



# Høgskulen på Vestlandet

## Bacheloroppgave Elektro

ING3055

### Predefinert informasjon

<b>Startdato:</b>	30-04-2018 20:28	<b>Termin:</b>	2018 VÅR
<b>Slutt dato:</b>	09-05-2018 12:00	<b>Vurderingsform:</b>	Norsk 6-trinns skala (A-F)
<b>Eksamensform:</b>	Bacheloroppgave Elektro med muntlig presentasjon/eksaminasjon		
<b>SIS-kode:</b>	203 ING3055 1 BOPPG 2018 VÅR		
<b>Intern sensor:</b>	(Anonymisert)		

### Deltaker

<b>Navn:</b>	Håvard Nordhus Kråkenes
<b>Kandidatnr.:</b>	1
<b>HVL-id:</b>	136928@hvl.no

### Informasjon fra deltaker

<b>Tittel *:</b>	Antisurge regulering for sentrifugalkompressorer		
<b>Tro- og loverklæring *:</b>	Ja	<b>Inneholder besvarelsen konfidensiell materiale?:</b>	Nei
<b>Jeg bekrefter at jeg har registrert oppgavetittelen på norsk og engelsk i StudentWeb og vet at denne vil stå på vitnemålet mitt *:</b>	Ja		

### Gruppe

<b>Gruppenavn:</b>	EL2
<b>Gruppenummer:</b>	2
<b>Andre medlemmer i gruppen:</b>	Andreas Lund Rasmussen

Jeg godkjenner avtalen om publisering av bacheloroppgaven min \*

Ja

# Antisurge regulering for sentrifugalkompressorer

*Bacheloroppgaven er utført for Statoil ASA*

*Haugesund, våren 2018*



**Av:**

*Andreas Lund Rasmussen*

*Håvard Nordhus Kråkenes*

**Veiledere:**

*Harald Spångberg, Høgskulen på Vestlandet*

*Olav Stene, Statoil ASA*

# BACHELORPROSJEKT

**Studenten(e)s navn:** Håvard Nordhus Kråkenes og Andreas Lund Rasmussen

---

**Linje & studieretning** Bachelor i ingeniørfag Elektro

**Oppgavens tittel:** *Antisurge regulering for sentrifugalkompressorer*

**Oppgavetekst:**

- Beskrivelse av sentrifugalkompressoren
  - o Kompresorkart
  - o Polytropisk head og volumetrisk strømning
  - o Surge
  - o Choke
- Beskrivelse av Anti-surgeregulering
- CCC anti-surge regulator
  - Prosessering av inputsignaler, Surgelinjen i UPC format, Surgelinjen i CCC format, Avstand til surge, Beregning av surgelinje, Beregning av kontrollinje, Sikkerhetsmarginen til surgelinjen i CCC format, Avviket fra kontrollinjen i CCC format, Moduser
- Omregning mellom forskjellige kompresorkart-formater
  - o Utfordring med forskjellige formater
  - o Lage program I Matlab for beregning av surge og kontrollinje for anti-surge regulator vha. Kompresorkart og datablad fra produsent. Skal også inneholde en HMI

**Endelig oppgave gitt:** 2. mars 2018

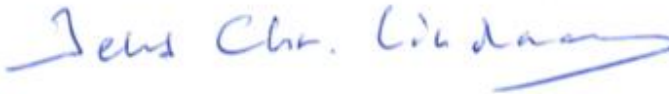
**Innleveringsfrist:** Onsdag 9.mai 2018 kl. 12.00

**ntern veileder:** Harald Spångberg

**Ekstern veileder:** Olav Stene

**Adresse ekstern veileder:** Sandsliveien 90, 5254 Sandslå

**Godkjent av  
studieansvarlig:  
Dato:**

  
19/4 - 18

Oppgavens tittel: Antisurge regulering for sentrifugalkompressorer		Rapportnummer:
Utført av: Håvard Nordhus Kråkenes Andreas Lund Rasmussen		
Linje: Elektro ingeniør	Studieretning: Elektro ingeniør med fordypning i industriell automatisering	
Gradering: Åpen	Innlevert dato:	Veiledere: Harald Spångberg, HVL Olav Stene, Statoil ASA

### Ekstrakt

Sentrifugalkompressorene i oljeindustrien beskyttes av et antisurge system som hindrer kompressoren å havne i surge. Denne tilstanden kan være så skadelig for kompressoren at den kan havarere. For å kunne justere inn antisurge regulatoren riktig kreves det kjennskap til en del teori som beskrevet i rapporten. Det er laget en applikasjon i Matlab som digitaliserer beregningen av parameterne som brukes i antisurge regulatorer.

## Forord

Vi er en gruppe på to deltidsstudenter ved Høgskulen på Vestlandet – Stord / Haugesund som studerer elektroingeniør Y-vei. Vi har begge jobbet fulltidsstillinger hos Statoil ved siden av studiene i de fire årene som snart har gått. Det har vært tøft å kombinere jobb og studier, men vi er begge overbevist om at jobberfaringen har gitt oss en bedre forståelse for studiet.

Vi ønsker å takke veilederne våre Olav Stene og Harald Spångberg for et godt og produktivt samarbeid. Også takk til Lars Arne Aga, Åsmund Våge Fannemel, Bjørnar Birkelund og Gerardus Johannes de Boer for informasjonen og kunnskapen dere har delt med oss. Vi vil også takke våre nærmeste ledere gjennom denne arbeidsperioden for at de har tilrettelagt der det har vært behov. Til slutt vil vi takke venner, familie og samboer for tålmodigheten gjennom studiene.

Haugesund 09. mai 2018



---

Andreas Lund Rasmussen



---

Håvard Nordhus Kråkenes

# Sammendrag

Sentrifugalkompressorene som er installert på Statoil sine offshore- og onshore anlegg beskyttes av et antisurge system som hindrer kompressoren å havne i surge. Denne tilstanden kan være så skadelig for kompressoren at den kan havarere. Sentrifugalkompressoren beskyttes ved en omløpsventil som er plassert parallelt med kompressoren. Omløpsventilen åpner når kompressorens operasjonspunkt nærmer seg surgegrensen. Dette gjøres ved kommando fra regulatoren, basert på måleverdien fra ulike transmittere.

