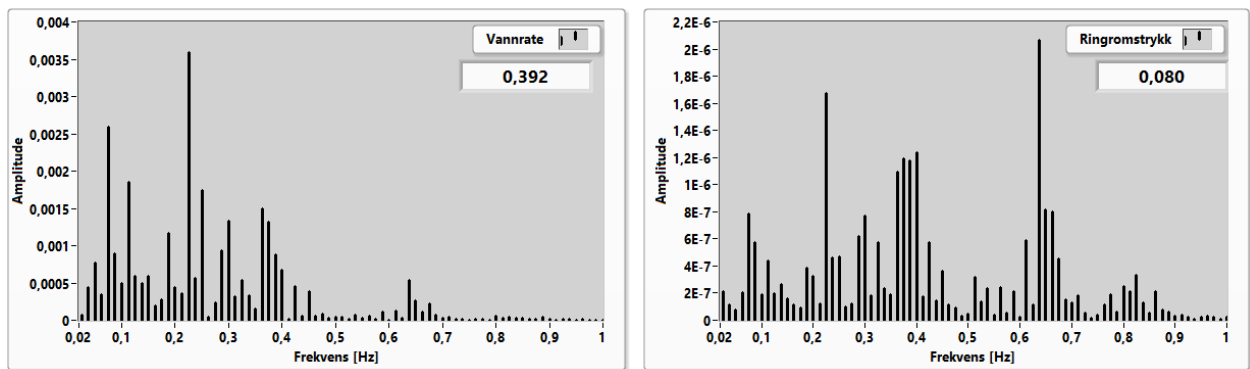


Figur 5-5: Avstengning av kompressibelt volum

Figur 5-6 og Figur 5-7 viser frekvensspekteret før og etter tiltaket. Fra Figur 5-6 vises en tydelig frekvens på 0,03 Hz. Svingningene har en periode på 33 sekunder. Etter at tiltaket iverksettes er det ingen indikasjon på en dominerende frekvens i produksjonen. Det kan derfor antas at systemet ikke har en syklisk variasjon i trykk og strømningsrater i denne perioden.



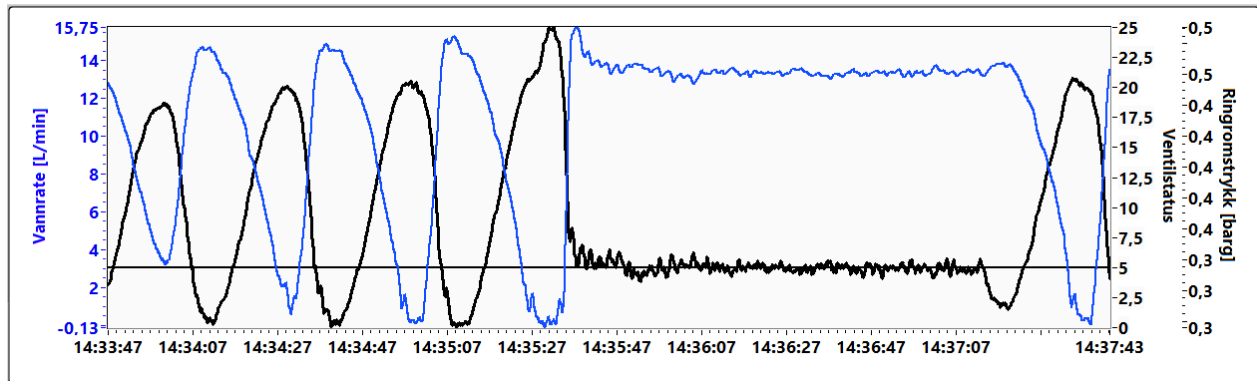
Figur 5-6: Frekvensspekter av referanseperiode, avstengt ringrom



Figur 5-7: frekvensspekter etter stabiliseringsforsøk, avstengt ringrom

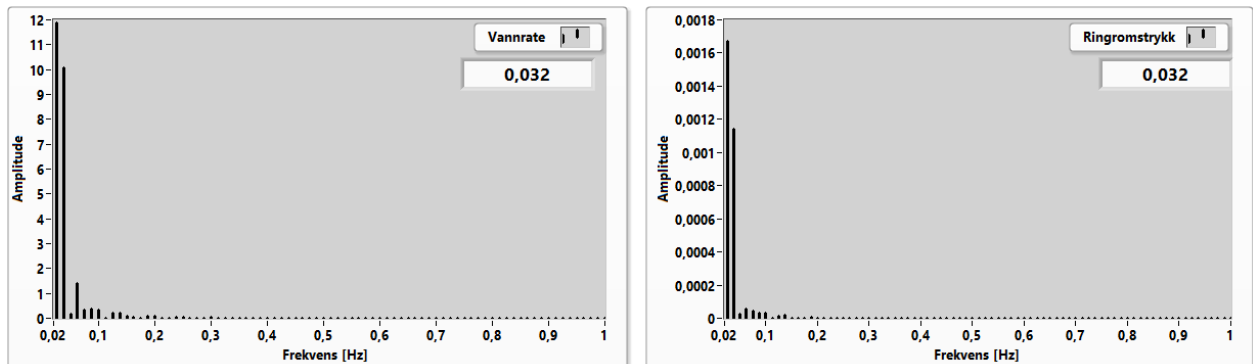
5.2.2. Resultat av økt gasstilførsel

Det andre stabiliseringstiltaket i forsøket er økt gasstilførsel. Av stabilitetskriteriene av Asheim (1988) vises det at en økt gassinjeksjon vil motvirke ustabilitet. Gasstilførselen økes med 10 % fra referanseverdien. Figur 5-8 viser gjennomkjøringen.



Figur 5-8: Økt gasstilførsel

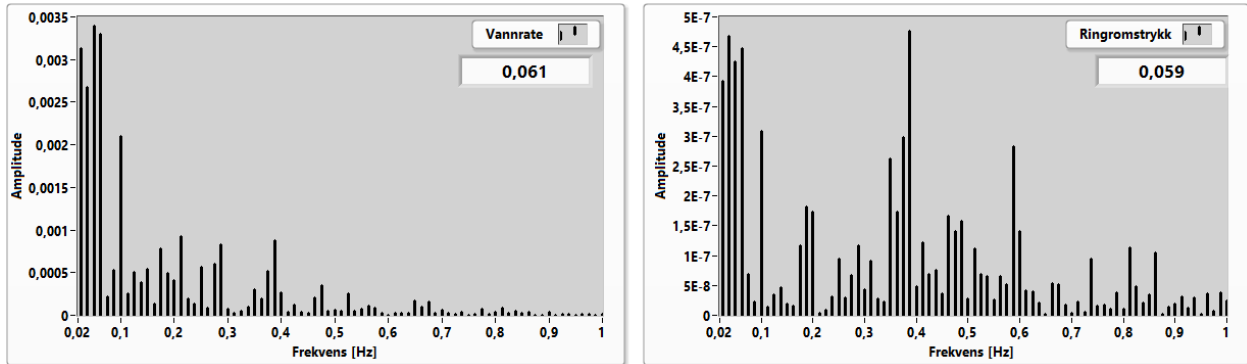
Som tidligere viser tiden før tiltaket en tydelig ustabil produksjon, og frekvensspekteret, vist i Figur 5-9, er det igjen et tydelig utslag på 0,03 Hz. Det viste seg at frekvensspekteret for alle gjennomkjøringene i forsøket hadde utslag på 0,03 Hz i referanseperioden. Frekvensspekteret for referanseperioden er derfor utelukket i de neste gjennomkjøringene i forsøket.



Figur 5-9: Frekvensspekter for referanseperiode, økt gasstilførsel

Produksjonen stabiliseres etter at stabiliseringstiltaket settes i gang. Vanninnstrømmingen har økt, og ringromstrykket har blitt noe redusert i forhold til første gjennomkjøring. Utviklingen er forventet. En økt gassinjeksjon vil redusere det hydrostatiske trykket som følge av lavere volumetrisk tetthet, dermed øker innstrømmingen fra reservoaret. Fra tidspunkt 14:37:15 settes gasstilførselen tilbake til referanseverdien, og brønnen gjenopptar en ustabil produksjon.

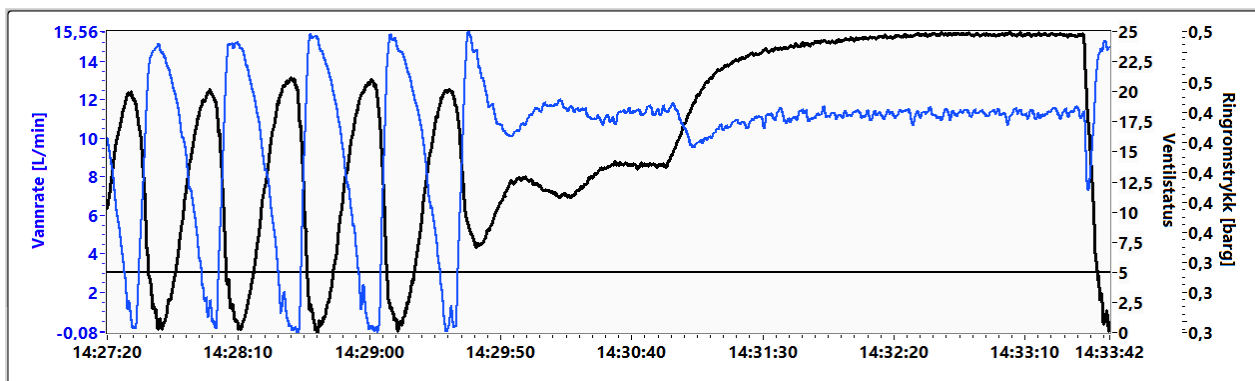
I Figur 5-10 vises frekvensspekteret fra den stabile perioden. Frekvensspekteret har en antydning til å vise et større energiområde rundt 0,06 Hz, men utslaget i dette område er fortsatt så lite at det ikke skaper en ustabilitet i systemet.



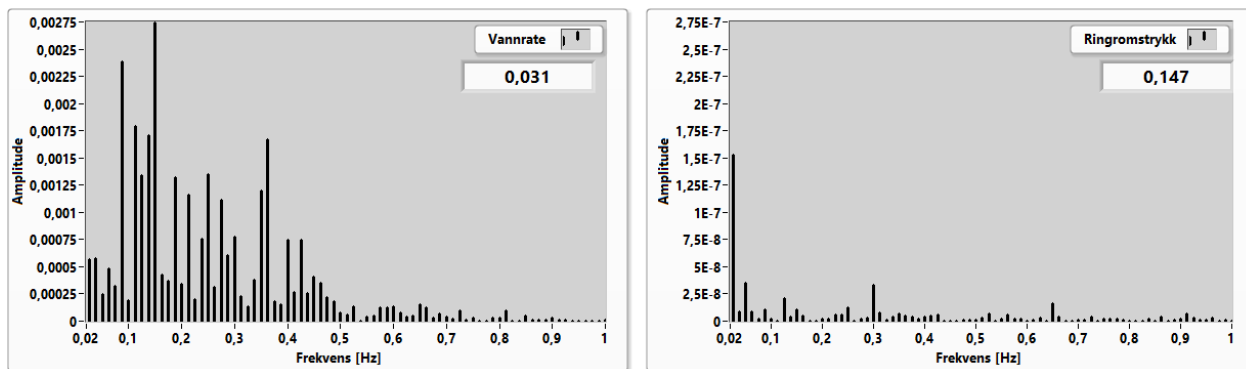
Figur 5-10: Frekvensspekter etter økt gasstilførsel

5.2.3. Resultat av kritisk strømning over injeksjonsventilen

Neste stabiliseringstiltak er kritisk strømning over injeksjonsventilen. Ved kritisk strømning vil ikke eventuelle trykkvariasjoner i produksjonsrøret påvirke injeksjonsraten fra ringrommet. Fra definisjonen vil ikke casing heading være mulig under slike forhold. Kritisk strømning oppnås ved å redusere ventildiameteren til injeksjonsventilen. Reduksjonen fører til et høyere trykktap over ventilen, og fører til økt strømningshastighet. Fra Figur 5-11 vises referanseperioden, og perioden i fra 14:29:40 til 14:33:30 er område hvor ventildiameteren innsnevres. Vannraten stabiliseres på 11 L/min, og ringromstrykket på 0,53 barg. Produksjonen stabiliseres som følge av stabiliseringstiltaket. Stabiliseringen bekreftes av Figur 5-12, som viser frekvensspekteret etter at tiltaket ble startet. Figuren viser ingen dominerende frekvens.



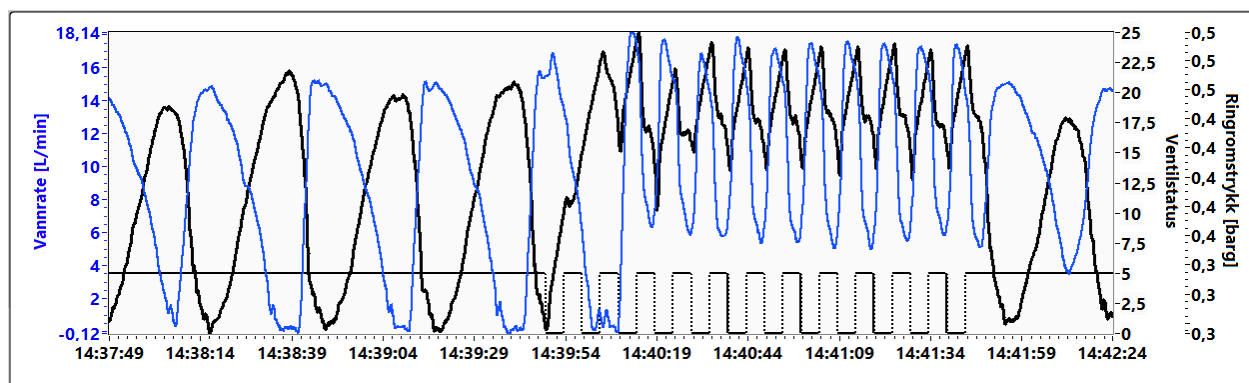
Figur 5-11: Kritisk strømning over injeksjonsventilen



Figur 5-12: Frekvensspekter etter start av stabiliseringstiltaket kritisk strømning

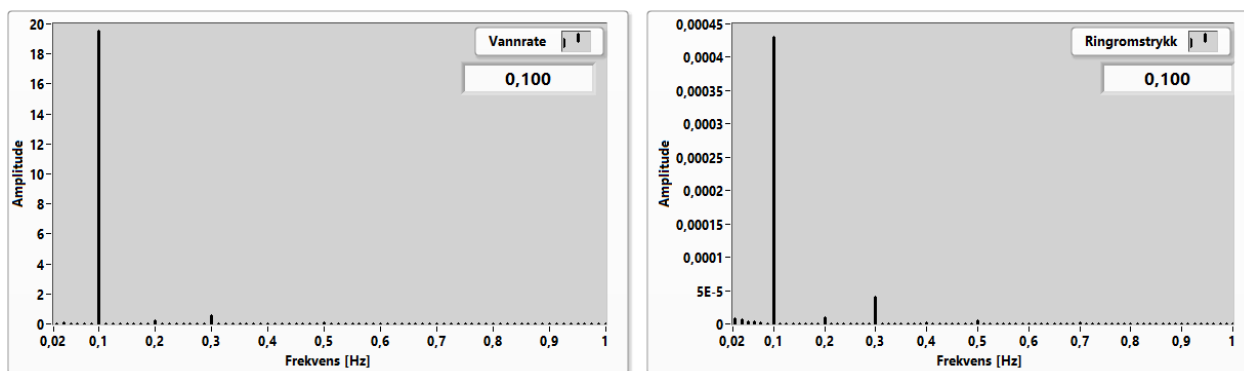
5.2.4. Resultat av 0,1 Hz ventilavstengning

Første gjennomføring med syklisk ventilavstengning var med en avstengningsfrekvens på 0,1 Hz. Figur 5-13 viser gjennomkjøringen. Ventilstatusen viser syklisk avstengning av injeksjonsventilen med en frekvens på 0,1 Hz, noe som bekrefter at ventilen fungerer. produksjonen har fremdeles betydelige utslag etter at ventilavstengningen startet, men utslagene er redusert i forhold til referanseperioden. Middelerdien av vanninnstrømningen og ringromstrykket viser en økning, noe som antyder en høyere total vanninnstrømning fra reservoaret.



Figur 5-13: Plot for 0,1 Hz ventilavstengning, 1. forsøk

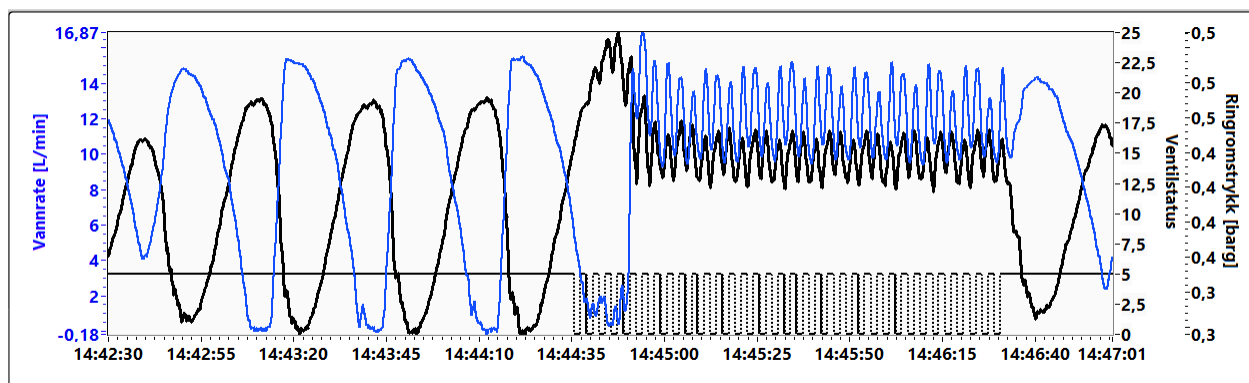
Figur 5-14 gir frekvensspekteret for perioden etter start av stabiliseringstiltaket. Etter at en syklisk ventilavstengning ble iverksatt, etablerte produksjonssystemet svingninger på 0,1 Hz.



Figur 5-14: Frekvensspekter etter start av stabiliseringstiltaket 0,1 Hz ventilavstengning

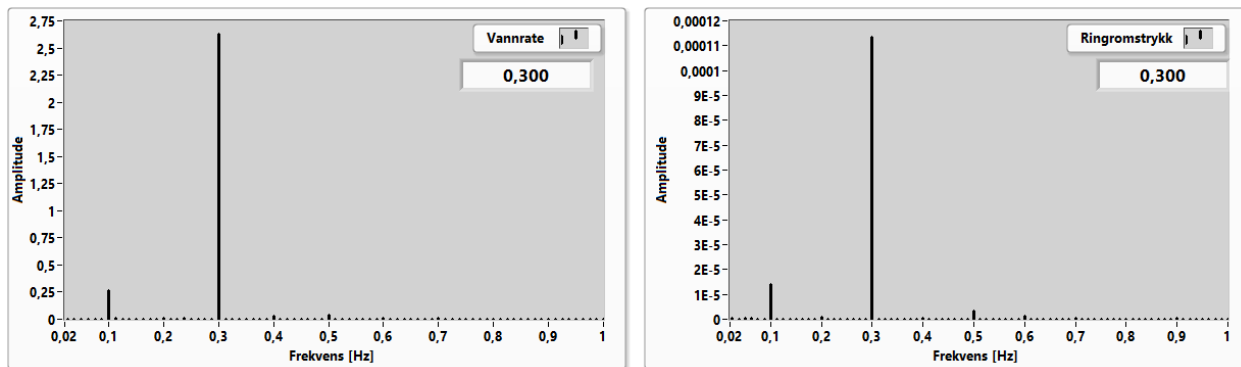
5.2.5. Resultat av 0,3 Hz ventilavstengning

Ved å øke frekvensen på ventilavstengningen til 0,3 Hz, reduseres utslagene til svingningene ytterligere. Gjennomsnittsverdien til vannraten er omtrentlig den samme som for ventilavstengningen med 0,1 Hz. Dette vises i Figur 5-15.



Figur 5-15: Plot for 0,3 Hz ventilavstengning, 1. forsøk

Frekvensspekteret etter start av stabiliseringstiltaket er vist i Figur 5-16. Frekvensspekteret viser en dominerende frekvens på 0,3 Hz, men det er en antydning til flere frekvenskomponenter i frekvensspekteret når ventilavstengningen er aktiv.

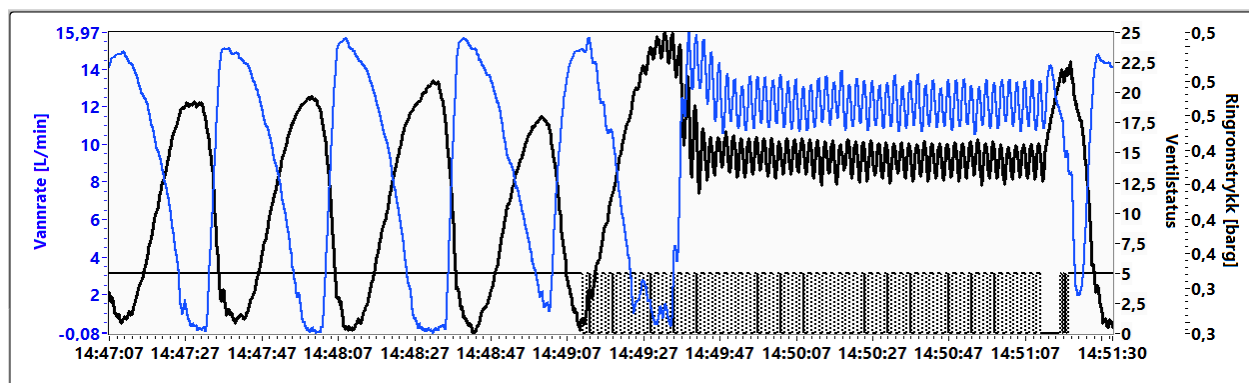


Figur 5-16: Frekvensspekter etter start av stabiliseringstiltaket 0,3 Hz ventilavstengning

5.2.6. Resultat av 0,5 Hz ventilavstengning

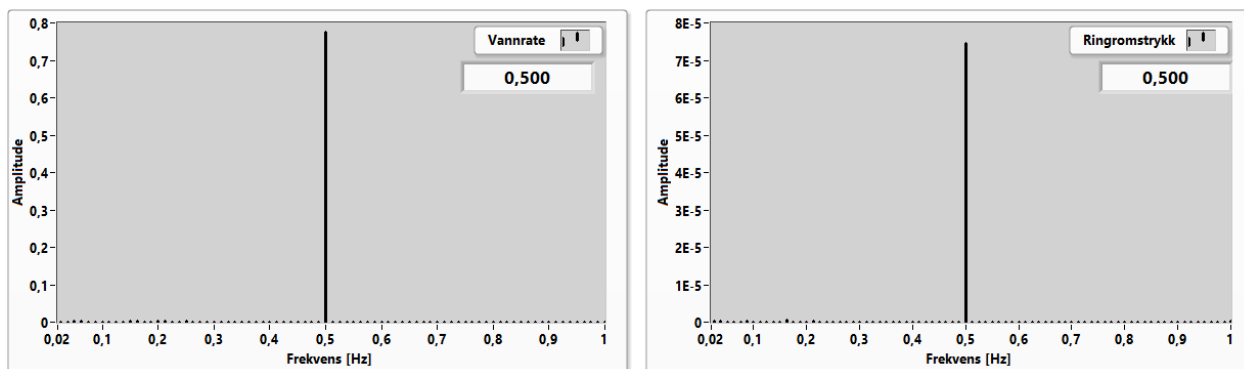
Neste stabiliseringstiltak er med en ventilavstengning på 0,5 Hz. Som tidligere har systemet en ustabilitet med svingninger på 0,03 Hz før kontrolleren igangsettes. Etter at ventilavstengningen ble igangsatt ble svingningene redusert til et punkt hvor utslagene var svært lave.