Oppgaven har fokusert på å lage en applikasjon i Matlab som digitaliserer beregningen av parameterne som brukes i antisurge regulatorer. Applikasjonens hovedoppgave har vært å gjøre beregninger for førstegangs oppsett av en antisurge regulator, men applikasjonen har fått noe utvidet funksjonalitet. For å kunne justere inn regulatoren riktig kreves det kjennskap til blant annet termodynamikk, signalbehandling og beregninger mellom de ulike formatene som leverandøren av kompressoren og regulatoren bruker. Algoritmene som brukes i antisurge regulatorer tar utgangspunktet i uttrykk for kompressorens løftehøyde, samt gjennomstrømningen gjennom kompressoren. God forståelse for kompressorens løftehøyde og strømmingen gjennom kompressoren har dermed vært viktig og grunnleggende for å kunne forstå algoritmene som brukes i regulatoren.

# Summary

Centrifugal compressors in Statoil's offshore- and onshore installations is protected by an antisurge system that prevents the compressor from surging. A surge can damage the compressor critically. The centrifugal compressor is protected by a bypass valve that is installed in parallel with the compressor. The valve begins to open when the operational point is to close to the surge limit. The valve gets its setpoint from the controller, based on the measurement from transmitters.

The focus in this thesis has been to make an application in Matlab that digitalize calculations of parameters used in the antisurge controllers. The main goal of the application is to do calculations for first time adjustment of the controller, but other functions has also been implemented. To adjust the controller properly, it is necessary to have knowledge about thermodynamics, signal processing, and calculations between the different formats the compressor and controller suppliers use. The algorithm in the antisurge controller is based on a formula for polytropic head and flow. It is therefore important to understand the formula for polytropic head and flow through the compressor to understand the algorithm that is being used in the controller.



# Innholdsfortegnelse

Forord.....	1
Sammendrag .....	2
Summary .....	3
Tabeller og figurer .....	6
Forkortelser og begrep .....	8
1. Innledning .....	11
1.1. Bakgrunn.....	11
1.2. Oppgaven og dens formål .....	11
2. Sentrifugalkompressoren .....	12
2.1. Beskrivelse av sentrifugalkompressoren.....	12
2.2. Kompressorkart.....	15
2.3. Surge .....	17
2.4. Stall .....	18
2.5. Kompressorens løftehøyde.....	19
2.5.1. Isentropisk løftehøyde.....	20
2.5.2. Virkelig løftehøyde .....	21
2.5.3. Polytropisk løftehøyde og virkningsgrad.....	23
2.6. Volumetrisk strømning .....	24
3. Antisurge regulering .....	26
4. Antisurge regulatoren.....	28
4.1. Prosessering av inputsignaler.....	28
4.1.1. Redusert polytropisk løftehøyde .....	29
4.1.2. Redusert volumstrøm.....	29
4.1.3. Polytropeksponenten i CCC format .....	30
4.2. Surgelinjen i UPC format.....	31
4.3. Surgelinjen i CCC format .....	33
4.4. Avstand til surge i CCC format .....	35
4.5. Beregning av surgelinjen i CCC format.....	38
4.6. Surge kontroll margin i CCC format .....	40
4.6.1. Beregning av surge kontroll marginen, SKM .....	41
4.6.2. Valg av flow sikkerhetsmargin .....	42
4.6.3. Beregning av den initielle sikkerhetsmarginen, b1 .....	43

4.7. Avstand til kontrollinjen i CCC format .....	44
4.8. Avviket fra kontrollinjen i CCC format.....	45
4.9. fA modus.....	46
4.9.1. $f_5(U_5)$ , «General Characterizer».....	47
4.9.2. $f_3(N)$ , «X-Coordinate Characterizer».....	48
4.9.3. fA modus 31.....	48
4.9.4. fA modus 61.....	49
4.9.5. fA modus 51.....	51
4.9.6. fA modus 68.....	53
4.9.7. $f_2(R_c)$ , «Reported Flow Characterizer».....	54
4.9.8. $f_4(U_4)$ , «Control Line Characterizer».....	54
4.10. fD mode .....	55
5. Omregning mellom formater .....	56
5.1. Utfordring med forskjellige formater.....	56
5.2. Digitalisering av kompressorkart gitt av leverandør.....	56
5.3. Prosessering av analoge inngangssignaler .....	58
5.3.1. Analog til digital variabel .....	58
5.3.2. Transmittertesting .....	58
5.3.3. Signal variabel, SV .....	58
5.3.4. Prosess variabel, PV.....	59
5.3.5. Gain og Bias.....	59
6. Produkt.....	60
6.1. Matlab program.....	60
6.1.1. Regulator og transmitter verdier .....	60
6.1.2. Kompressorkart.....	61
6.1.3. Input til regulator .....	62
6.1.4. Beregninger.....	64
6.1.5. Simulering.....	65
6.2. Matlab App Designer.....	66
6.3. Matlab kode .....	68
7. Konklusjon.....	72
Referanser .....	73

# Tabeller og figurer

Figur 1: Snittegning av sentrifugalkompressor skjematikk (Hanlon, 2001, s. 58) .....	12
Figur 2: Innløpsvolutt (Hanlon, 2001, s. 59) .....	13
Figur 3: kompressjonstrinn (Hanlon, 2001, s. 60) .....	13
Figur 4: Utløps volutt (Hanlon, 2001, s. 61).....	13
Figur 5: utløpsvolutt sett fra siden (Hanlon, 2001, s. 61) .....	13
Figur 6: innsiden av en sentrifugalkompressor på statoil, sandsli .....	14
Figur 7: Kompresorkart (Dresser-Rand - Kvitebjørn Pre-Compression Project).....	15
Figur 8: prosessmotstand i kompresorkart (CCC, 2013, s. 2) .....	16
Figur 9: surgesyklus (CCC, 2013, s. 3).....	17
Figur 10: sammenligning mellom isentropisk og polytropisk løftehøyde .....	19
Figur 11: Entalpiøking over en kompressor.....	22
Figur 12: Antisurge system (General Electric Oil & Gas, 2008, p. 309).....	26
Figur 13: Prosessmotstandens påvirkning på operasjonspunktet (CCC, 2010, s. 34).....	27
Figur 14: Gasskomposisjonens påvirkning på surgelinjen (CCC, 2010, s. 33).....	28
Figur 15: Surgelinje i UPC format.....	32
Figur 16: Surgelinje i CCC format.....	34
Figur 17: Problematikk ved måling av avstand til surge .....	35
Figur 18: Bruk av den inverse funksjonen av surgelinjen løser problematikken med å måle avstand til surge. ....	36
Figur 19: Måling av avstand til surge .....	36
Figur 20: ti valgte punkter på surgelinjen .....	38
Figur 21: Kontrollinjen ved valgt sikkerhetsmargin.....	40
Figur 22: Flow sikkerhetsmargin (Total Train Control, s. 2) .....	42
Figur 23: Instrumentering og kompresorkart ved fA modus 31 (CCC, 2005, s. 158) .....	49
Figur 24: Instrumentering og kompresorkart ved fA61 (CCC, 2005, s. 176) .....	50
Figur 25: Instrumentering som brukes ved fA modus 51 (CCC, 2005, s. 173).....	52
Figur 26: Instrumentering som brukes ved fA modus 68 (CCC, 2005, s. 189).....	54
Figur 27: Skjermbildet fra Pointpicker programmet (Lars Arne Aga, Statoil).....	57
Figur 28: analog til digital prosessering (CCC, 2005, s. 38) .....	58
Figur 29: Skjermbildet fra fanen som inneholder regulator- og transmitterverdier.....	60
Figur 30: Verdier fra kompresorkartet og kompressoratabladet .....	61
Figur 31: Beregnede verdier som brukes som input i regulatoren.....	62
Figur 32: Excel rapport .....	63
Figur 33: Visning av alle beregninger og verdier .....	64
Figur 34: Side for simulering ved et bestemt operasjonspunkt.....	65
Figur 35: Matlab 2018 App Designer .....	66
Figur 36: Matlab 2018 App Designer .....	67
Figur 37: Kode for valg av akser på siden «Kompresorkart» .....	68
Figur 38: Kode for beregning av mbar og utløpstrykk .....	69
Figur 39: Kode for beregning av f1 ved fA modus 61.....	70
Figur 40: Kode for å simulere arbeidspunkt i grafen på «Simulering» siden .....	71