Gjennomsnittsverdiene til ringromstrykket og vanninnstrømningen økte i forhold til referanseperioden. Dette er vist i Figur 5-17.



Figur 5-17: Plot for 0,5 Hz ventilavstengning, 1. forsøk

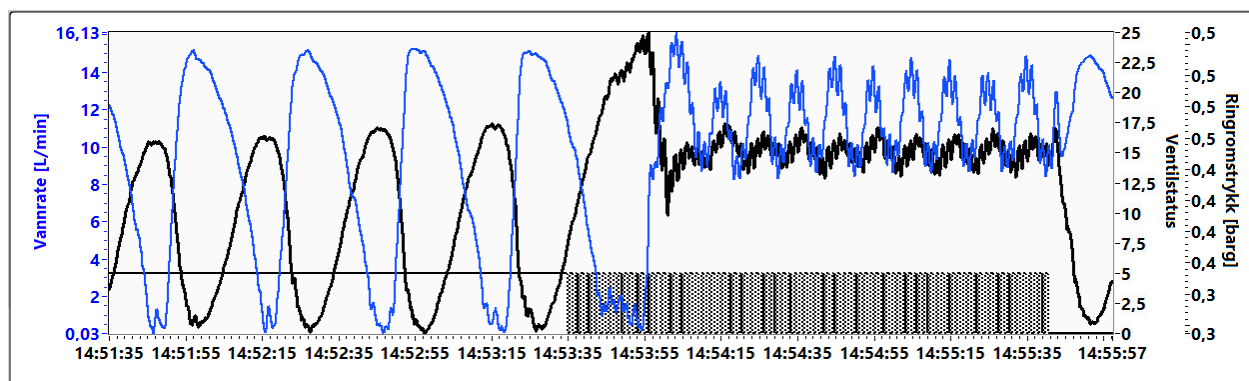
Gjennomsnittsverdiene er høyere for 0,5 Hz ventilavstengning enn for 0,3 Hz ventilavstengning. I frekvensspekteret, vist i Figur 5-18, er systemets svingfrekvens økt til 0,5 Hz. Det er heller ikke noen antydning til andre frekvenskomponenter, slik som det var for 0,3 Hz ventilavstengning. 0,5 Hz ventilavstengning har etablert en ny dominerende frekvens i systemet, uten andre frekvenskomponenter.



Figur 5-18: Frekvensspekter etter start av stabiliseringstiltaket 0,5 Hz ventilavstengning

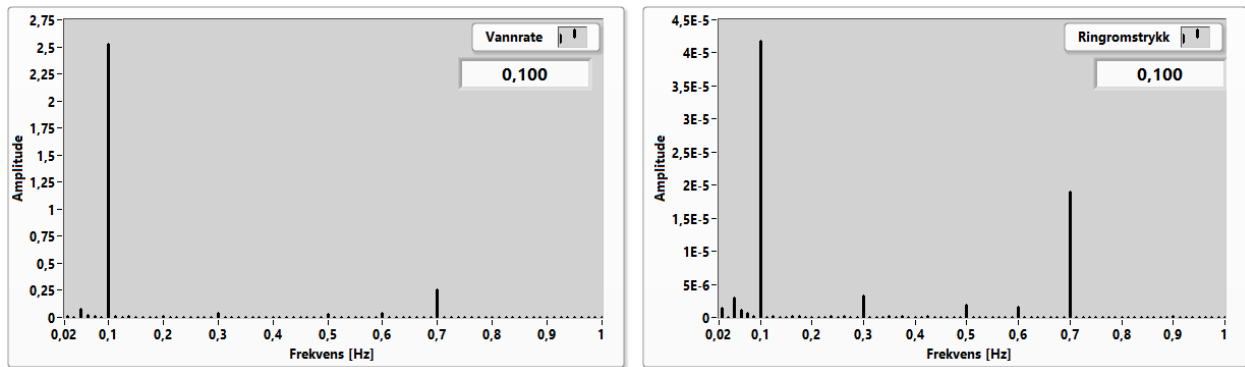
5.2.7. Resultat av 0,7 Hz ventilavstengning

Utviklingen til vanninnstrømmingen og ringromstrykket etter stabiliseringstiltaket med 0,7 Hz ventilavstengning skiller seg fra til de tidligere gjennomkjøringene. Utviklingen vises i Figur 5-19.



Figur 5-19: Plot for 0,7 Hz ventilavstengning, 1. forsøk

Siden frekvensen er høyere i denne gjennomkjøringen var det forventet en ytterligere reduksjon i utslagene. Dette var ikke tilfelle. På grunn av den hyppige åpningen av injeksjonsventilen, stabiliserte systemet seg med dominerende frekvens på 0,1 Hz, men med ekstra frekvenskomponenter. Frekvenskomponentene tilsvarte frekvensen på ventilavstengningen, og frekvensen til de opprinnelige svingningene i systemet. Frekvensspektret for perioden etter start av stabiliseringstiltaket er vist i Figur 5-20. Systemet opplevde flere betydelige frekvenskomponenter ved en lavere frekvens, noe som førte til en økning i svingningene i forhold 0,5 Hz ventilavstengning.

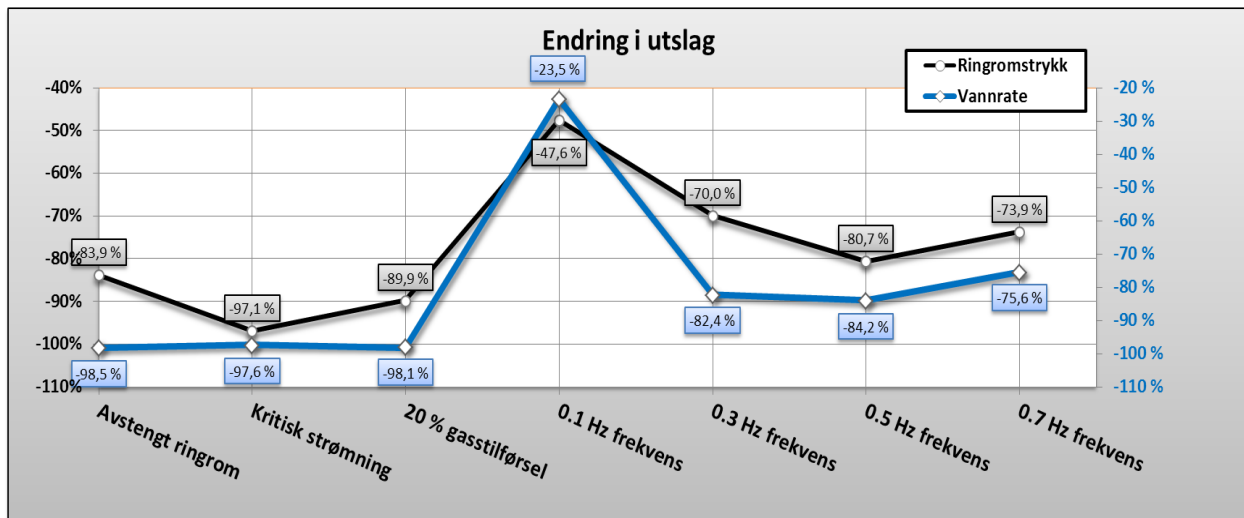


Figur 5-20: Frekvensspekter etter start av stabiliseringstiltaket 0,7 Hz ventilavstengning

5.2.8. Sammenligning av resultatene i første forsøk

I alle gjennomkjøringene i forsøket ble det utført en frekvensanalyse for referanseperioden og perioden etter at stabiliseringstiltaket ble iverksatt. I tillegg ble det gjort kvantitative målinger av trykk og strømningsrater. Det ble utført en analyse av målingene i ettertid for å kunne sammenligne resultatene fra hver gjennomkjøring. I Figur 5-21 og Figur 5-22 vises den prosentvise endringen av utslag og volum/gjennomsnittsverdi i forhold til referanseperioden for alle gjennomkjøringene. Med utslag menes det her verdien av differansen mellom 40 % av de øverste punktene som er målt gjennom perioden, og 40 % av de lavest målte verdiene i den samme perioden. Med volumendring menes det endringen i den totale mengden vann strømmet inn fra reservoaret gjennom perioden i forhold til referanseperioden. Gjennomsnittsverdien er den aritmetiske middelværdien av alle målte punkter.

Det første forsøket ga gode indikasjoner på at en syklisk ventilavstengning har en stabiliserende effekt som kan måles med eksisterende tiltak. Figur 5-21 viser en prosentvis endring i forhold til referanseperioden for de forskjellige stabiliseringstiltakene.

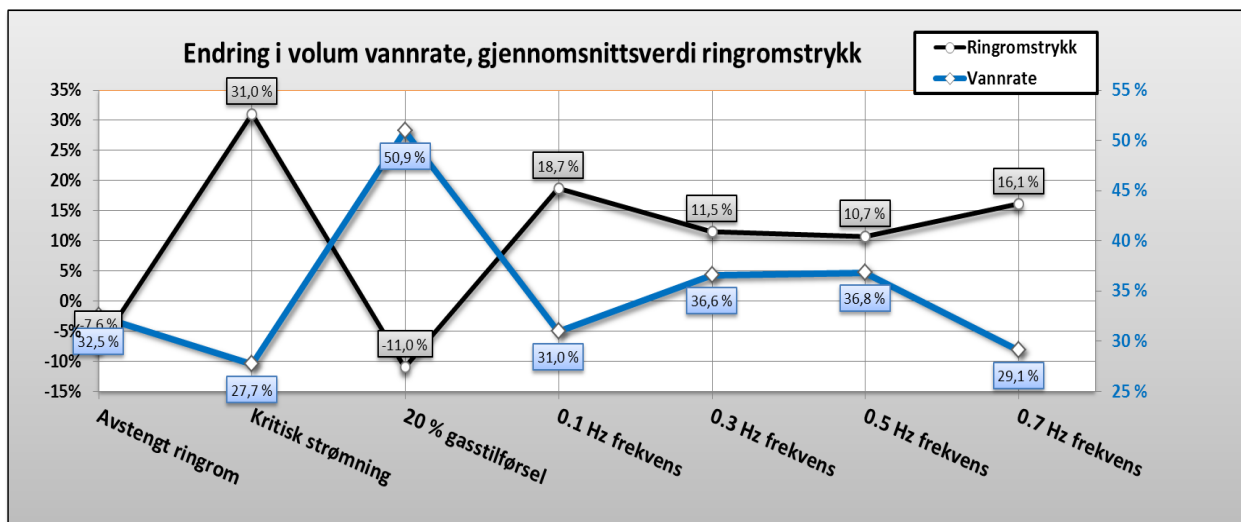


Figur 5-21: Endring i utslag i forhold til referanseperiode for gjennomkjøringene, 1. forsøk

Endringen i utslagene for vannraten er tilnærmet like for gjennomkjøringene; *avstengt ringrom*, *kritisk strømning* og *10 % økning av gass*, hvor verdiene ligger mellom 97 % og 99 %.

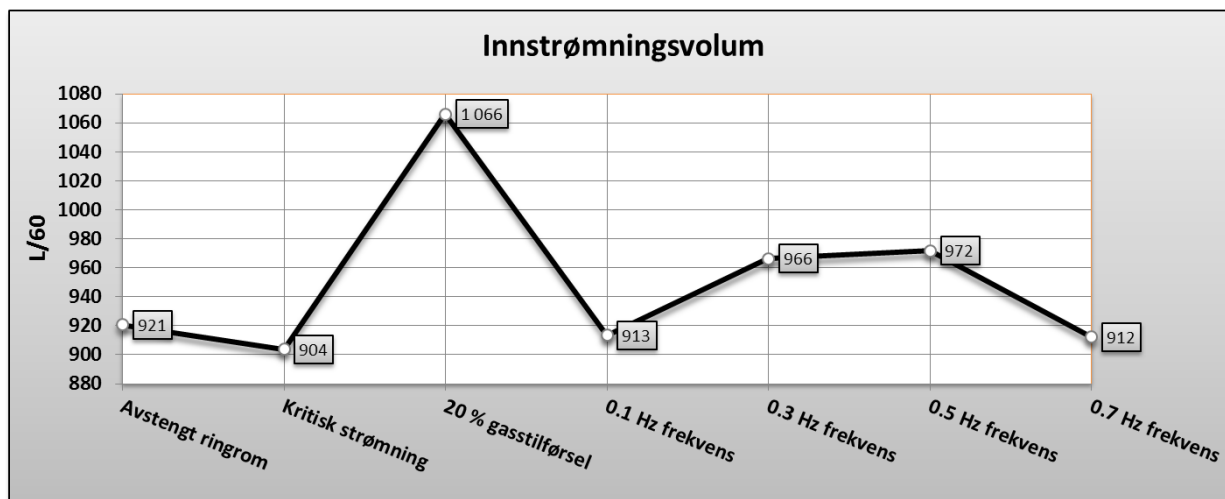
Reduksjonen i utslagene for ventilavstengning med frekvens lik 0,3- og 0,5 Hz lå mellom 82 % og 85 %. Med en ventilavstengning på 0,7 Hz ble den stabiliserende effekten redusert, og reduksjonen var kun på 75,6 % i forhold til referanseperioden. Ventilavstengningen med 0,1 Hz frekvens hadde minst effekt, med kun 23,5 % reduksjon. Den lave reduksjonen med 0,1 Hz ventilavstengning kan skyldes at frekvensen på ventilavstengningene var for lav, slik påvirkningen fra ringromsvolumet når ventilen var åpen ble for stor. Endringen i utslag på ringromstrykket varierte mellom stabiliseringstiltakene. Avstengt ringrom hadde en mindre effekt enn kritisk strømning og økning av gasstilførsel, til tross for at endringene i vannraten var tilnærmet like. Kritisk strømning hadde størst reduksjon i utslag for ringromstrykket. Dette skyldes at det ikke forekommer trykkforplantning mellom produksjonsrøret og ringrommet, samt at gasstilførselen hadde en konstant innstrømning. 0,5 Hz frekvens på ventilavstengningen hadde størst effekt av gjennomkjøringene med syklisk avstengning, hvor reduksjonen av utslaget på ringromstrykket lå på 80,7 %. 0,1 Hz frekvens på ventilavstengningen hadde minst effekt for både ringromstrykket og vannraten.

Figur 5-22 viser endringen i innstrømningsvolum og gjennomsnittlig ringromstrykk.



Figur 5-22: Endring i volum og gjennomsnittsverdi i forhold til referanseperiode, 1. forsøk

Endringen i innstrømningsvolum var størst for økt gasstilførsel. Dette skyldes at økt gasstilførsel fører til en større innstrømning fra reservoaret på grunn av en lavere volumetrisk tetthet i produksjonsrøret. Det var derfor forventet at dette stabiliseringstiltaket skulle ha størst effekt på den totale innstrømningen. 10 % økning av gass hadde av den grunn en god stabiliserende effekt, og i tillegg den høyeste innstrømningen totalt. Ringromstrykket ved økt gasstilførsel hadde i motsetning til de andre endringene sunket med 11 %. At ringromstrykket hadde blitt redusert i forhold til referanseperioden skyldtes den økte gassinjeksjonen. 0,5 Hz frekvens ventilavstengning hadde totalt sett den beste utviklingen av alle gjennomkjøringene med syklisk avstengning av injeksjonsventilen. Ventilavstengningen med 0,5 Hz hadde høyest økning i vanninnstrømning, størst reduksjon i trykkutslag, og størst reduksjon i utslagene på vanninnstrømningen sammenlignet med gjennomkjøringene med de andre ventilavstengningene. Det ble også observert en høy økning i ringromstrykket ved denne avstengningsfrekvensen. Trenden viser en jevn reduksjon i ringromstrykket frem til 0,5 Hz ventilavstengning, og øker fra 0,5 Hz til 0,7 Hz. Produksjonsmengden øker frem til 0,5 Hz, og synker fra 0,5 Hz til 0,7 Hz ventilavstengning. Produksjonsmengden for alle gjennomkjøringene etter at stabiliseringstiltaket ble iverksatt er gitt i Figur 5-23.



Figur 5-23: Innstrømningsvolum for alle gjennomkjøringene, 1. forsøk

5.3. Andre forsøk

I andre forsøk økes volumet på tanken til 60 liter. Ved å øke volumet på tanken vil ringrommet ha en større buffer når trykket i produksjonsrøret faller. Forsøket skal undersøke endringen av effekten til den sykliske avstengningen når volumet til ringrommet økes.

Andre forsøk gjennomføres med følgende gasstilførsel og ringromsvolum:

- **Gasstilførsel: 10 % (15,6 L/min)**
- **Ringromsvolum: 60 liter**

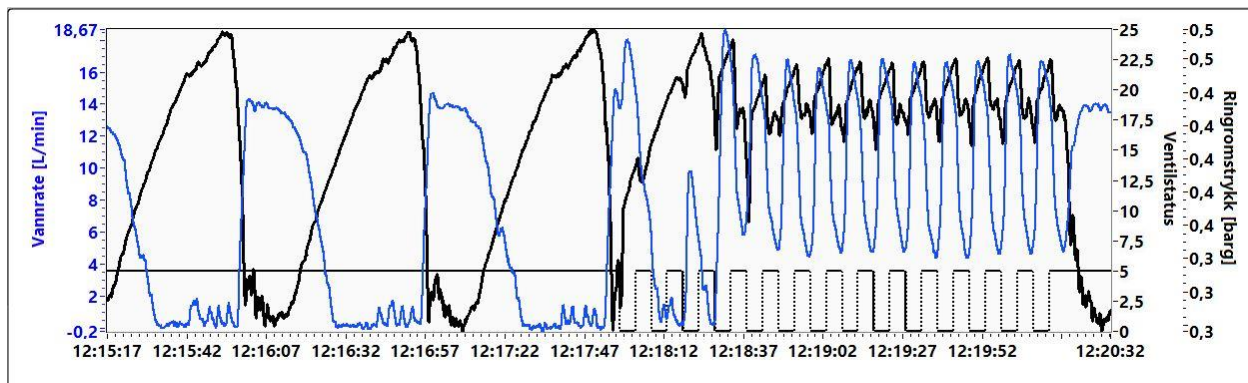
Sammenligningsgrunnlaget gjøres med 4 stabiliseringstiltak. Stabiliseringstiltakene som gjøres er listet opp under.

- **0,1 Hz frekvens ventilavstengning ved injeksjonspunktet**
- **0,3 Hz frekvens ventilavstengning ved injeksjonspunktet**
- **0,5 Hz frekvens ventilavstengning ved injeksjonspunktet**
- **0,7 Hz frekvens ventilavstengning ved injeksjonspunktet**

De fire stabiliseringstiltakene sammenlignes med gjennomkjøringene som ble utført i første forsøk.

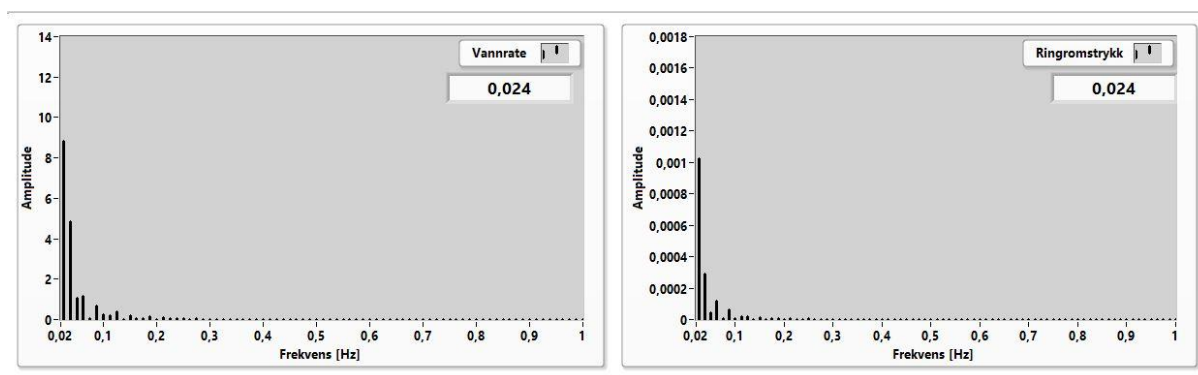
5.3.1. Resultat av 0,1 Hz ventilavstengning

Figur 5-24 viser trenden til den første gjennomkjøringen.



Figur 5-24: Plot for 0,1 Hz ventilavstengning, 2. forsøk

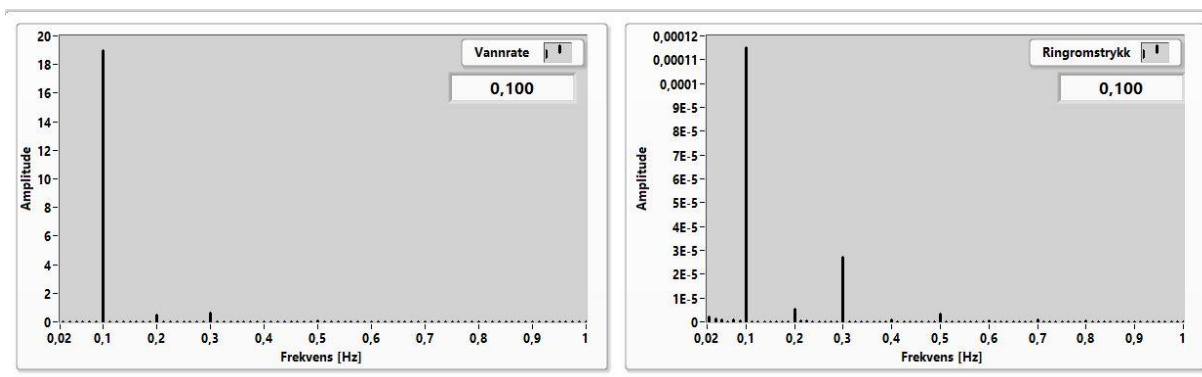
Referanseperioden, vist i tidsperioden 12:15:17 til 12:17:45, viser en tydelig ustabil produksjon. I forhold til referanseperiodene til gjennomkjøringene i første forsøk viser denne perioden et større utslagsområde, med en lengre svingetid. Dette bekreftes gjennom frekvensspekteret i Figur 5-25.



Figur 5-25: Frekvensspekter for referanseperiode med 0,1 Hz ventilavstengning, 2. forsøk

Frekvensspekteret viser utslag på en frekvens lik 0,024 Hz, noe som tilsvarer en periode på 42 sekunder. Dette er en lengre periode enn tidligere. I følge Larsen (2013) er dette en forventet utvikling i frekvensspekteret. Utviklingen skyldes økningen i ringromsvolum, som gir en lenger trykkoppbygningstid, og en større kapasitet. Frekvensspekteret for de andre gjennomkjøringene var tilsvarende frekvensspekteret i Figur 5-25, og er derfor ikke vist i de neste gjennomkjøringene.

Etter at ventilavstengningen ble iverksatt, startet brønnen å etablere en ny frekvens. Frekvensen stabiliserte seg med flere tydelige frekvenskomponenter. Dette er vist i Figur 5-26, og bekreftes også visuelt i trenden.

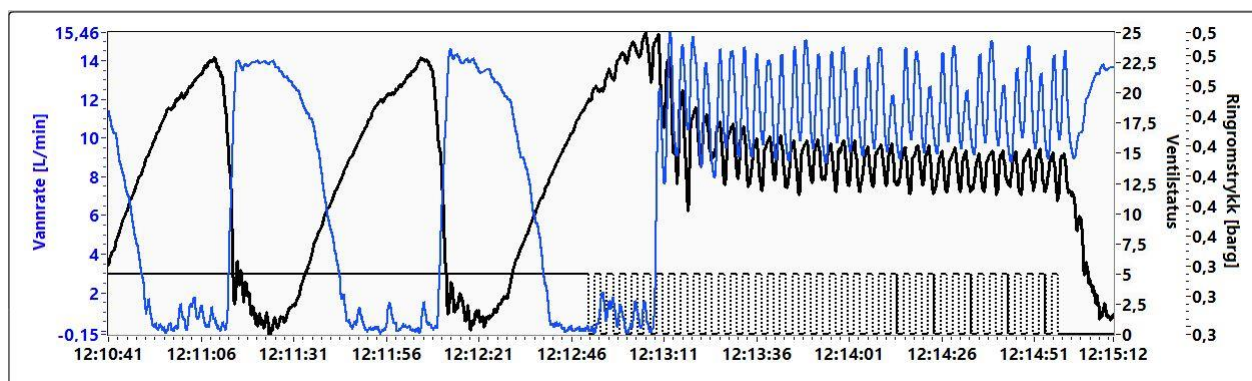


Figur 5-26: Frekvensspekter for periode med 0,1 Hz ventilavstengning, 2. forsøk

At brønnen stabiliseres med flere frekvenskomponenter kan bety at ventilavstengningen ikke klarer å utelukke den dynamiske effekten til ringrommet.

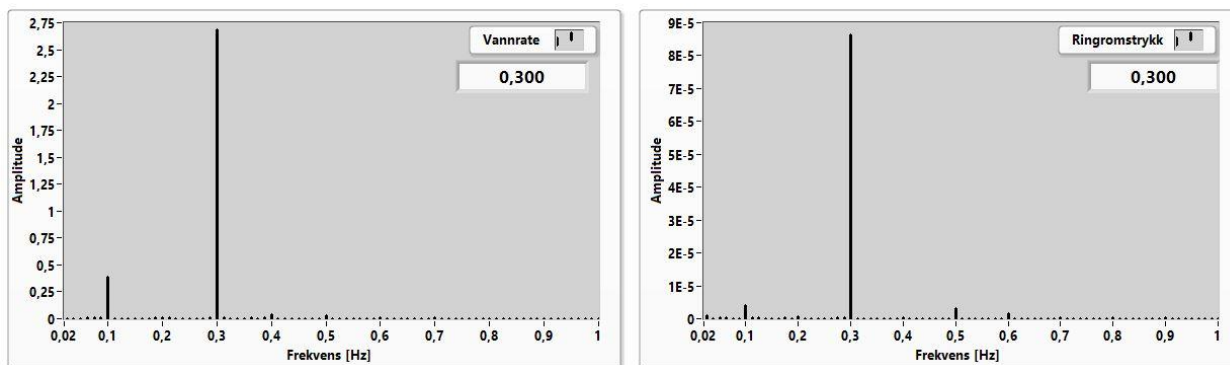
5.3.2. Resultat av 0,3 Hz ventilavstengning

Gjennomkjøringen er vist i Figur 5-27. Slik som i første gjennomkjøring, viser referanseperioden en tydelig ustabil produksjon.



Figur 5-27: Plot for 0,3 Hz ventilavstengning, 2. forsøk

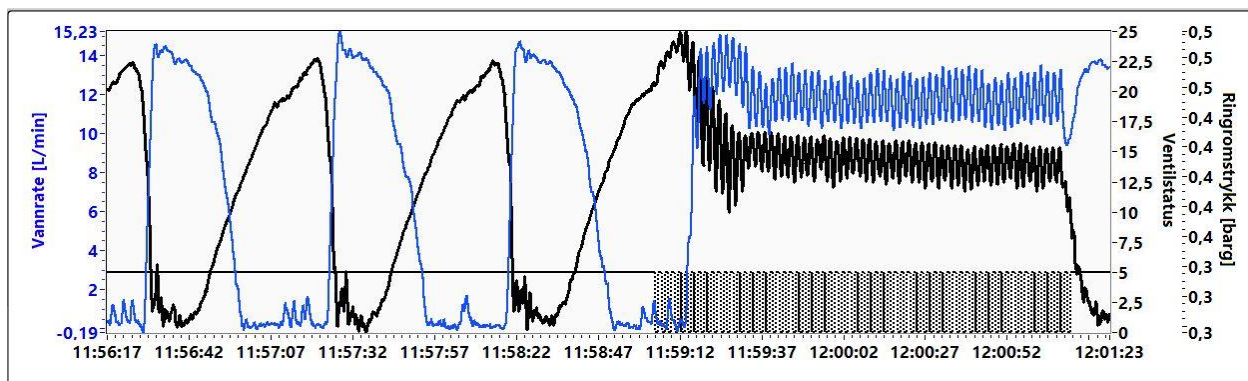
Etter at ventilavstengningen starter, er det en trykkoppbygningsperiode i ringrommet. Etter at trykkoppbygningen har nådd et visst punkt starter gassinjeksjonen, og en innstrømningen fra reservoaret starter. Etter en kort periode stabiliseres strømmingen med svingninger på 0,3 Hz. Dette bekreftes i frekvensspekteret gitt i Figur 5-28. Også her er det en antydning på andre frekvenskomponenter, men disse har ikke en like stor innvirkning som i forrige gjennomkjøring. Utslagene på svingningene når ventilavstengningen er aktiv er større i denne gjennomkjøringen.



Figur 5-28: Frekvensspekter for periode med 0,3 Hz ventilavstengning, 2. forsøk

5.3.3. Resultat av 0,5 Hz ventilavstengning

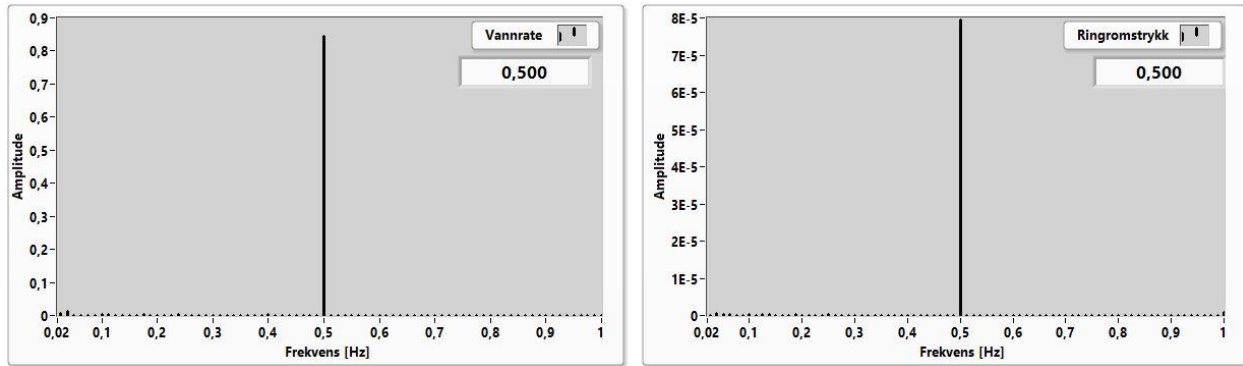
Ventilavstengningen settes til en frekvens på 0,5 Hz. Systemets respons på ventilavstengningen er vist i Figur 5-29.



Figur 5-29: Plot av 0,5 Hz ventilavstengning, 2. forsøk

Rett etter at avstengningen starter er det en periode hvor systemet innstilles en ny frekvens. En vesentlig reduksjon i utslagene vises i figuren. Utslagene har en amplitude som er større enn gjennomkjøringen i første forsøk, men fremdeles er det en betydelig reduksjon.

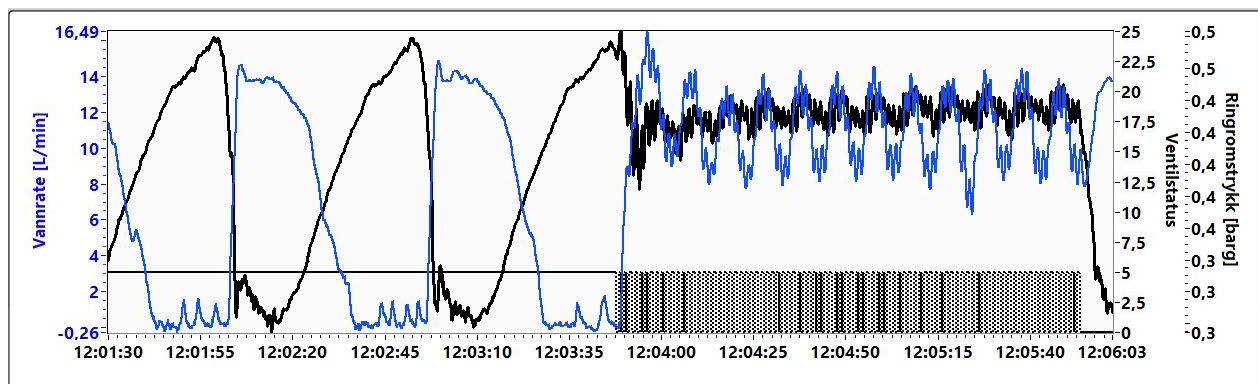
Ventilavstengningen endrer systemets frekvens til 0,5 Hz. Frekvensen tilsvarer avstengningsfrekvensen. Frekvensspekteret i Figur 5-30 viser et tydelig utslag på 0,5 Hz, noe som indikerer at systemet ikke blir påvirket av andre forstyrrelser. Som tidligere er det denne frekvensen som gir best stabiliserende effekt.



Figur 5-30: Frekvensspekter for periode med 0,5 Hz ventilavstengning, 2. forsøk

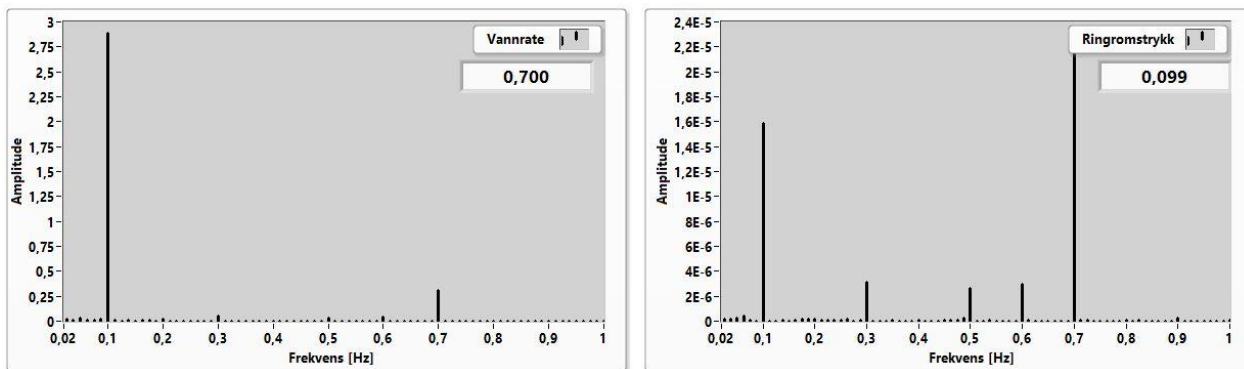
5.3.4. Resultat av 0,7 Hz ventilavstengning

Figur 5-31 viser gjennomkjøringen hvor ventilavstengningen blir satt til 0,7 Hz.



Figur 5-31: Plot for 0,7 Hz ventilavstengning, 2. forsøk

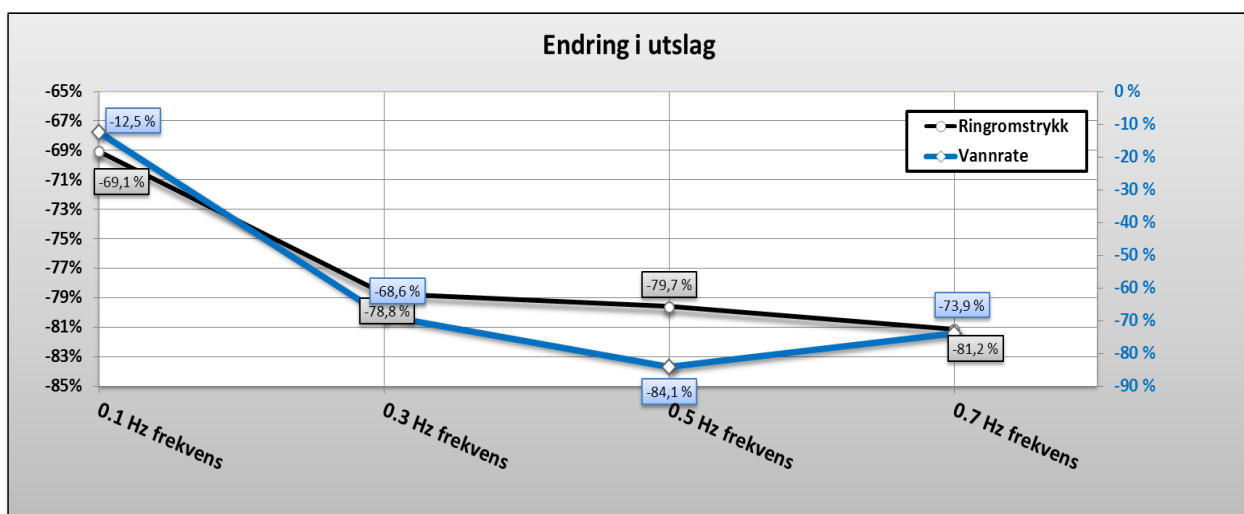
Etter oppstart av ventilavstengningen reduseres ustabiliteten, men systemet viser flere frekvenskomponenter i de nye svingningene. Frekvensspekteret, vist i Figur 5-32, har flere betydelige utslag. Dette fører til at analyseprogrammet ikke klarer å skille ut en spesifikk frekvens. Flere frekvenskomponenter ble også observert i første forsøk når ventilavstengningen hadde en frekvens på 0,7 Hz. At systemet svinger med flere betydelige frekvenskomponenter kan også tolkes fra trenden vist i Figur 5-31.



Figur 5-32: Frekvensspekter for periode med 0,7 Hz ventilavstengning, 2. forsøk

5.3.5. Sammenligning av resultatene i andre forsøk

Resultatet av gjennomkjøringene viser den samme trenden som i første forsøk. Figur 5-33 viser den prosentvise endringen i utslag i forhold til referanseperioden for hver gjennomkjøring.

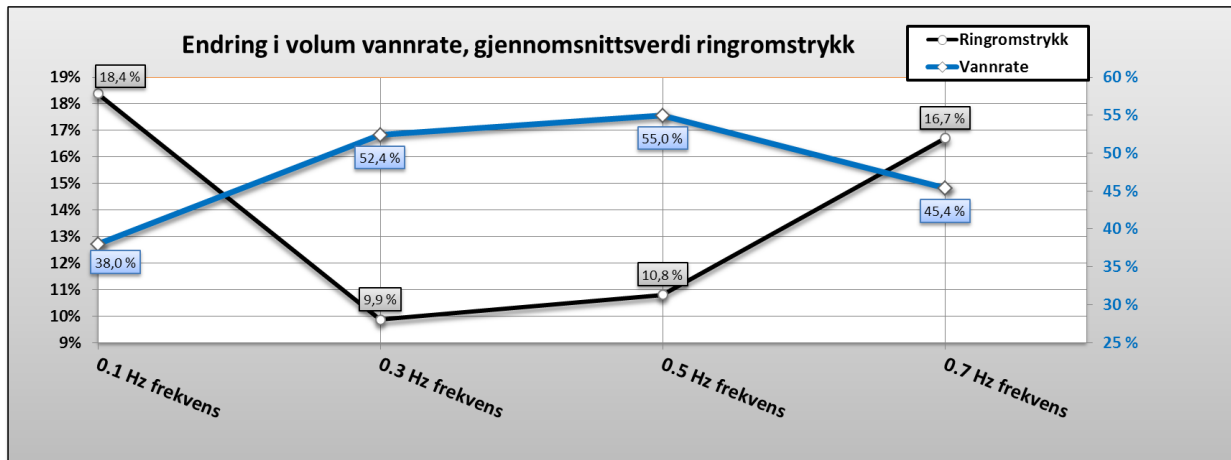


Figur 5-33: Prosentvis endring i utslag i forhold til referanseperiode, 2. forsøk

Som tidligere viser 0,1 Hz ventilavstengning den laveste prosentvise endringen. Ringromstrykket har en reduksjon på 69,1 %, noe som er høyere enn i første forsøk der den prosentvise reduksjonen var på 47,6 %. Når frekvensen øker til 0,3 Hz, reduseres utslaget i ringromstrykket til 68,6 %. Reduksjonen er nesten lik som i første forsøk, hvor reduksjonen var på 70,0 %. Ved en frekvens på 0,5 Hz er reduksjonen økt ytterligere til 79,7 %. Når frekvensen økes til 0,7 Hz er reduksjonen på 81,2 %. Reduksjonen i utslagene for ringromstrykket har økt fra 0,5- til 0,7 Hz ventilavstengning. Dette skiller seg fra første forsøk hvor det var en økt ustabilitet i denne overgangen. Endring i utslagene på vannraten har en liknende utvikling som ringromstrykket,

men utslagene øker med 0,7 Hz ventilavstengning, noe som samsvarer med utviklingen i første forsøk.

Den prosentvise endringen i vanninnstrømning og gjennomsnittsverdien av ringromstrykket for 2. forsøk er vist i Figur 5-34.

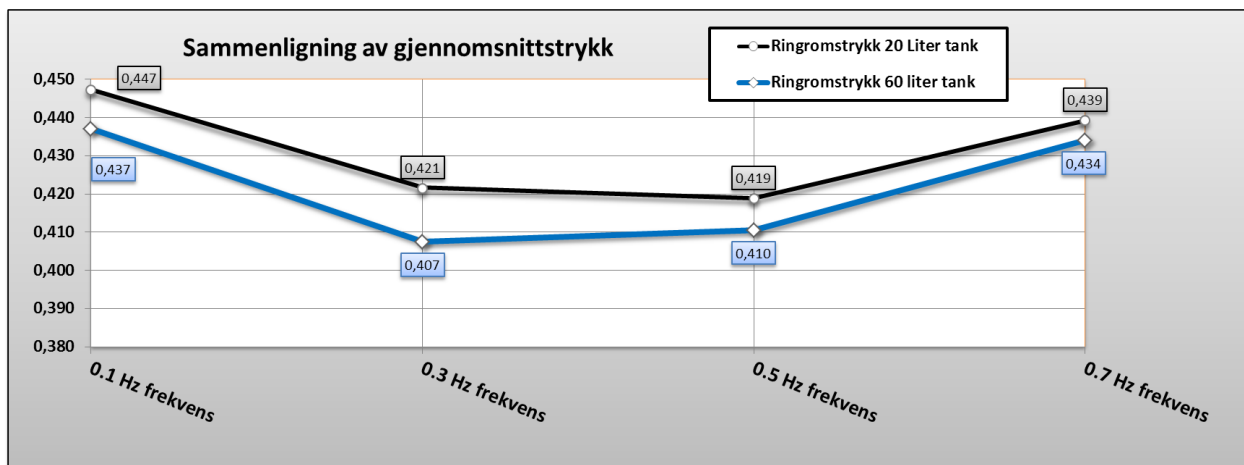


Figur 5-34: Prosentvis endring i volum og gjennomsnitt i forhold til referanseperiode, 2. forsøk

Alle gjennomkjøringene har en positiv utvikling på vanninnstrømningen i forhold til referanseperioden, og viser en økning på minimum 38 %. Den høyeste vanninnstrømningen er ved en ventilavstengning på 0,5 Hz, og tilsvarer en økning på 55 %. Endringen i volum går fra sitt laveste punkt med en ventilavstengning på 0,1 Hz, og øker til sitt høyeste punkt med 0,5 Hz. Forskjellen mellom laveste og høyeste verdi er på nesten 20 %. På 0,7 Hz har endringen sunket ned til 45,4 %.

Middelverdien til ringromstrykket har i alle gjennomkjøringene med ventilavstengning økt i forhold til referanseperioden. Økningen er lavest for ventilavstengningen på 0,3 Hz. Dette skiller seg fra første forsøk, hvor den laveste reduksjonen var ved 0,5 Hz. Bortsett fra dette har begge forsøkene en lik trend med tanke på endringen i ringromstrykk og vanninnstrømning som funksjon av frekvensen på ventilavstengningen.