Tabell 1: Oversikt over de forskjellige fA modusene (CCC, 2005, s. 151)

46

# Forkortelser og begrep

A/D: analog til digital

b: den totale sikkerhetsmarginen i CCC format

$b_1$ : den initielle sikkerhetsmarginen i CCC format

$CR_{so}$ : safety on response

$CR_D$ : derivative response

$C_1$ : hastighet i punktet 1 [m/s]

$C_2$ : hastighet i punktet 2 [m/s]

DEV: Avvik fra kontrollinjen i CCC format

$E_{pot,1}$ : potensiell energi i punktet 1 [m/s]

$E_{pot,2}$ : potensiell energi i punktet 2 [m/s]

$f_1(R_c)$ : «Y-Coordinate Characterizer»

$f_{1,fA31}(R_c)$ : surgelinjens verdi ved operasjonspunktet, fA modus 31

$f_{1,fA51}(R_c)$ : surgelinjens verdi ved operasjonspunktet, fA modus 51

$f_{1,fA61}(R_c)$ : surgelinjens verdi ved operasjonspunktet, fA modus 61

$f_{1,fA68}[h_{redusert} \cdot f_3(0)]$ : surgelinjens verdi ved operasjonspunktet, fA modus 68

$f_2(R_c)$ : «Reported Flow Characterizer»

$f_3(N)$ : «X-Coordinate Characterizer»

$f_3(0)$ : første punktet til «X-Coordinate Characterizer»

$f_4(U_4)$ : «Control Line Characterizer»

$f_5(U_5)$ : «General Characterizer»

g: tyngdeakselerasjon [m/s<sup>2</sup>]

$H_1$ : spesifikk entalpi ved punktet 1 [kJ/kg]

$H_2$ : spesifikk entalpi ved punktet 2 [kJ/kg]

$\Delta H_p$ : polytropisk løftehøyde [kJ/kg]

$\Delta H_{is}$ : isentropisk løftehøyde) [kJ/kg]

$\Delta H_{virkelig}$ : virkelig isentropisk løftehøyde [kJ/kg]

$h_{p,redusert}$ : redusert polytropisk løftehøyde

J: energiforbruk

$J_{redusert}$ : redusert energiforbruk

$J_{tilført}$ : tilført energi

$J_{virkelig}$ : virkelig energiforbruk

$J_{\text{virkelig, redusert}}$ : redusert virkelig energiforbruk  
 $K_m$ : måleblendekonstanten  
 $K$ : konstant som justerer verdien til  $S_s$   
 $k$ : isotropeksponenten (adiabateksponenten)  
 $M$ : molvekt [kg/kmol]  
 $\dot{m}$ : massestrøm [kg/s]  
 $\dot{m}_i$ : massestrøm ved innløpet [kg/s]  
 $n$ : polytropeksponenten  
 $N$ : turtall  
 $P$ : trykk [barg]  
 $P_i$ : trykk ved innløpet [barg]  
 $P_u$ : trykk ved utløpet [barg]  
 $P_s$ : trykk ved innløpet på forrige kompressor seksjon [barg]  
 $P_{ss}$ : trykk ved sidestrømmen [barg]  
 $PV$ : prosess variabel  
 $\Delta P_k$ : differensialtrykk over kompressor.  
 $\Delta P_m$ : differensialtrykk over måleblende  
 $\Delta P_{m,i}$ : differensialtrykk over måleblende plassert ved innløpet  
 $\Delta P_{m,u}$ : differensialtrykk over måleblende plassert ved utløpet  
 $\Delta P_{m,ss}$ : differensialtrykk over måleblende plassert ved sidestrømmen.  
 $\Delta P_{m,ek}$ : differensialtrykk over måleblende plassert nedstrøms en etterkjøler.  
 $Q_{\text{kontrollinje}}$ : strømningsverdien til kontrollinjen  
 $Q_{\text{margin \%}}$ : flowmargin prosent mellom surge- og kontrollinjen  
 $Q_{\text{surgelinje}}$ : strømningsverdien til surgelinjen  
 $Q_i$ : volumstrøm ved innløpet [m<sup>3</sup>/s]  
 $q_{i, \text{redusert}}$ : redusert volumstrømning ved innløpet  
 $\dot{Q}$ : varmestrøm [kJ/s]  
 $R_c$ : kompresjonsforholdet ( $P_u/P_i$ )  
 $R$ : spesifikke gasskonstanten [kJ/kg·K]  
 $\tilde{R}$ : universelle gasskonstanten [kJ/kmol·K]  
 $S$ : avstand til kontrollinjen i CCC format  
 $S_s$ : avstand til surge i CCC format  
 $S_{s, fA31}$ : avstand til surge ved fA modus 31