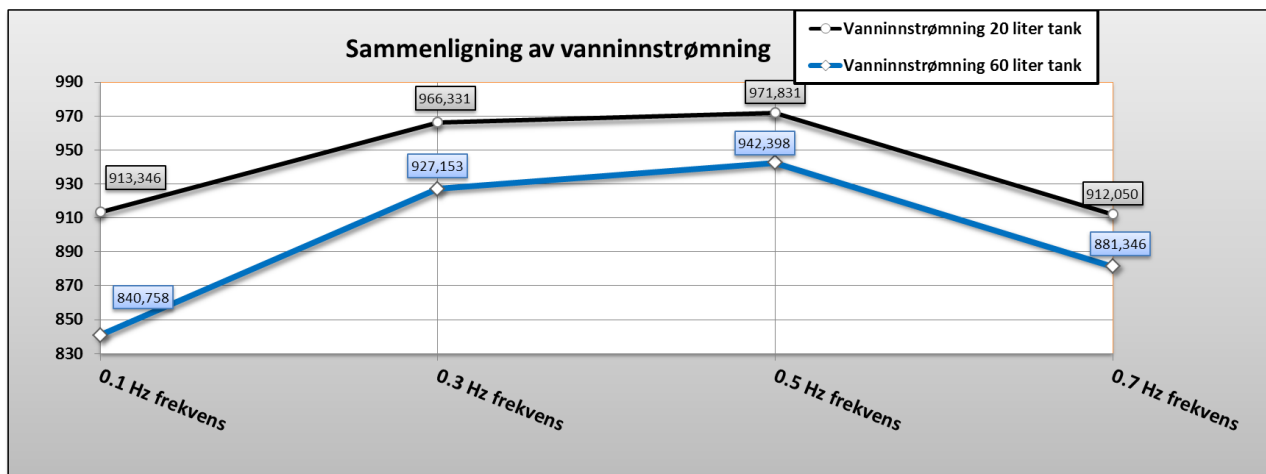
For å gi en bedre oversikt over de to forsøkene som hittil er utført er det gjort en sammenligning av gjennomsnittsverdiene til ringromstrykket for begge forsøkene etter at ventilavstengningen er aktivert. Trendene til de to forsøkene er vist i Figur 5-35, og tallene er gitt i barg.



Figur 5-35: Sammenligning av gjennomsnittlig ringromstrykk for 1. og 2. forsøk

Ringromstrykket for forsøket med 20 liter kompressibelt volum er høyere for alle ventilavstengningene som gjennomføres, men kun på maksimalt 0,015 bar. Derfor er det ikke grunn til å tro at dette har stor innvirkning på forskjellen i gassinjeksjonen.

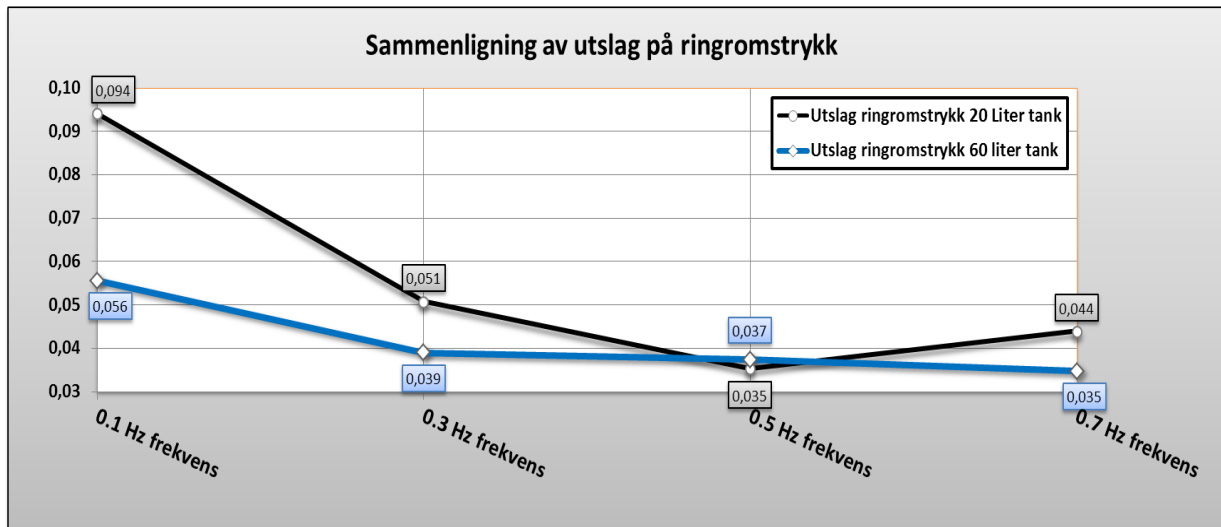
Figur 5-36 viser vanninnstrømningen. Figuren viser utviklingen for alle ventilavstengningene for 1. og 2. forsøk. Vanninnstrømningen har minket for alle gjennomkjøringene når ringromsvolumet var på 60 liter.



Figur 5-36: Sammenligning av vanninnstrømning for 1. og 2. forsøk

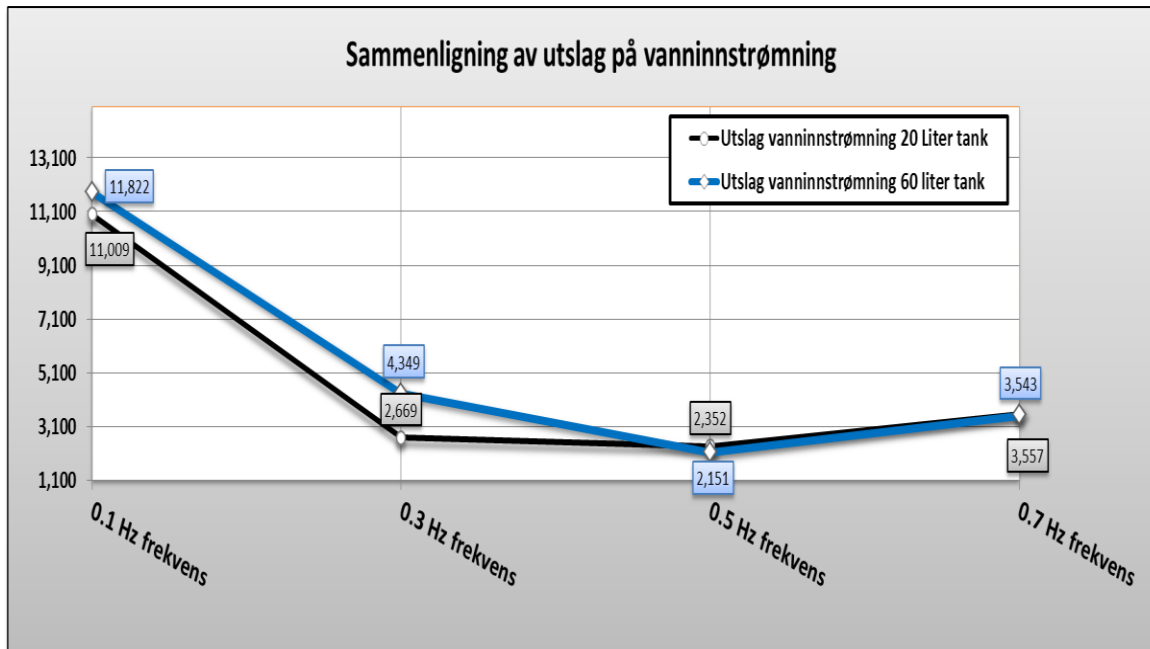
Den prosentvise endringen mellom referanseperioden og perioden etter start av stabiliseringstiltaket var forskjellig mellom de to forsøkene, men hadde en lik utvikling. Endringen var størst ved høye frekvenser. Tallverdien til utslagene er vist i Figur 5-37. Utslagene

på ringromstrykket er like når ventilavstengningen var satt til 0,5 Hz. Dette var ved en frekvens hvor begge forsøkene ikke ga noen antydning til andre frekvenskomponenter. Ved frekvenser hvor frekvensspekteret viste antydning til andre frekvenser enn hva ventilavstengningen var satt til, ble det observert større forskjeller i utslagene. Selv om volumet ble økt med 40 liter, var det kun en svak økning i utslag, noe som antyder at volumet på ringrommet har en liten effekt på virkningen av ventilavstengningen.



Figur 5-37: Sammenligning av utslag på ringromstrykket for 1. og 2. forsøk

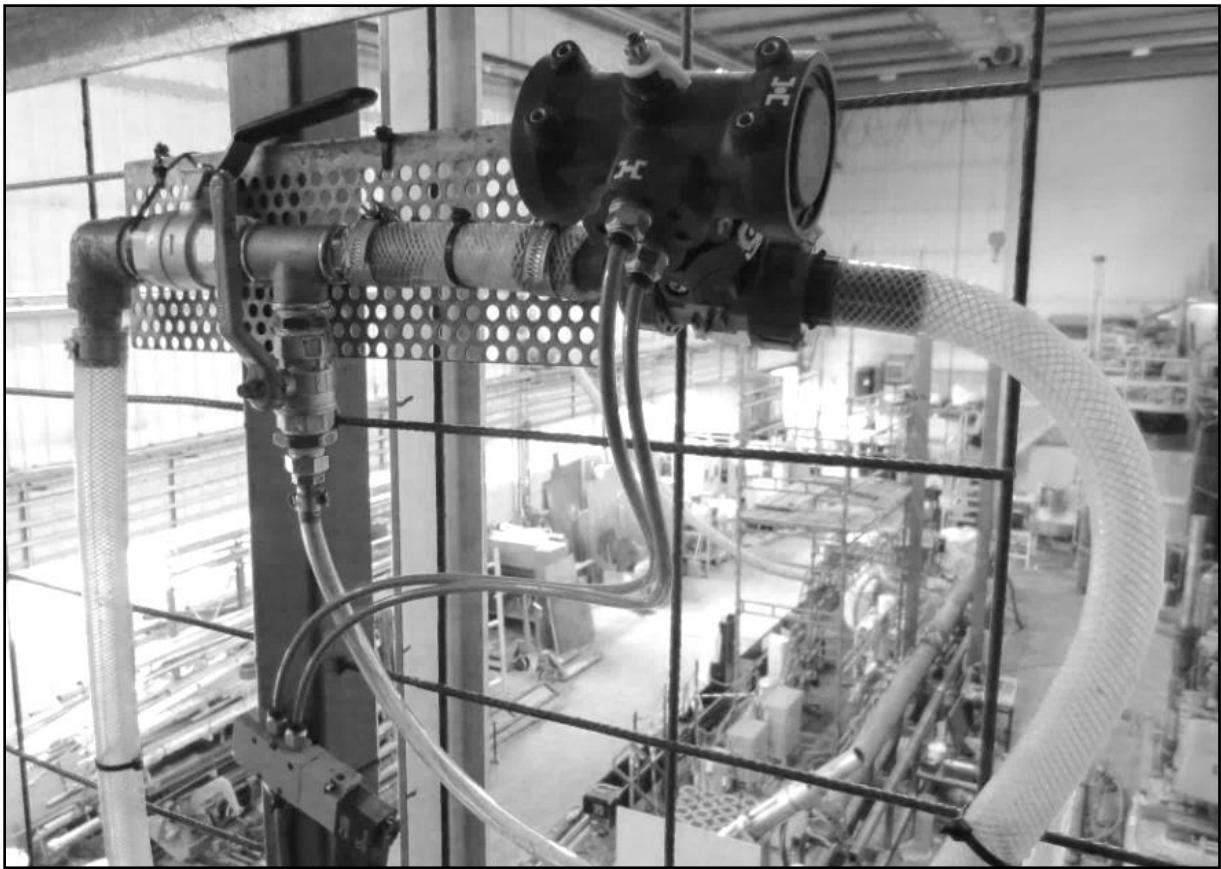
Utslagene på vanninnstrømningen er svært like for hver av gjennomkjøringene i første og andre forsøk. Dette styrker antagelsen om at stabiliseringseffekten ikke påvirkes nevneverdig når volumet på ringrommet økes. Sammenligningen av utslag på vanninnstrømningen for de to forsøkene er vist i Figur 5-38.



Figur 5-38: Sammenligning av utslag på vanninnstrømning for 1. og 2. forsøk

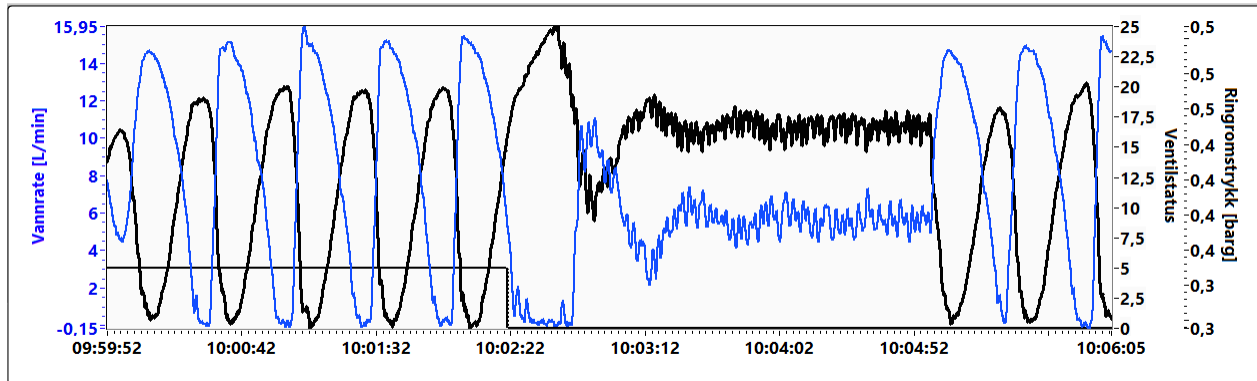
5.4. Tredje forsøk

Dynamiske løsningsmetoder benytter som oftest brønnhodeventilen til å strupe strømmingen for å oppnå stabilitet. Det er derfor ønskelig å teste ut kontrollmetoden ved brønnhode, for å undersøke om metoden kan benyttes på flere områder i brønnen. Modelloppsettet blir modifisert slik at forsøket kan gjennomføres. En pneumatisk ventil blir plassert ved enden av produksjonsrøret. Den pneumatisk ventil blir kontrollert på tilsvarende måte som ventilen som er benyttet i tidligere forsøk. For ikke å begrense strømmingen fullstendig når ventilen stenges, er det påkoblet et rør med indre diameter på 10 mm før ventilen. Strømmingen strømmer igjennom dette røret når ventilen er stengt. På grunn av den reduserte diameteren på det lille røret, fungerer røret som en begrensning. I praksis ville stengningen medført en syklisk reduksjon i åpningen på brønnhodeventilen med 60 %. Modifikasjonen som ble gjort på modellen er vist i Figur 5-39.



Figur 5-39: Modifisert modelloppsett ved brønnhode

Figur 5-40 viser en testgjennomkjøring av systemet. I det første område er ventilen åpen, slik at strømmingen ikke har noen restriksjoner ved brønnhode. En tydelig ustabil produksjon vises. Når ventilen stenges, kan strømmingen kun strømme gjennom det tynne røret. Strømmingen stabiliseres, noe som tyder på at strømmingen er friksjonsdominert som følge av restriksjonen ved brønnhode.



Figur 5-40: Strømning med og uten brønnhodeventilen stengt

Tredje forsøk gjennomføres med følgende gasstilførsel og ringromsvolum:

- **Gasstilførsel: 10 % (15,6 L/min)**
- **Ringromsvolum: 20 liter**

Sammenligningsgrunnlaget gjøres med 5 stabiliseringstiltak. Stabiliseringstiltakene som gjøres er listet opp under.

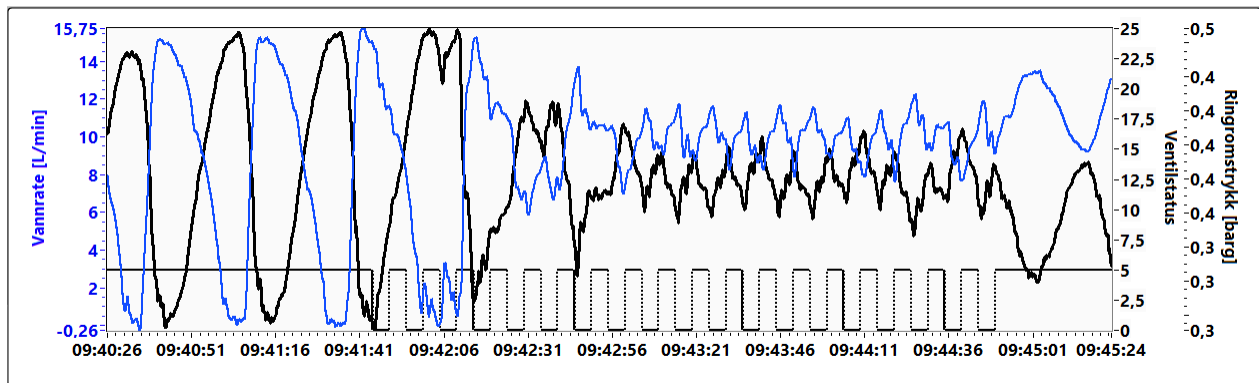
- **0,1 Hz frekvens ventilavstengning ved brønnhode**
- **0,3 Hz frekvens ventilavstengning ved brønnhode**
- **0,5 Hz frekvens ventilavstengning ved brønnhode**
- **0,7 Hz frekvens ventilavstengning ved brønnhode**
- **Stengt brønnhodeventil**

5.4.1. Resultat av 0,1 Hz ventilavstengning ved brønnhode

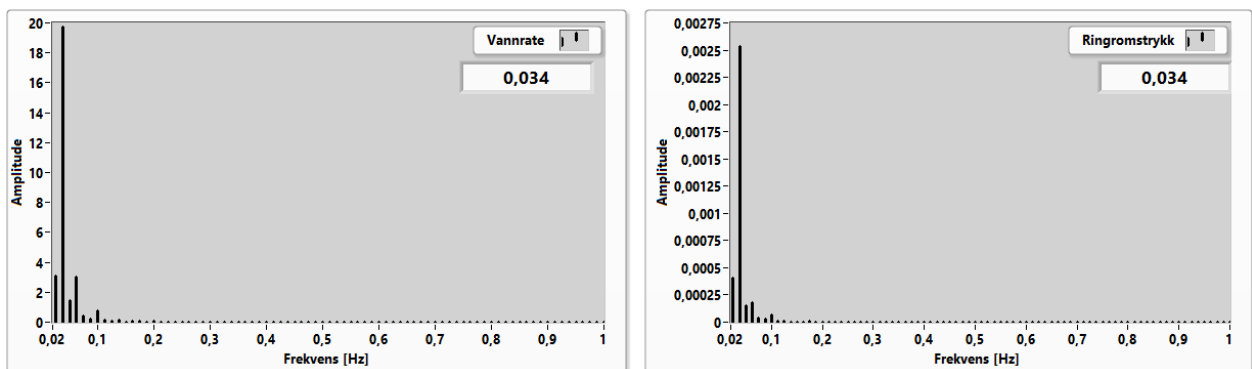
Figur 5-41 viser gjennomkjøringen som gjøres med en syklisk avstengning av brønnhodeventilen. Referanseperioden vist i fra 09:39:30 til 09:41:40 viser en tydelig ustabil produksjon. Som tidligere er det utført en frekvensanalyse av referanseperioden. Frekvensspekteret for denne perioden er vist i Figur 5-42. Svingningene har en frekvens på 0,034 Hz. Frekvensen er lik for alle referanseperiodene i dette forsøket, derfor er frekvensspekteret for referanseperioden i de

neste gjennomkjøringene utelatt. Frekvensen i referanseperioden er tilsvarende frekvensen i første forsøk.

Etter at ventilavstengningen ble aktivert, reduseres svingningene. Det tar i underkant av ett minutt før de nye svingningene dominerer produksjonen, noe som er lengre tid enn tidligere observasjoner med tilsvarende frekvens. Svingningene har et mye mindre utslag, men har en middelværdi som er tilnærmet middelværdien til referanseperiodens svingninger. Det er derfor ikke forventet at det forekommer en vesentlig økning i innstrømning når kontrolleren er aktivert.

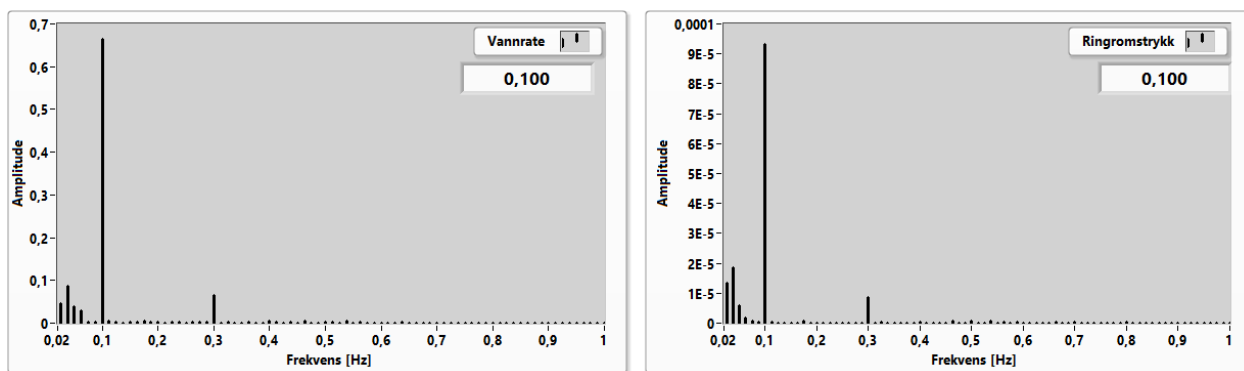


Figur 5-41: Plot av 0,1 Hz ventilavstengning ved brønnhode



Figur 5-42: Frekvensspekter for referanseområde for 0,1 Hz ventilavstengning, 3. forsøk

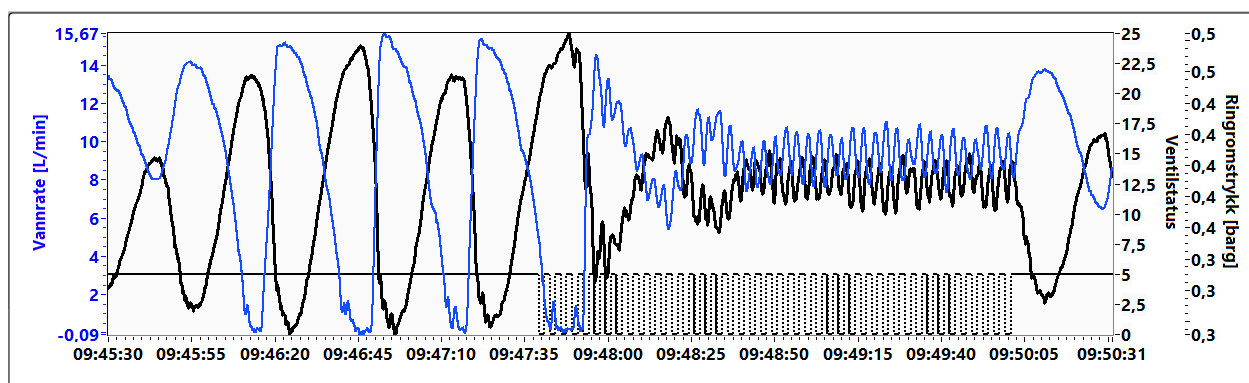
Figur 5-43 viser frekvensspekteret etter at ventilavstengningen ble aktivert. Produksjonssystemet stabiliseres rundt 0,1 Hz, som tilsvarer ventilens avstengningsfrekvens. Frekvensspekteret viser et mindre utslag på en frekvens som tilsvarer frekvensen til referanseperioden. Ved at systemet viser flere frekvenskomponenter tilsies det at kontrolleren ikke klarer å destruere den naturlige svingefrekvensen til systemet, men kontrolleren demper effekten av svingningene.



Figur 5-43: Frekvensspekter etter aktivering av 0,1 Hz ventilavstengning ved brønnhode

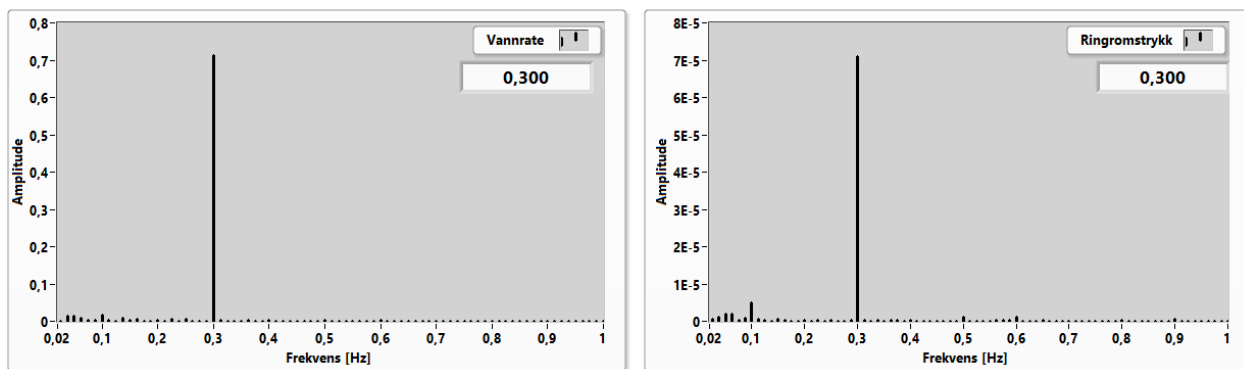
5.4.2. Resultat av 0,3 Hz ventilavstengning ved brønnhode

Når frekvensen på ventilavstengningen øker til 0,3 Hz reduseres svingningene betraktelig. Fremdeles observeres det en lang stabiliseringsperiode etter at ventilavstengningen aktiveres. Middelerdien er nær middelerdien til referanseperioden. Ringromstrykket har et mindre utslag enn ved 0,1 Hz ventilavstengning. Figur 5-44 viser grafen for gjennomkjøringen.



Figur 5-44: Plot av 0,3 Hz ventilavstengning ved brønnhode

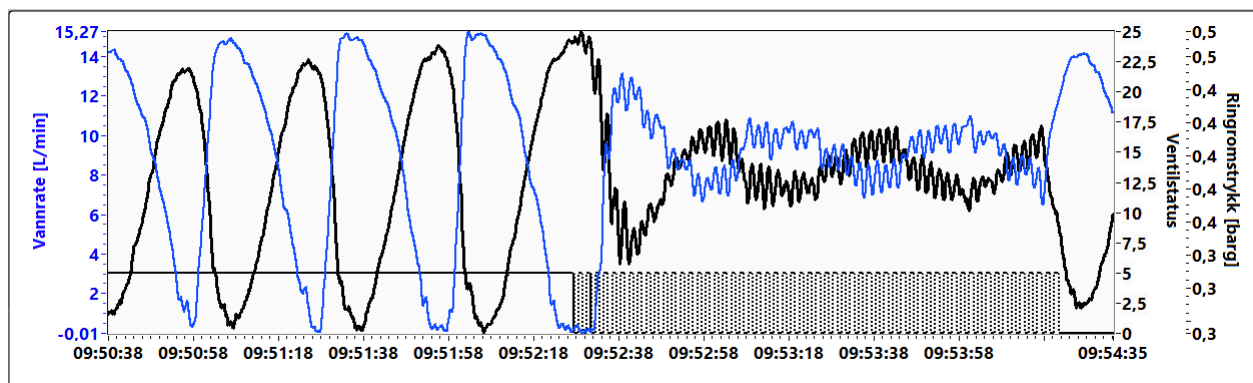
Frekvensspekteret, vist i Figur 5-45, har et tydelig utslag ved 0,3 Hz. Fremdeles er det antydning til utslag ved en frekvens lik den naturlige frekvensen til systemet, men utslaget er ikke like tydelig som i forrige gjennomkjøring. Dette tyder på at en 0,3 Hz ventilavstengning har en bedre effekt enn ved 0,1 Hz.



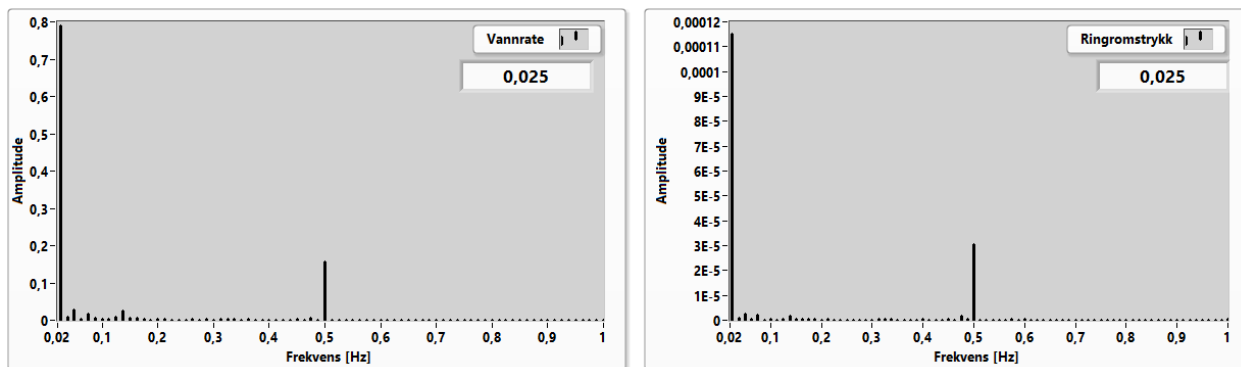
Figur 5-45: Frekvensspekter etter aktivering av 0,3 Hz ventilavstengning ved brønnhode

5.4.3. Resultat av 0,5 Hz ventilavstengning ved brønnhode

Når frekvensen på ventilavstengningen øker til 0,5 Hz innstiller produksjonssystemet seg med en dominerende frekvens på 0,025 Hz. Svingningene vises tydelig i Figur 5-46. Den dominerende frekvensen i systemet er lavere enn frekvensen til svingningene i referanseperioden. Det observeres i tillegg at systemet er preget av ventilens frekvens, vist i frekvensspekteret i Figur 5-47. Utviklingen er uventet. I forhold til andre gjennomkjøringer hvor en ventilavstengning på 0,5 Hz har hatt best effekt, er det i dette tilfelle den frekvensen som gir minst effekt av gjennomkjøringene i forsøket.



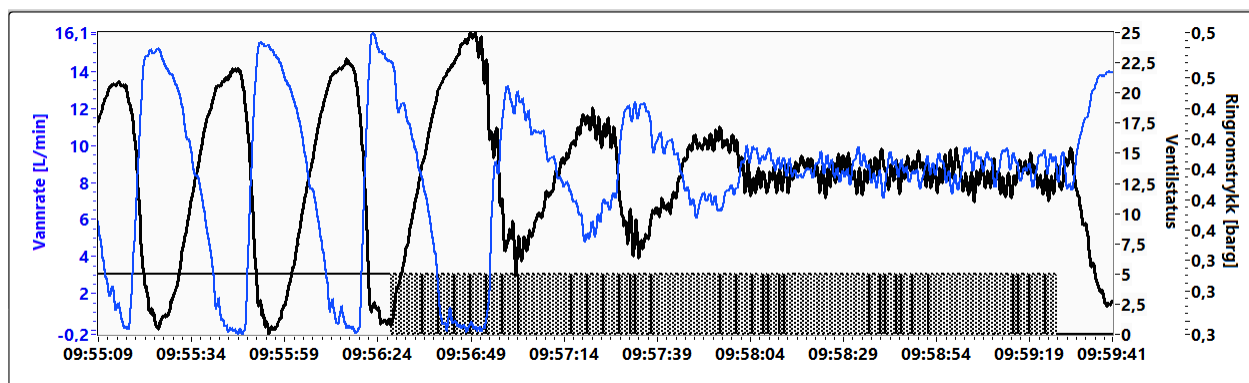
Figur 5-46: Plot av 0,5 Hz ventilavstengning ved brønnhode



Figur 5-47: Frekvensspekter etter aktivering av 0,5 Hz ventilavstengning ved brønnhode

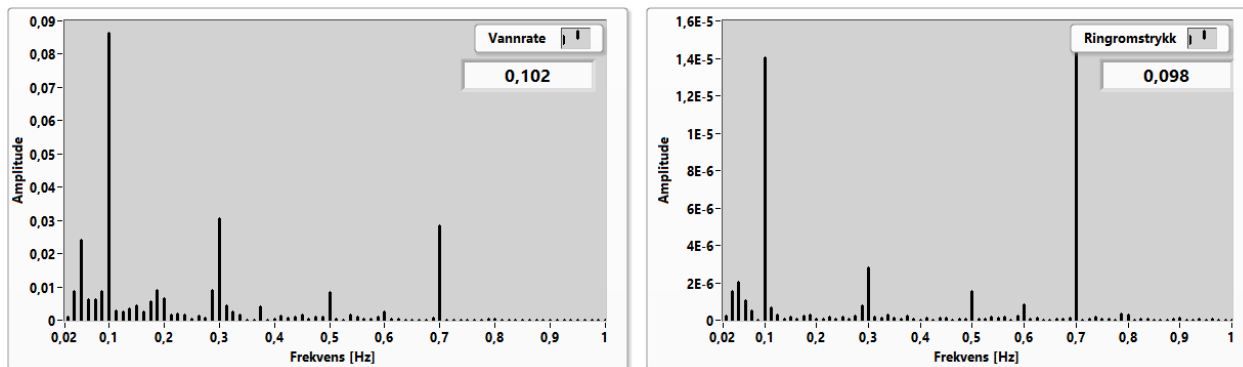
5.4.4. Resultat av 0,7 Hz ventilavstengning ved brønnhode

Figur 5-48 viser grafen til gjennomkjøringen med 0,7 Hz ventilavstengning. Stabiliseringstiden er betraktelig lengre ved denne gjennomkjøringen. Over halvannet minutt går før svingningene reduseres til et punkt hvor de ikke lenger endres over tid. I kontrast med de foregående forsøkene viste ventilavstengningen på 0,7 Hz den mest stabile trenden av alle gjennomkjøringene.



Figur 5-48: Plot av 0,7 Hz ventilavstengning ved brønnhode

Frekvensspekteret er vist i Figur 5-49. Som tidligere har 0,7 Hz ventilavstengning innslag av flere frekvenskomponenter. I denne gjennomkjøringen var det tydeligst utslag på 0,1 Hz, men med et kraftig utslag ved 0,7 Hz. Den naturlige frekvensen til systemet er også tilstedeværende.

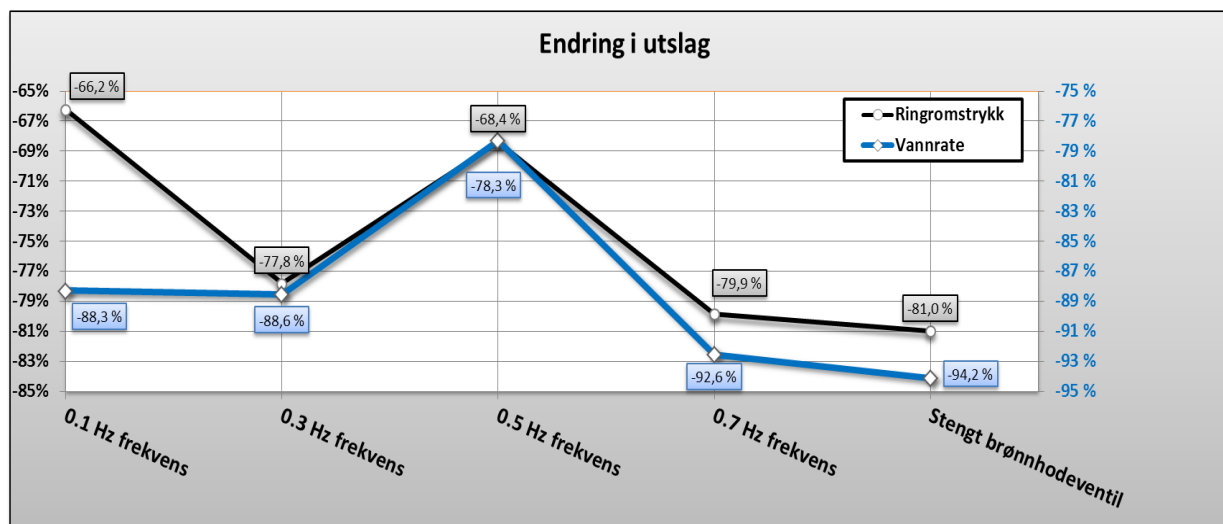


Figur 5-49: Frekvensspekter etter aktivering av 0,5 Hz ventilavstengning ved brønnhode

5.4.5. Sammenligning av resultatene i tredje forsøk

Som forventet ble den høyeste stabiliseringseffekten oppnådd når brønnhodeventilen var stengt, slik at strømmingen var igjennom det lille røret. Ved denne gjennomkjøringen ble utslagene i ringromstrykket og vanninnstrømningen redusert med over 80 %.

Endringene i utslag for de forskjellige gjennomkjøringene med frekvensstyrt ventilavstengning har en annerledes trend i forhold til de tidligere forsøkene. I Figur 5-50 vises endringen i utslag for alle gjennomkjøringene i forsøket.



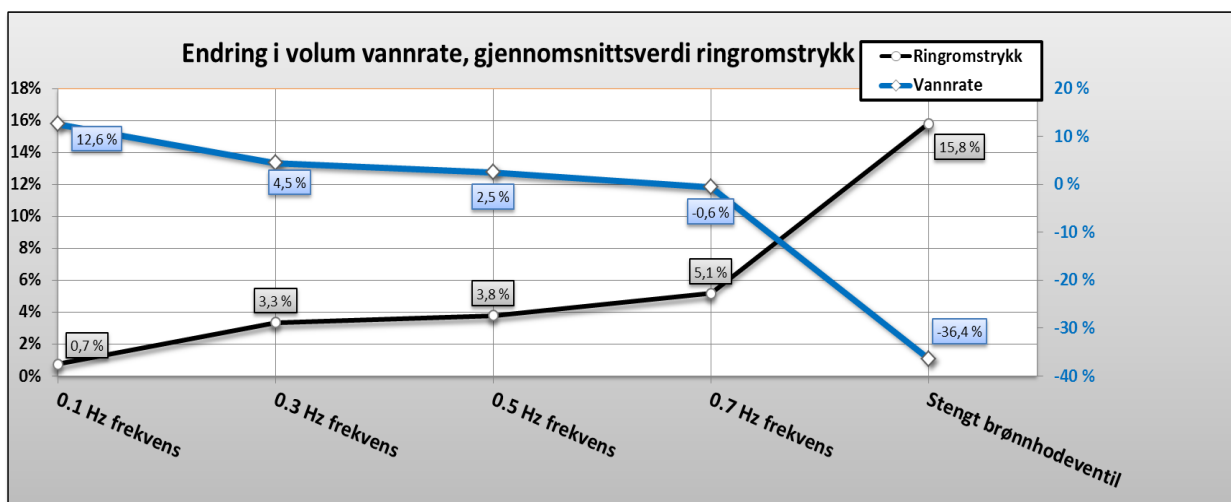
Figur 5-50: Sammenligning av endringen i utslag for gjennomkjøringene

I forsøk 1 og 2 var det høyest reduksjon i utslag ved 0,5 Hz, mens i dette forsøket hadde både ringromstrykket og vanninnstrømningen lavest reduksjon ved denne frekvensen. Den lave endringen er forårsaket av at den dominerende svingfrekvensen ikke var 0,5 Hz når

ventilavstengningen var aktiv. Den høyeste reduksjonen var ved 0,7 Hz ventilavstengning. Dette er også forskjellig fra de tidligere forsøkene. Effekten i de tidligere forsøkene lå mellom 70 og 75 % reduksjon i utslag, mens det i dette forsøket lå mellom 80 og 93 %. Trenden til figuren viser en tydelig forskjell mellom virkningen av ventilavstengningen når den er plassert ved injeksjonspunktet kontra brønnhode.

De tidligere forsøkene hadde en maksimal reduksjon i utslagene til vanninnstrømningen mellom 84,2 % i forsøk 1 og 73,9 % i forsøk 2. I dette forsøket lå den maksimale reduksjonen på 92,6 %. Det betyr at ventilavstengningen ved brønnhode hadde nesten 10 % bedre effekt på stabiliseringen av vanninnstrømningen. For ringromstrykket var verdien i dette forsøket på 79,9 %, mens i første forsøk var det en maksimal reduksjon på 80,7 % og i det andre forsøket lå verdien på 79,6 %. Effekten var jevn når det gjaldt stabiliseringen av ringromstrykket.

Den prosentvise endringen i total vanninnstrømning mellom referanseperioden og perioden etter at ventilavstengningen ble aktivert var jevnt over lav. Dette er vist i Figur 5-51. I forhold til tidligere forsøk er dette negativt, siden kontrolleren ikke økte produksjonsvolumet. Men når brønnhodeventilen var avstengt ble innstrømningsvolumet redusert med nesten 40 %. Dette betyr at forsøket viste en produksjonsgevinst på nesten 40 % ved å bruke syklisk ventilavstengning ved brønnhode i forhold til statisk struping ned til stabil produksjon.



Figur 5-51: Sammenligning av endringen i volum og gjennomsnittsverdi

6. Diskusjon

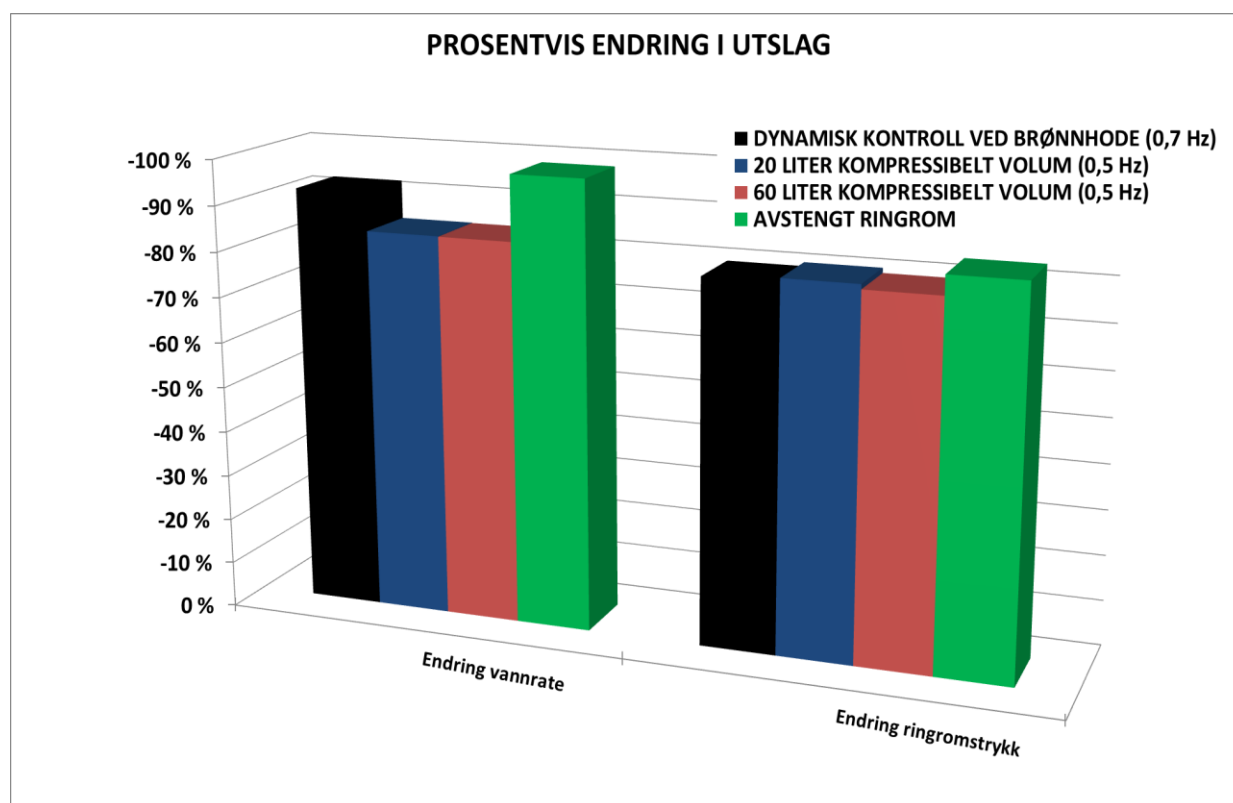
6.1. Ventilavstengningens effekt på stabilisering

Stabiliseringstiltaket som er foreslått i oppgaven viser en stabiliserende effekt på produksjonen ved alle frekvenser som ble undersøkt i forsøkene. Graden av stabilisering var avhengig av hvilke frekvens ventilen ble lukket med. Forsøkene viste at metoden ikke klarte å skape en destruktiv interferens ved lave frekvenser. Når frekvensen til systemet i referanseperioden ble observert i frekvensspekteret når ventilavstengningen var aktiv, hadde stabiliseringsmetoden en lavere effekt. I første og andre forsøk ble den naturlige frekvensen til systemet observert ved 0,1 Hz ventilavstengning. I tredje forsøk, hvor ventilavstengningen var flyttet til brønnhode, ble en ny frekvens, som var lavere enn den naturlige frekvensen til systemet, observert ved en ventilavstengning på 0,5 Hz. Denne frekvensen hadde lavest stabiliserende effekt på svingningene. I motsetning var det denne frekvensen som hadde høyest stabiliserende effekt når ventilavstengningen var ved injeksjonspunktet. Dette tyder på at når ventilavstengningen ikke klarer å overskygge systemets frekvens når brønnen produserer ustabil, vil den stabiliserende effekten på svingningene bli redusert. Et mål med kontrolleren vil derfor i hovedsak være å overskygge den ustabile frekvensen til systemet. En optimaliseringsmetode vil være en gradvis økning av lukkefrekvensen til kontrolleren. Når en spesifikk lukkefrekvens viser at den naturlige svingfrekvensen til systemet er fraværende, kan kontrolleren finjusteres til ønsket produksjon ved å endre gasstilførselen, ved å anta at svingfrekvensen til systemet ikke endres som funksjon av gasstilførselsraten.