$S_{s,fA51}$ : avstand til surge ved fA modus 51  
 $S_{s,fA61}$ : avstand til surge ved fA modus 61  
 $S_{s,fA68}$ : avstand til surge ved fA modus 68  
SKM: surge kontroll margin i CCC format  
SV: signal variabel  
 $T_i$ : temperatur ved innløpet [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $T_u$ : temperatur ved utløpet [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $T_{u,s}$ : isentropisk utløpstemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $T_{ek}$ : temperatur på kjøler nedstrøms kompressor [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $v_i$ : spesifikt volum ved innløpet [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]  
 $v$ : spesifikt volum [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]  
 $V_i$ : volum gass ved innløpet [ $\text{m}^3$ ]  
 $V_u$ : volum gass ved utløpet [ $\text{m}^3$ ]  
 $W_p$ : arbeid ved polytropisk prosess [kJ]  
 $W_{is}$ : arbeid ved isentropisk prosess [kJ]  
 $\dot{W}$ : effekt [kJ/s]  
 $\dot{W}_{is}$ : isentropisk effekt [kJ/s]  
 $\Delta X_{\text{surgelinjen}}$ : avstand fra origo til surgelinjens x-verdi  
 $\Delta X_{\text{kontrollinjen}}$ : avstand fra origo til kontrollinjens x-verdi  
 $\Delta X_{\text{operasjonspunkt}}$ : avstand fra origo til operasjonspunktets x-verdi  
 $\Delta Y_{\text{surgelinjen}}$ : avstand fra origo til surgelinjens y-verdi  
 $\Delta Y_{\text{kontrollinjen}}$ : avstand fra origo til kontrollinjens y-verdi  
 $\Delta Y_{\text{operasjonspunkt}}$ : avstand fra origo til operasjonspunktets y-verdi  
 $\bar{Z}$ : gassens gjennomsnittlige kompressibilitet  
 $Z_i$ : gassens kompressibilitet ved innløpet  
 $\eta_p$ : polytropisk effektivitet  
 $\sigma$ : polytropekspONENTEN i CCC format  
 $\rho_i$ : egenvekt ved innløpet

# 1. Innledning

## 1.1. Bakgrunn

Sentrifugalkompressorene som er installert på Statoil sine offshore- og onshore anlegg beskyttes av et antisurge system som hindrer kompressoren å havne i surge tilstand. Denne tilstanden er så skadelig for kompressoren at den kan havarere. Det krever spesialkompetanse for å beregne parameterne som brukes i regulatoren som beskytter kompressoren. Når en sentrifugalkompressor installeres i Nordsjøen så er det normalt at leverandøren av regulatoren beregner nødvendige parametere og justerer regulatoren inn. Dersom regulatoren må justeres inn i etterkant utføres dette av Statoil sine ingeniører. Det kan ta lang tid mellom hver gang en ingeniør i Statoil utfører disse beregningene. Det er i tillegg tidskrevende å utføre slike komplekse beregninger. Det er også en utfordring å vite om kompressoren opererer for nært surge tilstanden i etterkant.

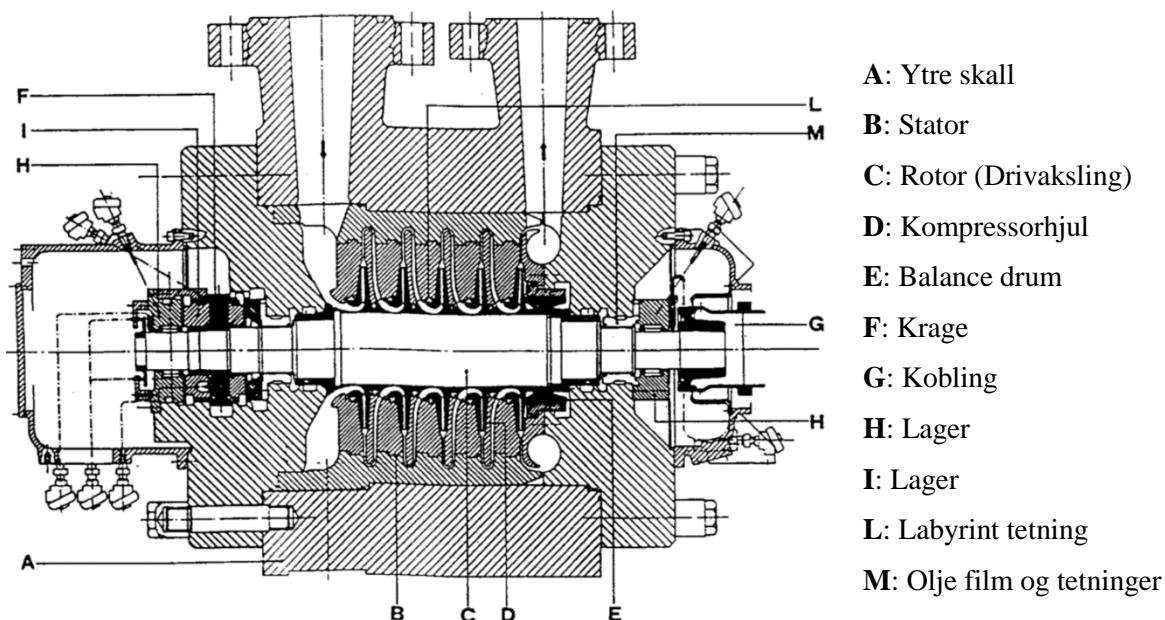
## 1.2. Oppgaven og dens formål

Hovedfokuset i denne oppgaven har vært å lage en applikasjon i Matlab som digitaliserer beregningene av parameterne som brukes i antisurge regulatorer. Formålet er å effektivisere og forenkle hverdagen til ingeniørene i Statoil. For å øke sannsynligheten til at programmet vil bli brukt av ingeniører i Statoil så har gruppen lagt stor vekt på brukervennlighet og tilbakemeldinger fra flere av ingeniørene i selskapet. Rapporten beskriver generell teori om termodynamikk og kompressorer, men også beregningene som gjøres av applikasjonen og algoritmene i CCC regulatoren. Fordi hver leverandør av antisurge regulatorer bruker forskjellige algoritmer i regulatorene sine, så vil også beregningene av parameterne også være forskjellig. Bacheloroppgaven fokuserer kun på Compressor Controls Corporation (CCC) som leverandør av antisurge regulatorer. Det vil være et eget kapittel som forklarer appen som er laget i Matlab.