En kontrollering av injeksjonsventilen viste at resultatene ikke ble sterkt preget av økt ringromsvolum. Reduksjonen i utslagene var sammenlignbare for forsøkene med 20 og 60 liters kompressibelt volum. Når kontrollmetoden ble utført på brønnhodeventilen viste resultatene en økt reduksjon i utslagene på vanninnstrømmingen, i forhold til forsøkene hvor injeksjonsventilen ble avstengt. Dette kan skyldes at avstengningen av brønnhodeventilen ikke førte til en total avstenging av produksjonen. Når injeksjonsventilen ble avstengt, ble gassinjeksjonen lik null, slik at brønnen kun produserte på grunn av tidligere injisert gass. En annen grunn kan skyldes dynamikken i ringrommet. Når injeksjonsventilen blir avstengt, blir også dynamikken i ringrommet avstengt fra produksjonsrøret. Når injeksjonsventilen blir avstengt med jevne

intervaller medfører det at dynamikken i ringrommet påvirker produksjonsrøret i jevne intervaller, men med en mindre utstrekning. Når brønnhodeventilen blir avstengt med jevne intervaller, vil dynamikken i ringrommet fremdeles kunne påvirke produksjonsrøret. Samtidig vil avstengningen ved brønnhode ikke føre til at gassinjeksjonen stopper. Derfor vil brønnen kunne ha en jevnere distribuering av gass i produksjonsrøret i forhold til når injeksjonsraten blir avstengt i jevne intervaller.

En sammenligning av de beste resultatene i hvert forsøk er vist i Figur 6-1. Figuren viser et stolpediagram hvor den prosentvise endringen i vanninnstrømningen er vist til venstre og den prosentvise endringen i ringromstrykket vist til høyre. Det er gjort en sammenligning av kontrollen ved brønnhode og kontrollen ved injeksjonspunktet for 20- og 60 liters tank. Gjennomkjøringen med avstengt ringrom er tatt med for å sammenligne effekten den dynamiske kontrollen har i forhold til et godt stabiliseringstiltak.



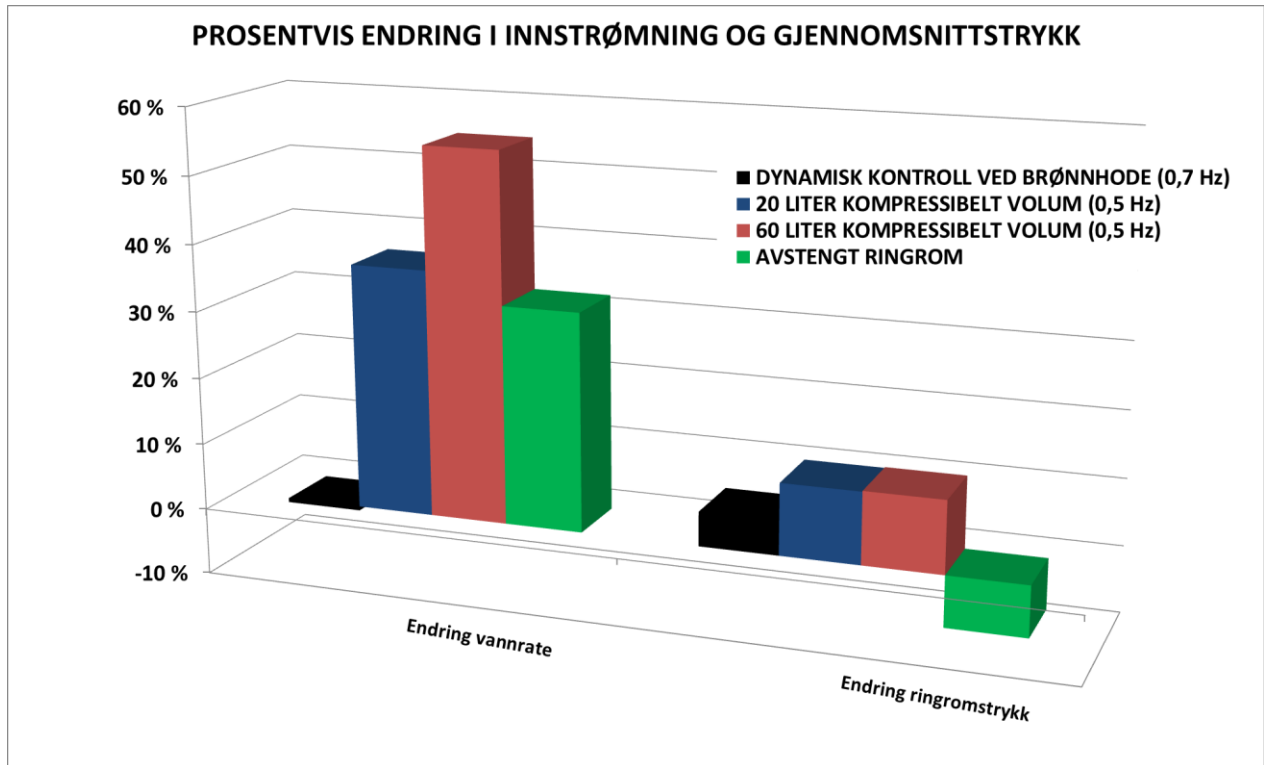
Figur 6-1: Sammenligning av resultatene i forsøkene

Av figuren kommer det frem at kontrollen ved brønnhode hadde best effekt på reduksjonen i utslag på vanninnstrømningen når den dynamiske kontrollmetoden ble benyttet. Avstengt

ringrom hadde høyest total effekt som forventet, siden dette stabiliseringstiltaket minimerer den dynamiske effekten i ringrommet. Den laveste endringen er forsøket med 60 liters tank, noe som kommer av økt gasskapasitet i ringrommet, men endringene er tilnærmet like for forsøket med 20- og 60 liters tank. Reduksjonen i utslagene på ringromstrykket er jevnt for alle forsøkene, uten store avvik. Igjen er avstengt ringrom det mest effektive tiltaket. Selv om avstengt ringrom er mest effektivt, er dette tiltaket minst realistisk. Dette skyldes at ringrommet må fysisk reduseres, noe som er vanskelig å gjennomføre i praksis etter at brønnen er komplettert.

6.2. Ventilavstengningens effekt på produksjonen

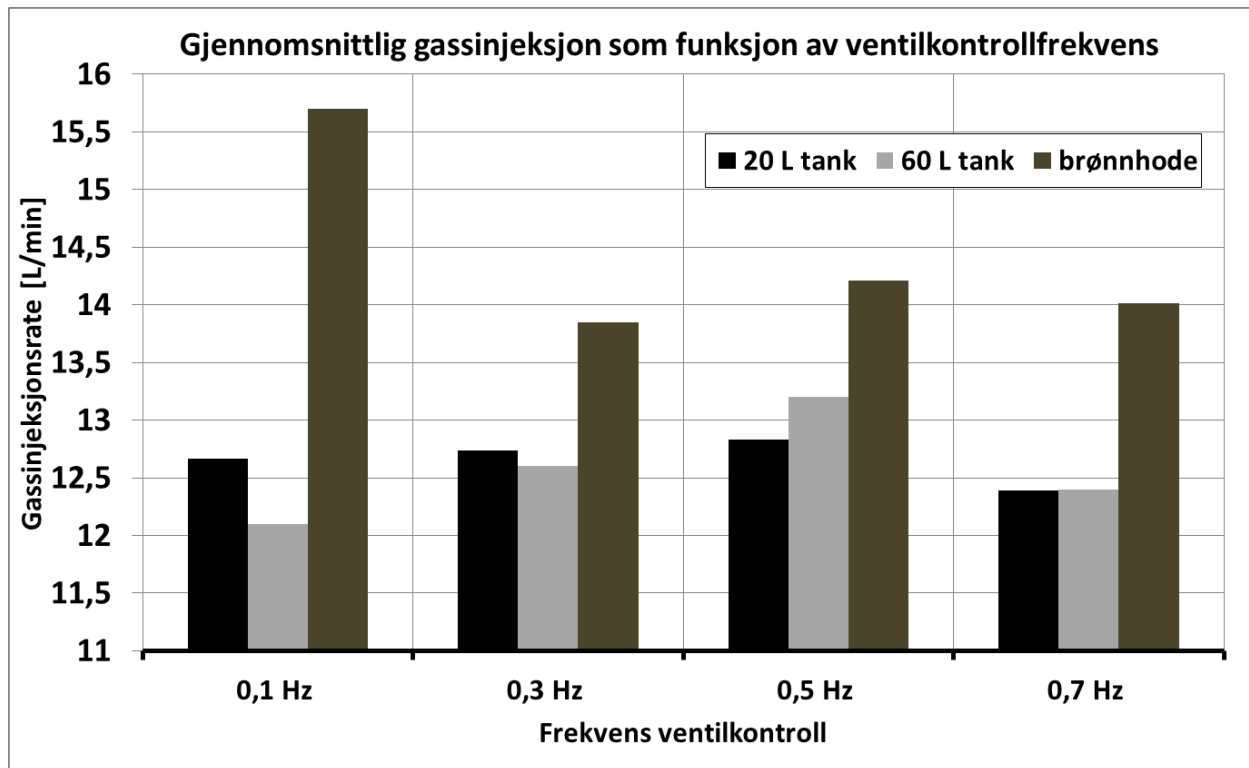
Produksjonen i eksperimentet måles gjennom innstrømningsraten. Innstrømningsraten er valgt på grunn av manglende måleutstyr som kan måle tofasestrømningen ved brønnhode nøyaktig. Selv om ventilavstengning ved brønnhode hadde størst stabiliserende effekt av alle forsøkene med dynamisk ventilavstengning, var denne metoden den minst gunstige med hensyn på økt produksjon. Metoden viste en svært liten endring i total produksjon før og etter aktivering av ventilavstengningen. I Figur 6-2 vises den prosentvise endringen i innstrømning og gjennomsnittstrykk for alle de beste gjennomkjøringene. Metoden som viste høyest endring, med over 50 % økning, var med syklisk avstenging av injeksjonsventilen med 60 liters tank. Gjennomkjøringen med avstengt ringrom hadde en positiv virkning på vanninnstrømningen, men ikke på høyde med syklisk avstengning av injeksjonsventilen.



Figur 6-2: Prosentvis endring i innstrømning og snittrykk

6.3. Ventilavstengningens effekt på gassinjeksjonen

Fra avsnitt 5.3.5 viste resultatene fra gjennomkjøringene med 60 liter kompressibelt volum et høyere utslag på innstrømningen i forhold til 20 liter kompressibelt volum. Ut i fra de resultatene var det å forvente en forskjell i gassinjeksjonsraten. Figur 6-3 viser den gjennomsnittlige gassinjeksjonen for alle forsøkene med syklisk ventilavstengning.

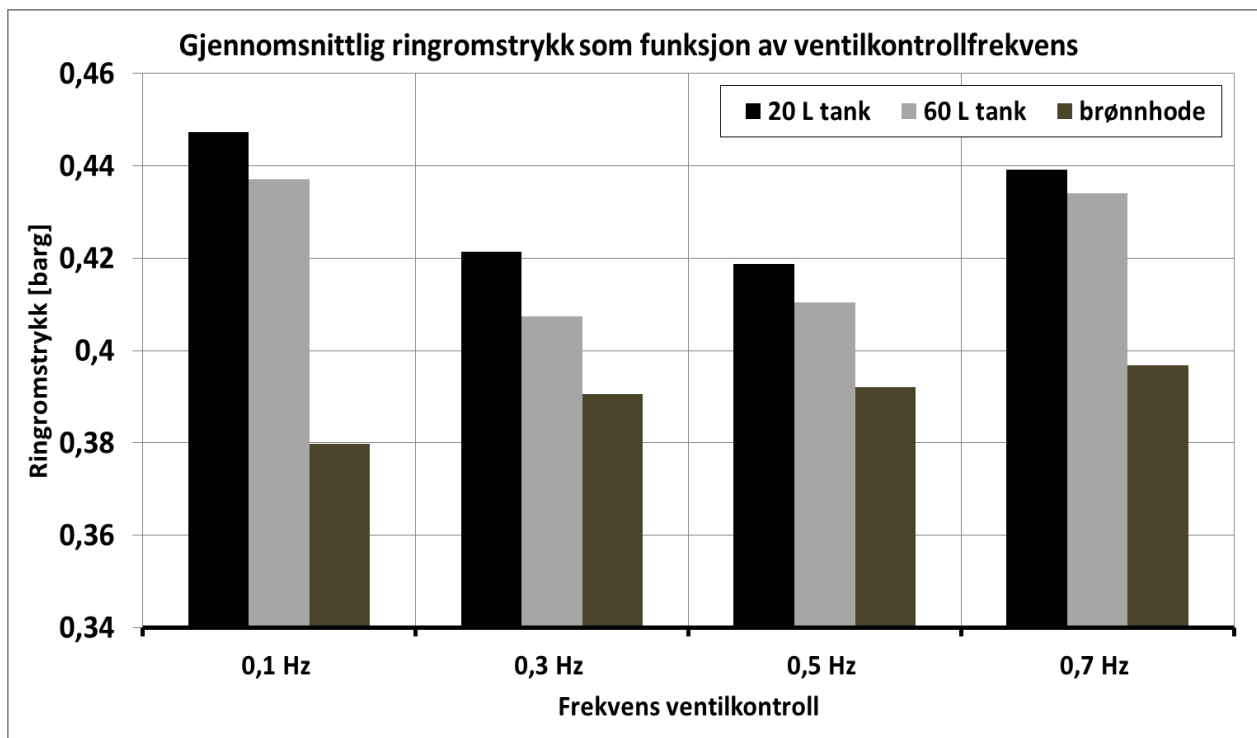


Figur 6-3: Gassinjeksjon som funksjon av ventilavstengningsfrekvens

Figuren viser at gjennomsnittlig injeksjonsrate for forsøkene med 20- og 60 liter tank er ganske like, uten en gjennomgående forskjell mellom hver av gjennomkjøringene. Forklaringen på hvorfor det er en differanse mellom gjennomsnittstrykket og utslaget på innstrømningen, men som ikke skyldes en forandring i injeksjonsrate kan ligge i målefeil. Siden det måles 80 sekunder fra referanseperioden som sammenlignes med 80 sekunder fra perioden etter at ventilavstengningen aktiveres, vil forskjeller i hvor målingene gjøres gi utslag i den prosentvise endringen. Siden perioden til den ustabile syklusen øker når volumet til ringrommet øker, vil dette gjøre målingene fra referanseperioden mer sensitiv på hvor målingene starter fra ved økt volum. Selv om den prosentvise endringen er noe forskjellig mellom forsøkene med 20- og 60

liters tank, er trenden den samme: en gradvis økning av vanninnstrømning og stabilisering frem til 0,5 Hz ventilavstengning, for deretter å minke.

Når ventilavstengningen er flyttet til brønnhode, vises det en tydelig økning i gjennomsnittlig gassinjeksjonsrate i forhold til når kontrollen var ved injeksjonspunktet. Dette kommer av at injeksjonsventilen ikke har en strømningsbegrensning, slik at det alltid vil være en gassinstrømning fra ringrommet. I Figur 6-4 er gjennomsnittlig ringromstrykk i perioden etter ventilavstengningen er aktivert vist for alle frekvenser i de forskjellige forsøkene. Figuren viser at ringromstrykket, når ventilavstengningen er ved brønnhodet, har et lavere trykk enn når ventilavstengningen var ved injeksjonspunktet. Siden injeksjonsventilen ikke begrenser injeksjonen av gass under ventilavstengningen ved brønnhode, vil det medføre en økt gassmengde i produksjonsrøret. Dette senker trykket ved injeksjonspunktet, og dermed tillates det en høyere gassinjeksjonsrate. Selv om forsøket hvor kontrolleren var ved brønnhode hadde en høyere gjennomsnittlig injeksjonsrate, ble produksjonen begrenset ved at produksjonsventilen strupte strømmingen syklisk.



Figur 6-4: Ringromstrykk som funksjon av ventilavstengningsfrekvens

6.4. Veien videre

Laboratorieforsøkene viste at stabiliseringsmetoden har en stabiliserende effekt som måles med andre veletablerte tiltak. Fremdeles er det flere ting som kan utforskes. Siden metoden er lite utforsket vil det mest nærliggende være å utvide laboratoriemodellen. Dette innebærer å øke størrelsen på modellens produksjonskapasitet.

Ved å utføre forsøk på en laboratoriemodell som har større og lengre produksjonsrør, økt trykk, større produksjons- og injeksjonsrater, flere måleinstrumenter og andre fluider kan effekten bli målt opp i mot småskalaeksperimentet.

Ved å øke produksjonsrøret dimensjoner kan forhold som ikke tydelig kan observeres i denne laboratoriemodellen evalueres. Tetthetsvariasjoner vil ha en tidsforsinkelse som avhenger av den kinematiske bølgefarten og rørets lengde. Slik som Sivertsen et al. (2009) observerte, hvor aktiveringen av kontrolleren hadde en større betydning når modellens størrelse økte. Kontrolleren som ble benyttet i denne modellen viste at tiden det tok før produksjonen ble stabilisert varierte. Det er derfor viktig å undersøke om tiden det tar før produksjonen stabiliseres øker om dimensjonene til gassløftsystemet øker, og om stabiliseringen har like stor effekt.

Ved å legge til flere måleinstrumenter på laboratoriemodellen kan effekten til kontrolleren bli bedre kvantifisert. Dette kan gjøres ved å ha målinger av brønnhodetrykket, produksjonsraten ved brønnhode og bunnhullstrykket i produksjonsrøret. I tillegg vil en økning av måleinstrumenter gjøre at prediksjonen fra stabilitetskriterier kan settes opp i mot observert produksjon.

Når ventilavstengningen ble benyttet ved brønnhode var det ingen mulighet til å variere hvor mye ventilen skulle redusere strømmingen. Dette førte til at det ikke var mulig å undersøke effekten av hvor mye graden av struping som gjøres har på stabiliteten. Ved å bytte ut ventilen til en proporsjonalventil kan denne effekten bestemmes. Dette betyr at forsøkene kan veksle mellom åpen strømning og til en forhåndsbestemt ventilåpning, eller veksling mellom to forhåndsdefinerte ventilåpninger. Dette vil være viktig for å fastslå om metoden kan benyttes både til å stabilisere og til endre produksjonen til en ønsket strømningsrate.

Stabilisering av brønnen vil være ønskelig, men det er i tillegg viktig å kunne stabilisere strømmingen til en ønsket verdi. Feedback-kontrollere har et satt setpunkt som kontrolleren

forsøker å oppnå, men denne metoden baseres ikke på et setpunkt. Derfor vil det være nødvendig å undersøke om metoden kan brukes til å optimalisere produksjonen, ikke kun til stabilisering.

7. Konklusjon

Et nytt stabiliseringstiltak for ustabil produksjon ble undersøkt i denne masteroppgaven. Av resultatene som fremkommer av forsøkene utført med laboratoriemodellen kan det trekkes frem følgende punkter:

- Laboratoriemodellens dynamiske egenskaper tilsvarte observasjoner gjort fra virkelige brønner. Resultatene fra modellen vil derfor kunne ha en overføringsverdi til realistiske størrelser.
- Alle gjennomkjøringene med metoden viste en reduksjon i svingningene. Stabiliseringsmetoden har en overbevisende stabiliseringseffekt på svingningene observert i laboratoriemodellen, uten å gå på bekostning av vanninnstrømningen.
- Periodisk stengning av injeksjonsventilen viste en maksimal reduksjon i svingningene på henholdsvis 84 % og 81 % til innstrømningsraten og ringromstrykket. Gjennomsnittlig vanninnstrømning hadde en økning opp til 37 % etter at stabiliseringstiltaket ble igangsatt.
- Periodisk avstengning ved utløpet hadde en maksimal reduksjon i svingningene på henholdsvis 93 % og 80 % til innstrømningsraten og ringromstrykket. Gjennomsnittlig vanninnstrømning hadde ingen endring før og etter stabiliseringen, men hadde en gevinst på 36 % i forhold til å strupe strømningen ned til stabilt område.

Litteraturliste

- Aamo, O. M., Eikrem, G. O., Siahaan, H. B., & Foss, B. A. (2005). Observer design for multiphase flow in vertical pipes with gas-lift—theory and experiments. *Journal of Process Control*, 15(3), 247-257. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jprocont.2004.07.002>
- Alhanati, F., Schmidt, Z., Doty, D., & Lagerlef, D. (1993). *Continuous gas-lift instability: diagnosis, criteria, and solutions*. Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas.
- Asheim, H. (1988). Criteria for gas-lift stability. *Journal of Petroleum Technology*, 40(11), 1452-1456. doi: <http://dx.doi.org/10.2118/16468-PA>
- Asheim, H. (2014, 27.02.2014). [Tidsforsinkelse].
- Bertuzzi, A., Welchon, J., & Poettman, F. (1953). Description and analysis of an efficient continuous-flow gas-lift installation. *Journal of Petroleum Technology*, 5(11), 271-278. doi: <http://dx.doi.org/10.2118/953271-G>
- Brigham, E. O. (1988). *The Fast Fourier Transform And Its Applications*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Dalsmo, M., Halvorsen, E., & Slupphaug, O. (2002). *Active feedback control of unstable wells at the brage field*. Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas.
- Eikrem, G. O., Aamo, O. M., & Foss, B. A. (2008). On instability in gas lift wells and schemes for stabilization by automatic control. *SPE Production & Operations*, 23(02), 268-279. doi: <http://dx.doi.org/10.2118/101502-PA>
- Griffith, P. (1984). Multiphase Flow in Pipes. *Society of Petroleum Engineers*, 36(03), 361-367.
- Hu, B. (2005). *Characterization of gas-lift instabilities* (Vol. 2005:56). Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Hu, B., & Golan, M. (2003). *Gas-lift instability resulted production loss and its remedy by feedback control: dynamical simulation results*. Paper presented at the SPE International Improved Oil Recovery Conference in Asia Pacific, Kuala Lumpur, Malaysia
- Jansen, F. E., & Shoham, O. (1994). *Methods for Eliminating Pipeline-Riser Flow Instabilities*. Paper presented at the SPE Western Regional Meeting, 23-25 March, Long Beach, California.

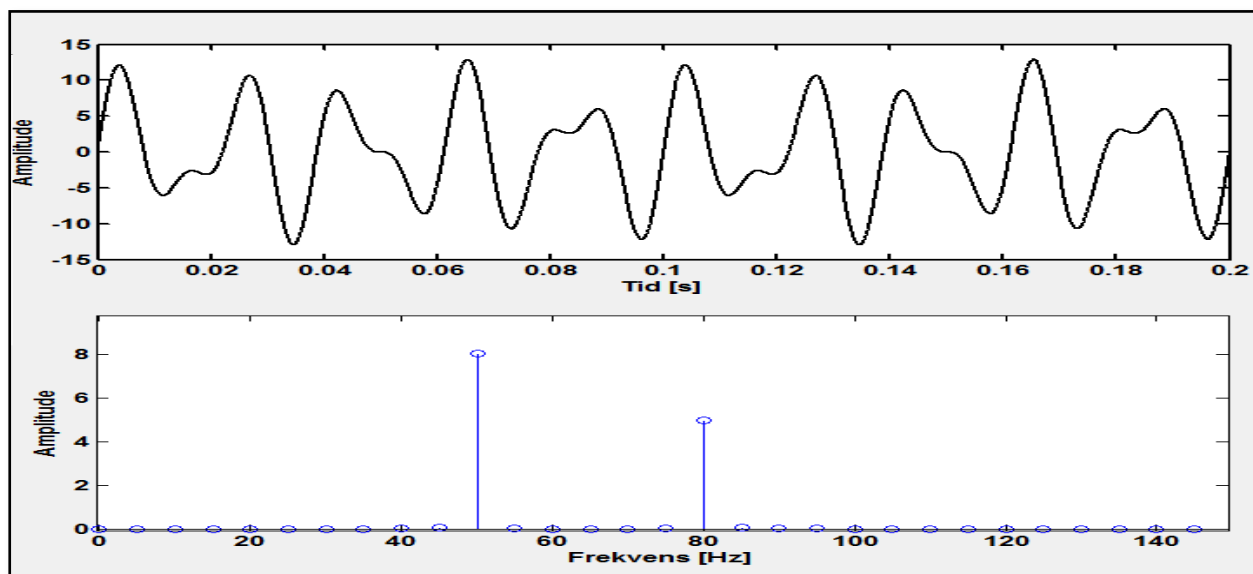
- Larsen, C. A. (2013). ANALYSERING AV USTABILITET I GASLØFTEDE PRODUKSJONSBRØNNER (pp. 72): NTNU.
- Sagberg, K. M. (2013). Eksperimentell modellering av ustabilitet i gassløftsystemer (pp. 93). Norway: Institutt for petroleumsteknologi og anvendt geofysikk.
- Sivertsen, H., Alstad, V., & Skogestad, S. (2009). Medium-scale experiments on stabilizing riser-slug flow.
- Sivertsen, H., Storkaas, E., & Skogestad, S. (2010). Small-scale experiments on stabilizing riser slug flow. *Chemical Engineering Research and Design*, 88(2), 213-228. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2009.08.007>
- Slupphaug, O., Hole, H., & Bjune, B. (2006). *Active Slug Management*. Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition.
- Smith, C. A., & Corripio, A. B. (1997). *Principles and Practice of Automatic Process Control* (Second Edition ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Taitel, Y., Bornea, D., & Dukler, A. E. (1980). Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes. *AIChE Journal*, 26(3), 345-354. doi: 10.1002/aic.690260304
- White, F. M. (2008). *Fluid mechanics*. Boston: McGraw-Hill.

Appendiks A

Analyseprogrammet benytter Fourier-transformasjon til å finne frekvensspekteret til signalet. Et kortfattet sammendrag fra et kapittel i prosjektoppgaven til Larsen (2013) er derfor laget for å gi en forståelse av Fourier-transformasjon. Alle figurer og ligninger i dette kapittelet er hentet fra prosjektoppgaven.

A.1. Fourier-transformasjon

En Fourier-transformering av en bølgeform vil gi en sum av sinusledd. Hvert sinusledd har en spesifikk amplitude og frekvens. En grafisk fremstilling av Fourier-transformasjonen av $f(x) = 8 \cdot \sin(2\pi \cdot 50 \cdot x) + 5 \cdot \sin(2\pi \cdot 80 \cdot x)$ er gitt i Figur A-1. Av ligningen fremkommer det to sinusledd med et frekvensinnhold på 50- og 80 Hz, og amplitude på 8 og 5. Den nederste grafen viser utslag på 50- og 80 Hz med en størrelse på 8 og 5, noe som gir frekvens og amplitude til hvert sinusledd i ligningen.



Figur A-1: Grafisk fremstilling av en Fourier-transformasjon (nederste figur)

Den matematiske definisjonen av Fourier-transformasjonen til en funksjon $f(t)$ uttrykt med f er gitt i Ligning (A.1).

$$\hat{f}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-2\pi f t} dt \quad (\text{A.1})$$

Ligningen ovenfor er gitt i kontinuerlig tid. Målinger i virkeligheten er diskrete. Derfor er det nødvendig med en metode som kan utføre en Fourier-transformasjon på diskrete data.

Målepunkter av diskrete data måles med en bestemt *målefrekvens*, $f_s = \frac{1}{T}$. Den Diskret Fourier-transformasjonen av diskrete data $h(kT)$ er gitt i Ligning (A.2).

$$G\left(\frac{n}{NT}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} h(kT) \cdot e^{\frac{-i2\pi nk}{N}} \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

hvor :

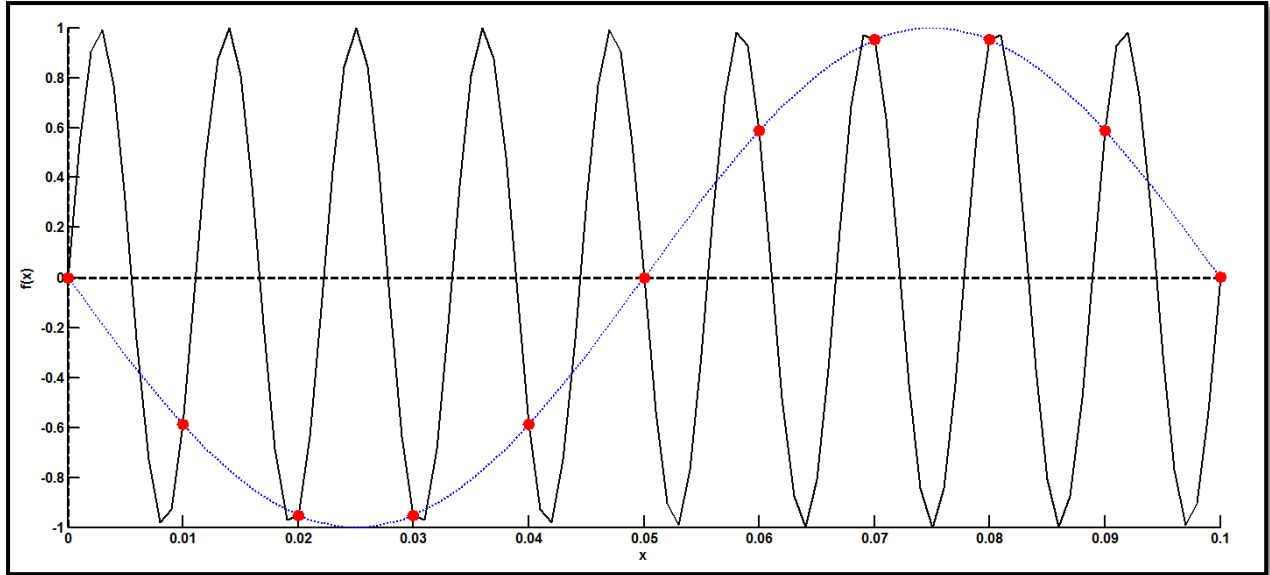
$N = \text{Antall målepunkt}$

$T = \text{Måleintervall}$

(A.2)

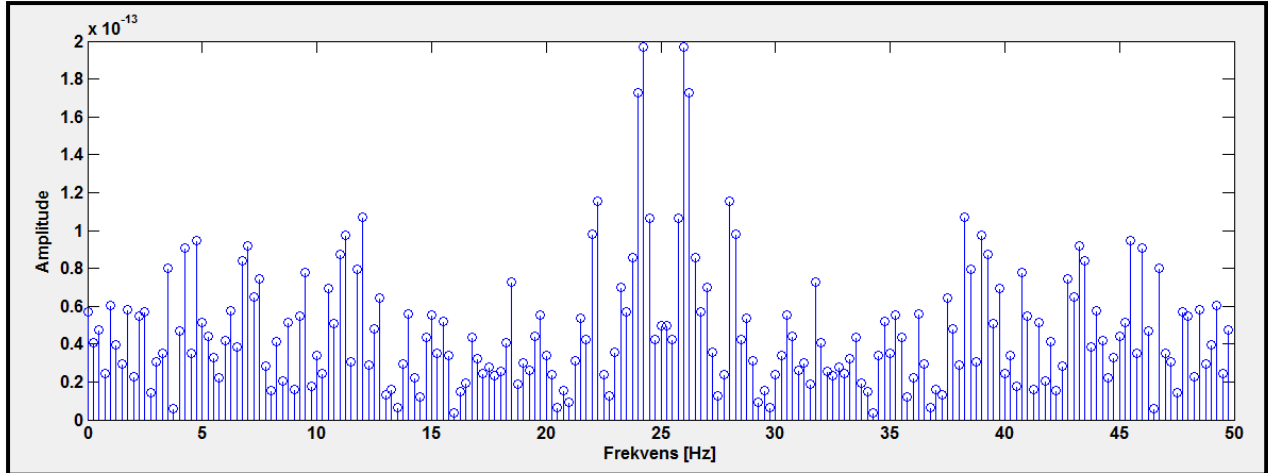
samsvarenheten mellom den diskrete og kontinuerlige Fourier-transformasjonen varierer som en funksjon av målefrekvens og trunkering.

Målefrekvensen vil påvirke nøyaktigheten av den diskrete Fourier-transformasjonen til målepunktene. Om målefrekvensen er for lav, vil det være mulig å tilpasse kurver med feil frekvensinnhold. Dette er illustrert i Figur A-2. Denne feilen kalles *Aliasing i tidsdomene* (Brigham, 1988).



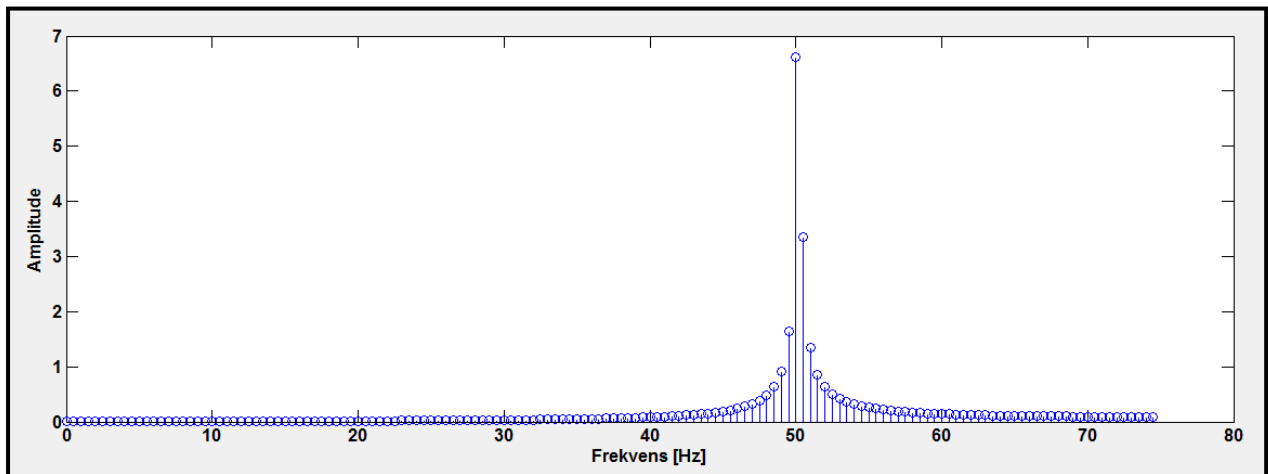
Figur A-2: Grafisk fremstilling av Aliasing.

Påvirkningen på den grafiske representasjonen av den diskrete Fourier-transformasjonen til en enkel sinuskurve er illustrert i Figur A-3 og Figur A-4. I den første figuren var målefrekvensen, f_s , lik 50 Hz. Dette tilsvarte frekvensen til sinuskurven. Figuren viser at Fourier-transformasjonen ikke gir et godt bilde av frekvensspekteret til funksjonen. Utslagene i figuren fra frekvenser $\frac{f_s}{2}$ til f_s er et speilbilde av utslagene i området fra $0 - \frac{f_s}{2}$. Dette skyldes algoritmen som benyttes til å beregne den diskrete Fourier-transformasjonen går fra $-f_s \rightarrow f_s$. Frekvensspekteret fra $\frac{f_s}{2} \rightarrow f_s$ representerer de negative verdiene. Fourier-transformasjonen vil dermed ikke kunne vise frekvenskomponenter høyere enn $\frac{f_s}{2}$.



Figur A-3 DFT av funksjonen med 50 Hz målefrekvens

I den andre figuren er målefrekvensen økt til 150 Hz, noe som er tre ganger høyere enn svingefrekvensen. Figuren viser et tydelig utslag ved 50 Hz.



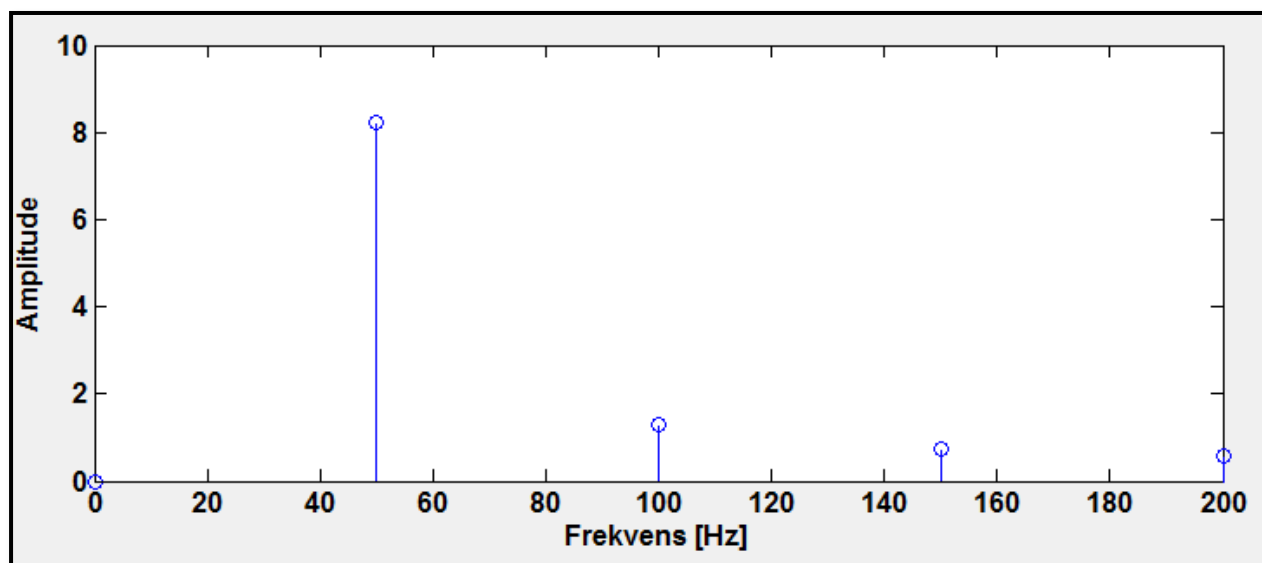
Figur A-4 Målefrekvens lik 150 Hz

Frekvensspekteret til et signal kan beregnes om betingelsen i (A.3) er beholdt.

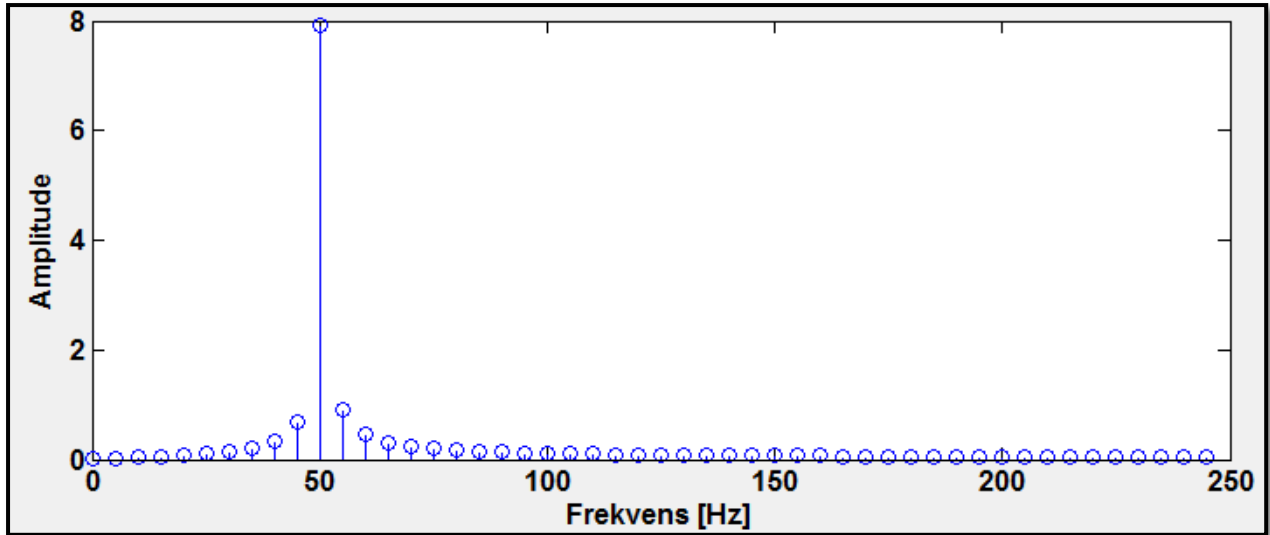
$$\frac{1}{T} > 2f_w, \text{ hvor } \frac{1}{T} = \text{målefrekvensen} \quad (\text{A.3})$$

Ligning (A.3) er kjent som *Nyquist Sampling Rate* (Brigham, 1988).

Avstanden mellom hvert punkt i frekvensspekteret bestemmes av antall målepunkter til de diskrete måledataene. Avstanden mellom hvert punkt minker i frekvensspekteret når antall målepunkt, N , øker. Mellomrommet mellom hvert punkt er gitt som $\delta f = \frac{1}{NT}$. I ligningen er T tiden mellom hvert målepunkt. δf kalles *oppløsningen* til den diskrete Fourier-transformasjonen Brigham (1988). Den diskrete Fourier-transformasjonen til en funksjon med forskjellig oppløsning er vist i Figur A-5 og Figur A-6. Av figurene vises det at for lav oppløsning vil kunne føre til at frekvenskomponenter kan mangle i frekvensspekteret.

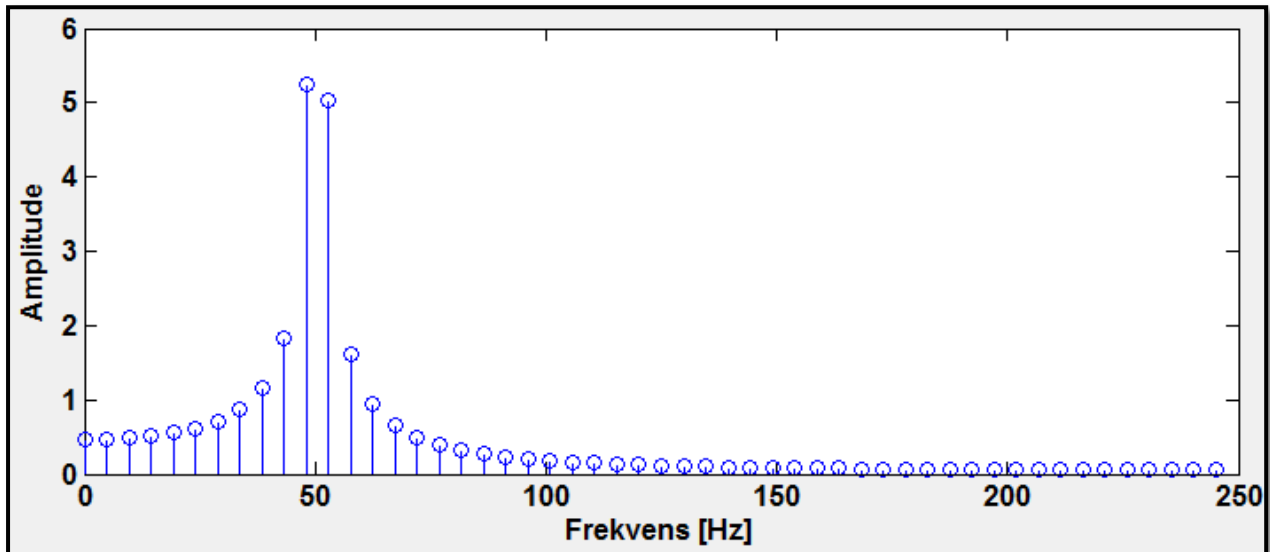


Figur A-5: N=10



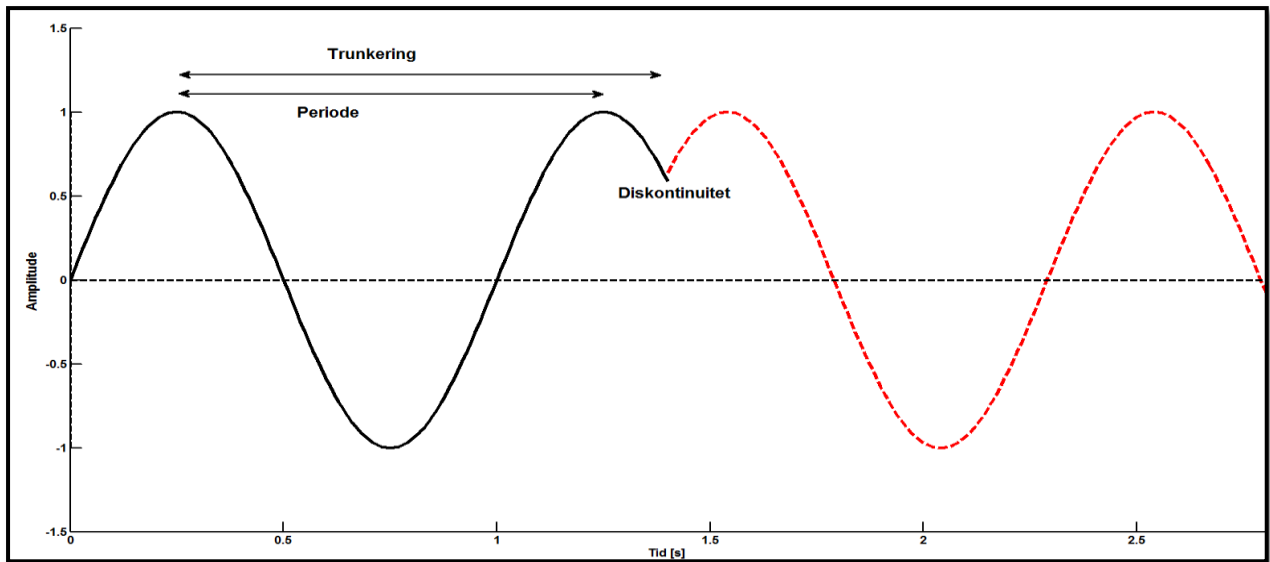
Figur A-6: $N=100$

En annen feilkilde kan oppstå om antall målepunkter til en bølge ikke er et multiplum av perioden. I Figur A-7 er den diskrete Fourier-transformasjonen til samme bølge som tidligere vist, men antall målepunkt er endret til $N = 104$. Figuren har en veldig annerledes form en Figur A-6, selv om antall målepunkter kun er økt med 4. Dette skyldes at det gjøres en trunkering av bølgen.