## 2. Sentrifugalkompressoren

### 2.1. Beskrivelse av sentrifugalkompressoren

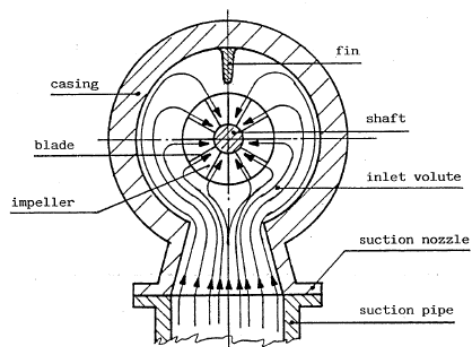


**FIGUR 1: SNITTEGNING AV SENTRIFUGALKOMPRESSOR SKJEMATIKK (HANLON, 2001, s. 58)**

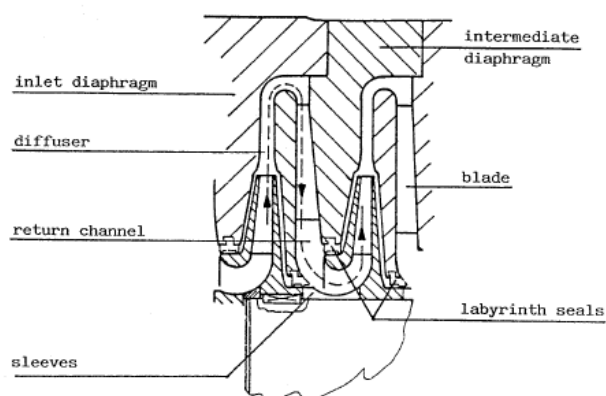
Figur 1 viser en snittegning av en sentrifugalkompressor. En sentrifugalkompressor brukes for å transportere gass ved å øke trykket og kan betraktes som en termisk arbeidsmaskin. Den har en kontinuerlig gjennomstrømming av gass som mottar energi fra kompressorhjulene. Energien blir transformert til trykk, delvis over impelleren i kompressorhjulet, og delvis gjennom diffusoren som er den statiske delen mellom kompressorhjulene. Figur 2 viser en snittegning over alle komponentene i kompresjonstrinnene.

Mekanisk energi konverteres til energi som lagres i gassen som blir prosessert. Etter innløpet til sentrifugalkompressoren går gass strømmingen gjennom en innsnevring og inn i en innløpsvolutt (innløpskammer) som vist i Figur 2. Gassen strømmer uniformt og radielt fra alle retninger inn mot senter av kammeret før det når impellerne vist i Figur 3. På motsatt side av innløpet til kammeret er det en finne som forhindrer virvlinger i gassen.

Impellerne består av to plater (en plate og en krage) som henger sammen med blader som igjen er festet til rotoren. Gassen strømmer inn i de roterende impellerne som kaster gassen ut til sidene ved hjelp av sentrifugalkrefter. Dette gjør at gassen får høyere hastighet og trykk.

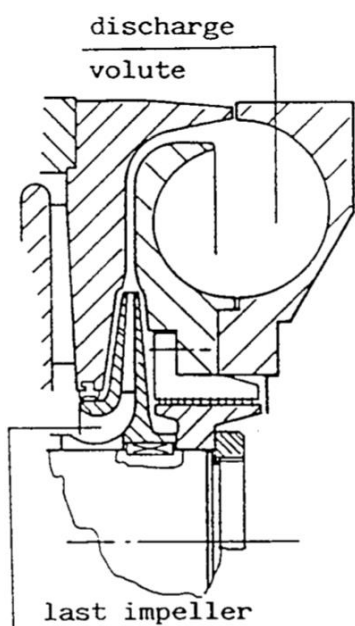


FIGUR 2: INNLØPSVOLUTT (HANLON, 2001, s. 59)

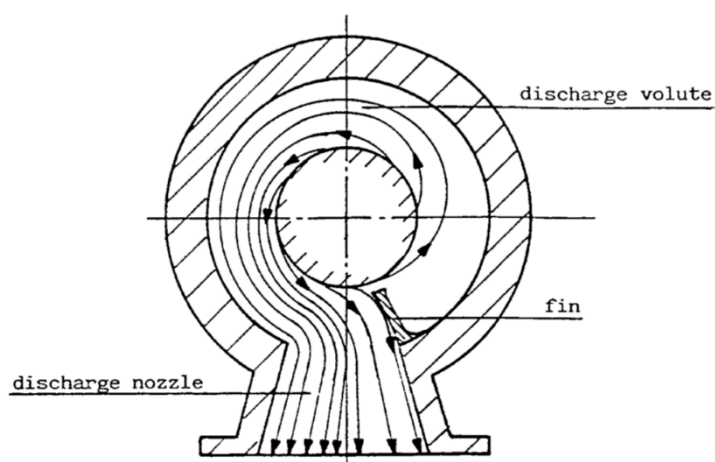


FIGUR 3: KOMPRESSJONSTRINN (HANLON, 2001, s. 60)

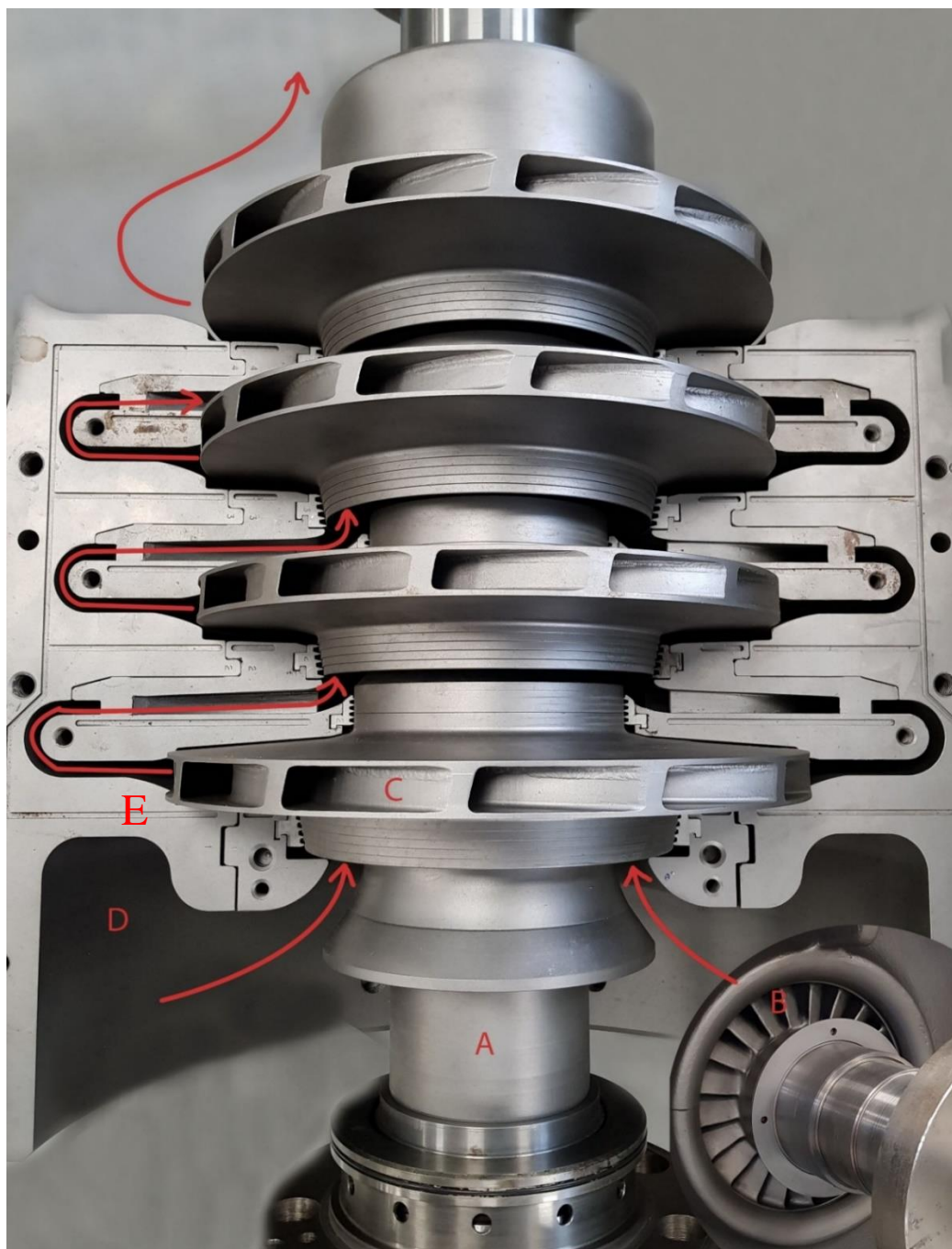
Etter at gassen har gått gjennom siste impeller går gassen gjennom en utløpsvolutt. Utløpsvolutten er et spiralformet kammer som reduserer hastigheten på gassen slik at trykket øker. Til slutt når gassen utløpsdysen på kompressoren og fortsetter i systemet nedstrøms kompressoren (Hanlon, 2001, ss. 57-62).



FIGUR 4: UTLØPS VOLUTT (HANLON, 2001, s. 61)



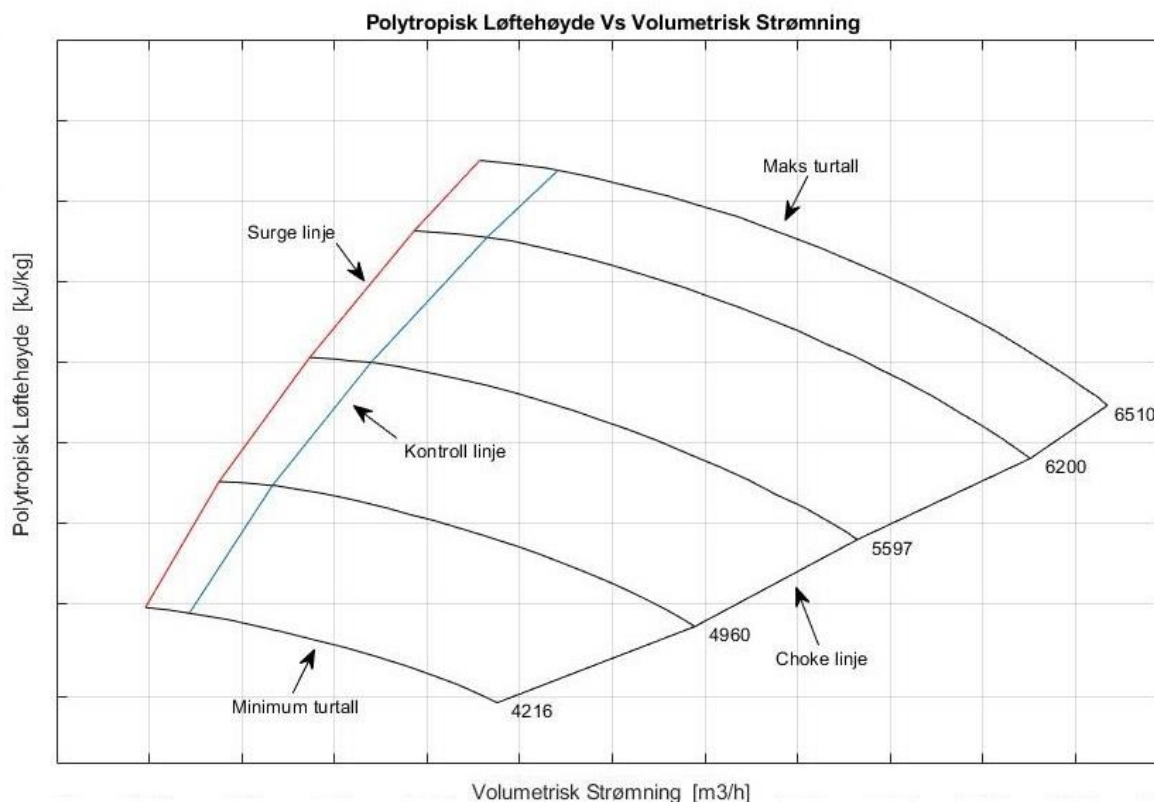
FIGUR 5: UTLØPSVOLUTT SETT FRA SIDEN (HANLON, 2001, s. 61)



FIGUR 6: INNSIDEN AV EN SENTRIFUGALKOMPRESSOR PÅ STATOIL, SANDSLI

- A – Rotor (drivaksling)
- B – Kompressorhjul / impeller
- C – Kompressorhjul / impeller
- D – Innløpsvolutt (spiral hus)
- E – Diffusor