Figur A-7: $N=104$, diskontinuerlig trunkering

En trunkering er vist i Figur A-8. Diskontinuiteten vist i figuren tilfører frekvenskomponenter i frekvensspekteret.



Figur A-8: Illustrasjon av diskontinuitet som følge av trunkering

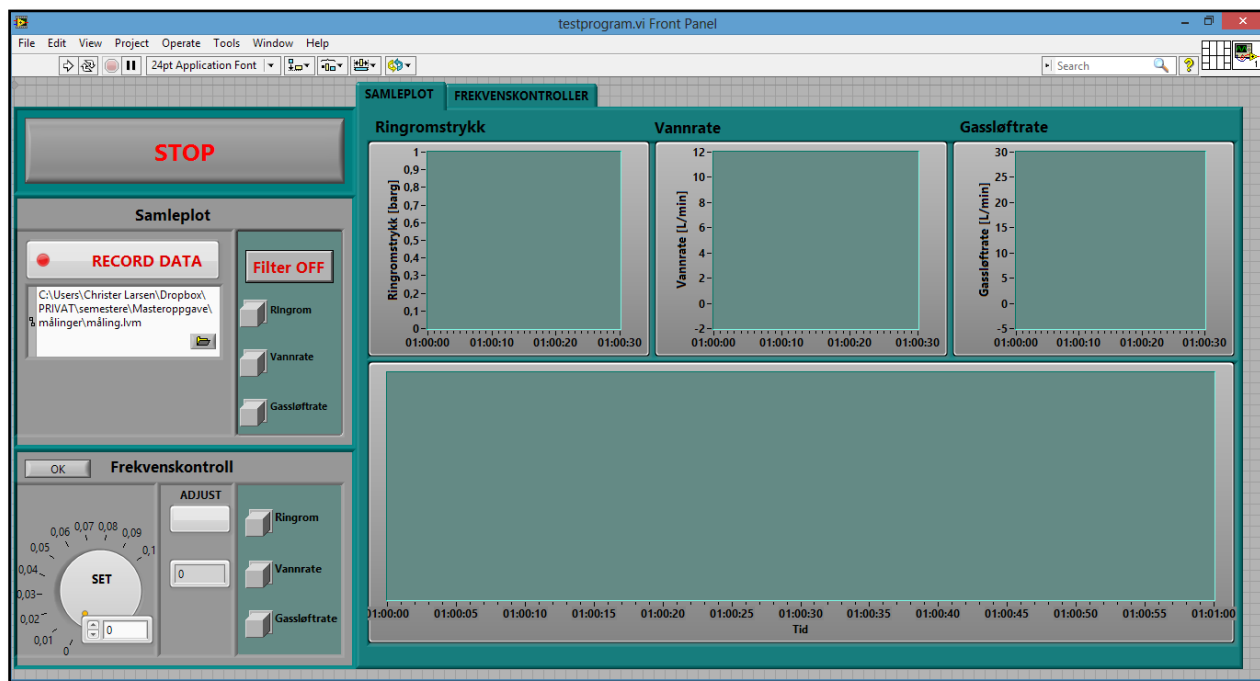
Appendiks B

B.1 Måleprogram

Programmets formål er å visualisere, analysere og kontrollere produksjonssystemet i realtid. Et program er konstruert i et grafisk utviklerprogram kalt *LabVIEW*. Programmet består av to hoveddeler; et frontpanel som inneholder valgte komponenter, og et blokkdiagram som gir komponentene de ønskede funksjoner.

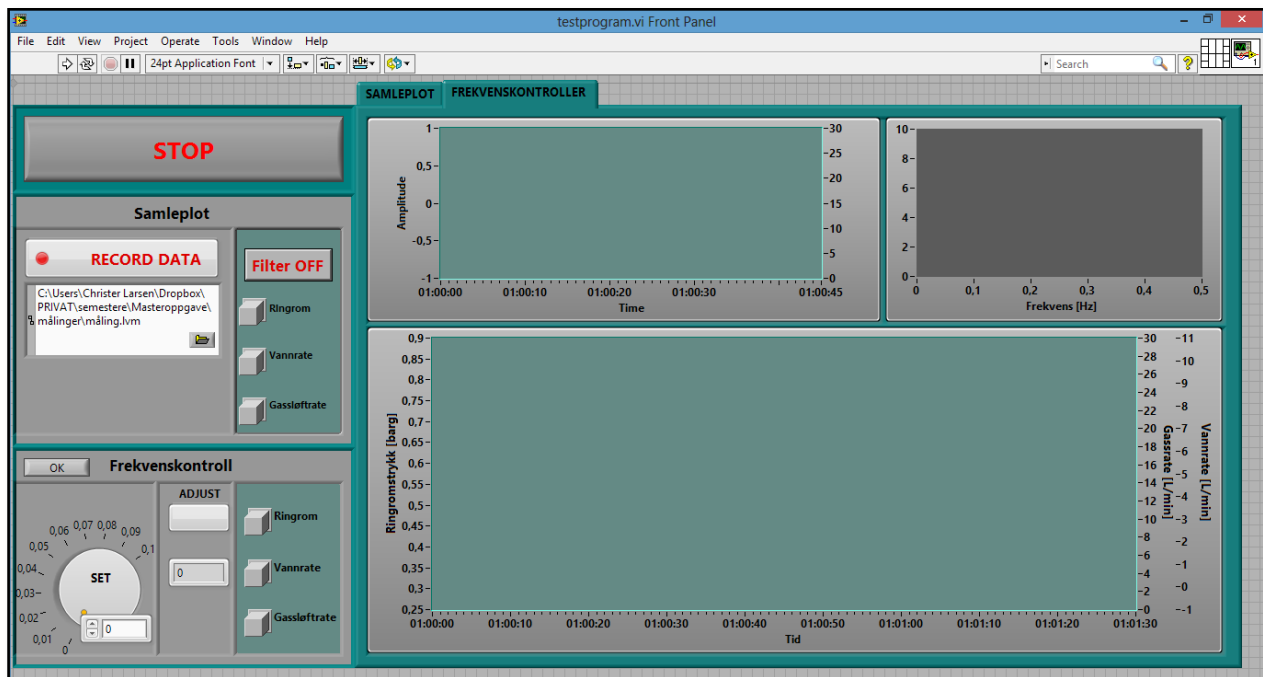
B.1.1 Frontpanelet til måleprogrammet

Frontpanelet til programmet som ble benyttet i forsøkene er vist i Figur B-1. Frontpanelet består av to hovedfunksjoner. Den ene funksjonen har en sidetabulator som inneholder plot av ringromstrykk, vannrate og gassløftrate i separate plot, og et samleplot hvor man kan velge hvilke parametere som skal plottes ved hjelp av «*pushbuttons*» som er vist øverst til venstre i figuren. Det er en mulighet for å filtrere dataene som analyseres. Filtret gjør et aritmetisk gjennomsnitt av 4 målepunkter, hvorav hvert målepunkt samles med en rate på 10 Hz. Det er også lagt til en «*start/stopp knapp*» som lagrer alle målepunkter som måles når knappen aktiveres.



Figur B-1: Frontpanel for måleprogrammet

Den andre hovedfunksjonen er for kontroll av strupeventilen vist i Figur 4-1. ved å endre sidetabulatoren til «FREKVENSKONTROLLER» kan en analyse av dataene gjøres. Denne siden er vist i Figur B-2. Plottet øverst til venstre vil vise ventilstatus og valgt parameter til analyse. Valget av parameteren gjøres nederst til venstre. Plottet øverst til høyre i figuren viser frekvensspekteret til den valgte parameteren, og det nederste plottet er igjen et samleplot. Frekvenskontrollområde nederst til venstre har en *start/stop* knapp som aktiverer kontrollen av strupeventilen. Kontrolleren har en skrue som setter frekvensen på avstengingen av ventilen, en indikator som viser frekvensen til parameteren som er valgt og en justeringsknapp som endrer fasen til ventilavstengingen.

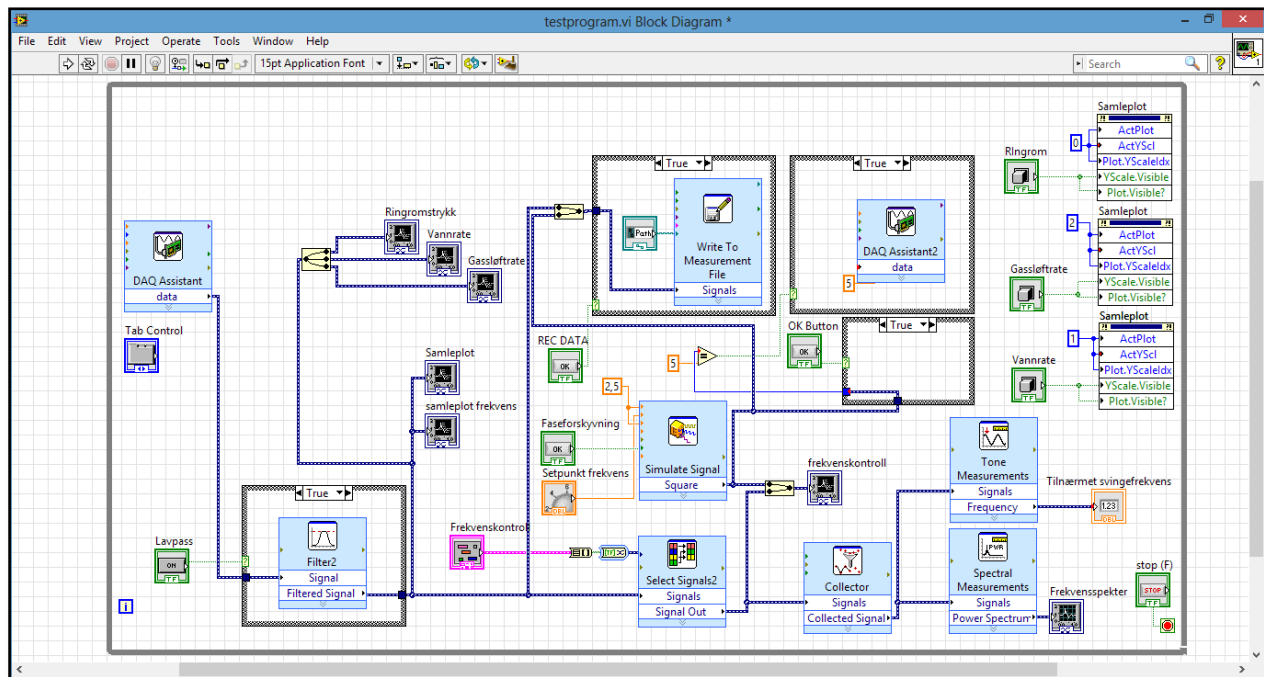


Figur B-2: Frontpanel for frekvenskontroller

B.1.2 Blokkdiagrammet til måleprogrammet

Blokkdiagrammet gir alle komponentene i frontpanelet en funksjon. Blokkdiagrammet er vist i Figur B-3. Alle komponentene i blokkdiagrammet er plassert i en *While løkke*. Løkken løper helt frem til stoppknappen i frontpanelet trykkes. For hver iterasjon utføres en datainnsamling, en simulering av et firkantsignal, en samling av måledata, en spektralanalyse og plotting. Samtidig sjekkes fire *IF løkker*. Om IF løkkene er sanne utføres en ventilavstengning basert på en satt

frekvens, en filtrering av måledataene og en lagring av måledataene.

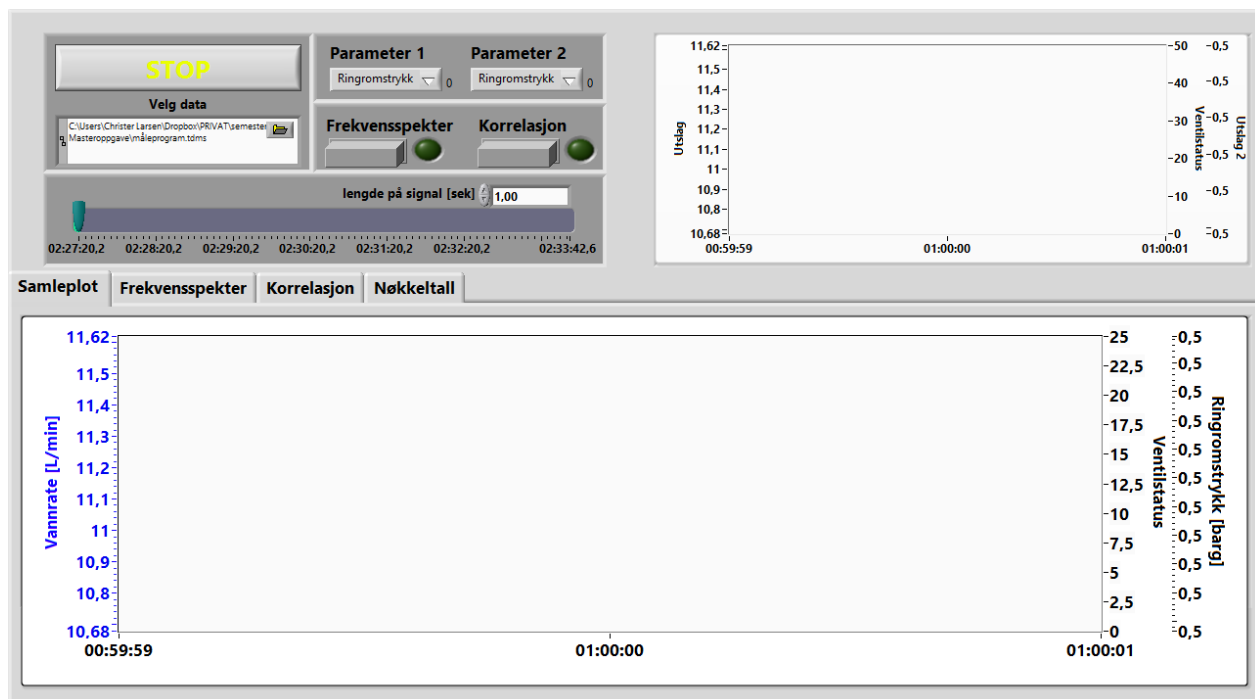


Figur B-3: Blokkdiagram av måleprogrammet

B.2 Analyseprogram

B.2.1 Frontpanelet til analyseprogrammet

Etter at målingene er tatt benyttes analyseprogrammet. Analyseprogrammets funksjon er å grafisk fremvise måledataene, samt utføre forskjellige matematiske operasjoner på et valgt område. Frontpanelet til analyseprogrammet er vist i Figur B-4. Frontpanelet består av en fil-velger, hvor filen til de ønskede måledataene blir valgt og lastet inn i programmet. Når filen er lastet inn velges hvilke av parameterne som skal analyseres med en rullegardinmeny. Det kan maksimalt velges to parametere samtidig. Øverst til høyere vises det et plot av begge parameterne over hele måleperioden. Det er lagt til en tidsakse hvor minimumsverdien til tidsaksen er tidspunktet hvor målingene i filen startet, og maksimumsverdien er tidspunktet hvor målingene i filen ble avsluttet. Det er en tidsvelger på tidsaksen som indikerer startverdien til utsnittet som skal analyseres, og en boks hvor lengden på utsnittet kan varieres. Lengden som tastes inn er målt i sekunder. Funksjonen til tidsaksen og lengdevelgeren er å kunne ta ut et utsnitt av målepunktene til de valgte parameterne, og deretter gjøre en analyse på utsnittet.



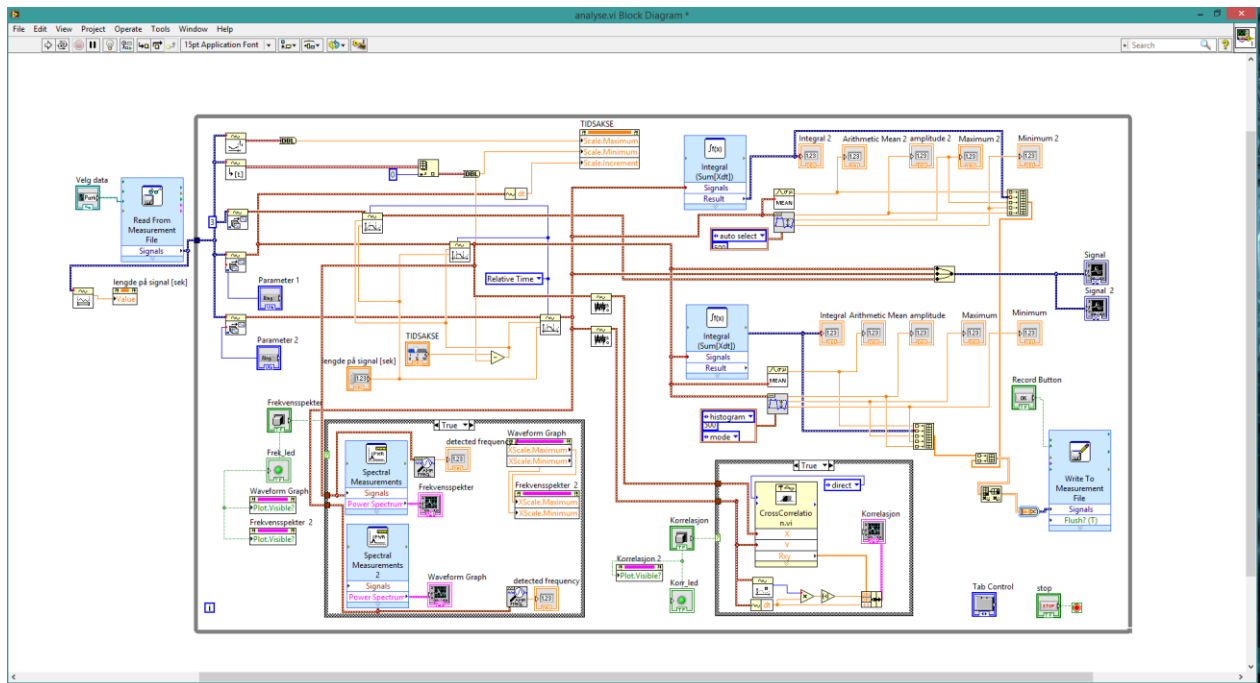
Figur B-4: Frontpanelet til analyseprogrammet

Den nedre delen av frontpanelet består av fire sidetabulatorene. Tabulatorene viser resultatet av analysen som gjøres på de valgte parameterne. Den første tabulatoren, «Samleplot», består av et plot av utsnittet til de to valgte parameterne. I tillegg har plottet en visning av ventilstatusen til ventilen som reguleres under de eksperimentelle forsøkene. Den andre tabulatoren har et plot av frekvensspekteret til utsnittet av begge parameterne. Det er også lagt til en toneekstraktor som finner den dominerende frekvensen til utsnitt som vises i en numerisk indikator. Den tredje tabulatoren består av en korrelasjon av utsnittet til de to parameterne. Siden denne tabulatoren ikke blir benyttet, vil det ikke bli gitt en nærmere beskrivelse av hva korrelasjonen gjør. Den siste tabulatoren, «Nøkkeltall», beregner den aritmetiske middelveiden, amplituden, maksimum og minimumsutslag og integralet på utsnittet. Beregningene gjøres på begge parameterne som er valgt. Verdiene er gitt i en numerisk indikator. I tillegg er det lagt inn en funksjon som kopierer verdiene når en knapp trykkes, og skriver de inn i en Excel fil. Denne funksjonen er laget for enkelt å kunne sammenligne tall som er hentet ut på forskjellige tidspunkt.

B.2.2 Blokkdiagrammet til analyseprogrammet

Slik som i måleprogrammet, er funksjonene i analyseprogrammet plassert i en while løkke. Løkken løper frem til stoppknappen i frontpanelet trykkes inn. Programmet starter med å hente

inn i filen som er valgt til analyse. Når signalene sendes videre blir signalenes lengde hentet ut, og tidsaksen blir tildelt en minimum- og maksimumsverdi. Samtidig blir parameterne som er valgt i rullegardinmenyene hentet ut av signalene. Hver av parameterne føres videre inn i funksjonen som henter ut et utsnitt. Utsnittet blir bestemt av posisjonen til pekeren på tidsaksen, og den inntastede lengden. Utsnittet blir analysert fortløpende ved hjelp av innebygde funksjoner. Verdiene skrives inn i de numeriske indikatorene, og plottet vises i grafen. En innebygd funksjon, som henter ut de numeriske verdiene, aktiveres ved hjelp av en logisk operator, og skriver verdiene inn i en Excel-fil på ønsket tidspunkt. Om posisjonen til pekeren, lengden på signalet eller parametervalget endres starter en ny iterasjon i while-løkken.



Figur B-5: Blokkdiagrammet til analyseprogrammet