## 2.2. Kompressorkart

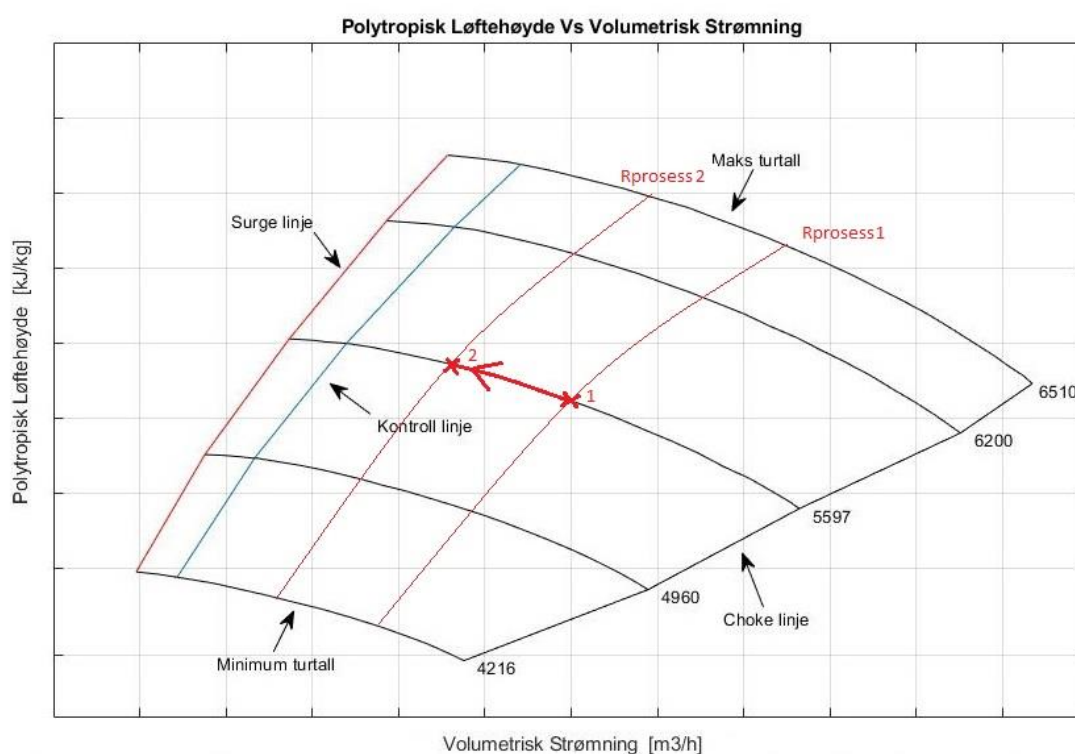


**FIGUR 7: KOMPRESSORKART (DRESSER-RAND - KVITEBJØRN PRE-COMPRESSION PROJECT)**

Kompressorkartet leveres av kompressorleverandøren. Kompressorkartet viser karaktistikken og arbeidsområdet til kompressoren. Det er vanlig at x-aksen er volumetrisk strømning mens y-aksen er polytropisk løftehøyde (CCC, 2013, ss. 1-2). Så lenge kompressoren opererer innenfor grensene vist i figur 7, så unngås ustabilitet, skader og havari. For å oppnå best mulig virkningsgrad på en kompressor er det ideelt å regulere så tett opp mot surge linjen som mulig uten å krysse den. For å redusere sannsynligheten for surge så er det en sikkerhetsmargin mellom surge- og kontroll linjen som gir mer stabil drift på bekostning av virkningsgrad.

En sentrifugalkompressor kan enten ha variabelt eller fast turtall. Dersom kompressoren opererer med variabelt turtall kan en VSD (variabel speed drive) regulere pådraget til kompressoren for å opprettholde et ønsket utløpstrykk ved varierende prosessmotstand. Turtallet varierer som et resultat av endring i pådraget. Dersom sentrifugalkompressoren opererer med fast turtall kan innløpstrykket reguleres med en reguleringsventil oppstrøms kompressoren. I begge tilfeller så kan innløpstrykket til kompressoren reguleres ved å endre trykket i separatorene oppstrøms kompressoren, men dette har sine begrensninger. Hovedoppgaven for en separator i olje- og gassindustrien er å skille olje, vann og gass.

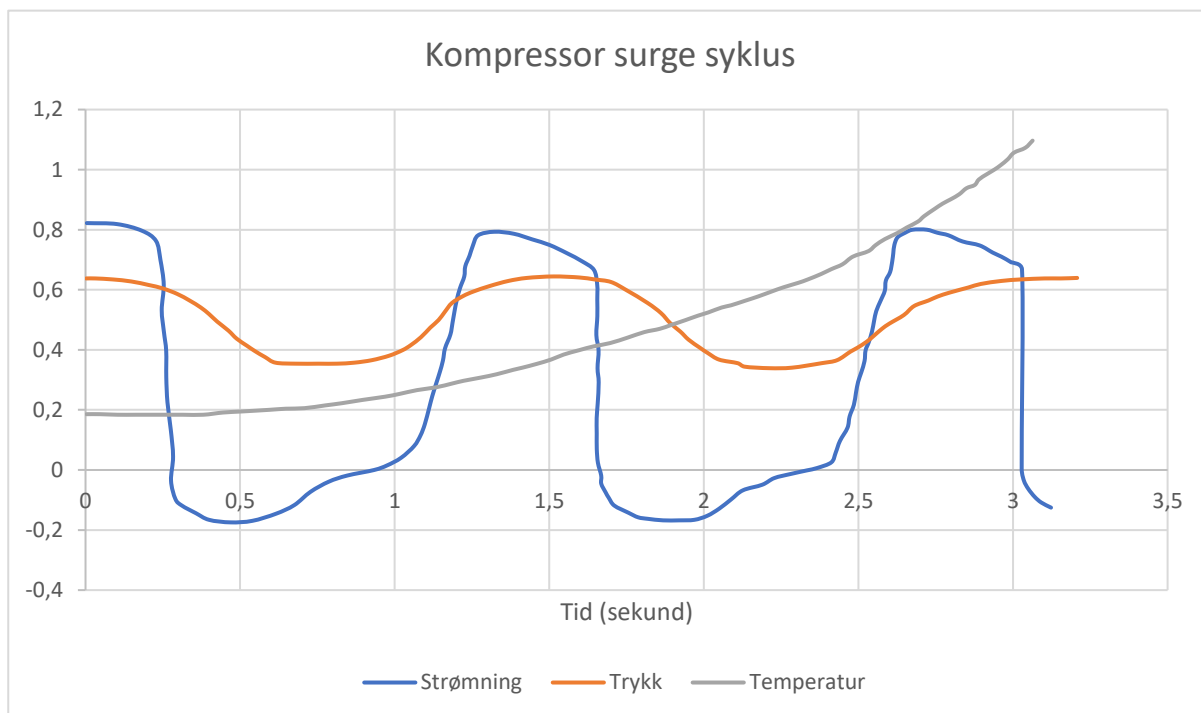
Dersom kompressoren opererer ved et fast turtall så kan en endring i prosessmotstand gjør at operasjonspunktet beveger seg langs denne valgte turtallskurven mot choke- eller surgegrensen som illustrert i Figur 8 (CCC, 2013, ss. 1-2). Hva som gjør at prosessmotstanden endres beskrives i større detalj i kapittel 2.3.



**FIGUR 8: PROSESSMOTSTAND I KOMPRESSORKART (CCC, 2013, s. 2)**

## 2.3. Surge

Surge oppstår når energien i gassen som komprimeres blir høyere enn tilført energi fra kompressorbladene på impelleren er designet for. Da oppstår det store vibrasjoner og rask temperaturøkning. Gassen vil ekspandere raskt og strømningsraten gjennom kompressoren endres med høy frekvens. Ytterste konsekvens av surge er at akslingen, lagre og tetninger havarer innen kort tid (CCC, 2013, ss. 3-4).



**FIGUR 9: SURGESYKLUS (CCC, 2013, s. 3)**

Ved en mild surge vil trykket og strømmingen oscillere, men strømmingen vil ikke skifte retning. En dyp surge gir en høyere amplitude på trykk- og strømningsvariasjonene og vil ha en høyere frekvens enn ved mild surge. (Olav Stene, 2012, ss. 10-12)

Det er normalt at gassen til skifte strømningsretning hver 20 til 50 millisekunder med sykluser på 0.3 til 3 sekunder ved dyp surge (CCC, 2010, ss. 26-27). Dette er illustrert i Figur 9 der negativ strømning indikerer reversert strømning.

Det kan også oppstå problemer i omliggende prosess grunnet svingningene som oppstår ved surge. Det kan være mange ting som gjør kompressor systemet ustabil, men noen årsaker kan blant annet være:

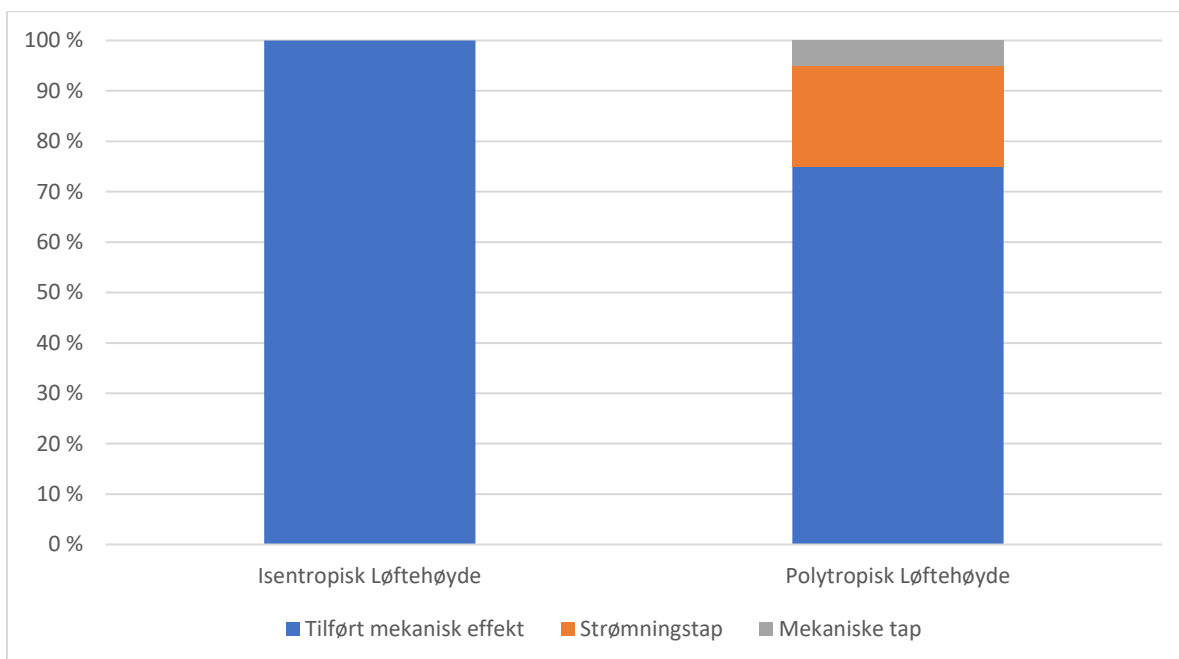
- Høyt utløpstrykk fra kompressoren (høyere motstand i prosessen nedstrøms)
- Reduksjon av sugetrykk
- Høyere sugetemperatur
- Endringer i gass komposisjon (reduksjon i molvekt)
- Drifting av transmitterens målerverdi over tid (behov for kalibrering)
- Defekt antisurge ventil
- Blokkert resirkuleringslinje/-ventil
- Oppstart og stopp av kompressor

(General Electric Oil & Gas, 2008, p. 302), (CCC, 2000, p. 17)

## 2.4. Stall

Stall, ofte kalt «Choke», er en tilstand kompressoren går i når gass strømmingen gjennom kompressoren blir så høy at gassen nærmer seg lydens hastighet. Det kan ha en negativ effekt på ytelsen til kompressoren og føre til økt vibrasjon på kompressorbladene. Noen kompressorer tåler å operere i choke en viss tid, men det er ikke anbefalt. Det kan være destruktivt å operere kompressoren i choke over lengre tid (Hanlon, 2001, ss. 82, 172)

## 2.5. Kompressorens løftehøyde



**FIGUR 10: SAMMENLIGNING MELLOM ISENTROPISK OG POLYTROPISK LØFTEHØYDE**

En kompressor utfører en kompresjon av et fluid gjennom det som ofte beskrives som en polytropisk prosess. Det er normalt at kompressorer har en oppgitt løftehøyde, som beskriver hvor høyt kompressoren klarer å løfte fluidet. I Figur 10 illustreres forskjellen mellom en polytropisk og isentropisk løftehøyde.

### *STRØMNINGSTAP (INDRE TAP)*

Indre tap i en kompressor består av strømnings tap, men også lekkasjestrømmer mellom roterende og stillestående komponenter. Strømnings tapene kalles for hydrauliske tap og skyldes friksjon mellom fluid og veggflater i kompressoren, men også akselerasjon/retardasjon samt avbøyning av fluidstrømmen (Øverli, 1992, ss. 49-50).

### *MEKANISKE TAP (YTRE TAP)*

Ytre tap i en kompressor fører ikke til temperaturøkning av fluidet og kalles mekaniske tap. Eksempler på mekaniske tap er friksjon i lager, tetninger og lignende (Øverli, 1992, ss. 49-50).



### 2.5.1. Isentropisk løftehøyde

Isentropisk løftehøyde er basert på en reversibel adiabatisk kompresjon av en gass. En isentropisk prosess har konstant entropi, mens en virkelig prosess er kompleks og har varmetap. For å finne den isentropiske løftehøyden antas at kompressoren følger termodynamikkens 1. lov for åpent system med jevn strømming beskrevet i ligning 2.5.1.1. Potensiell- og kinetisk energi neglisjeres og det antas at prosessen ikke har varmetap.

$$\dot{m} \cdot \left( H_1 + \frac{C_1^2}{2} + E_{pot,1} \cdot g \right) + \dot{Q} + \dot{W} = \dot{m} \cdot \left( H_2 + \frac{C_2^2}{2} + E_{pot,2} \cdot g \right) \quad (2.5.1.1)$$

$$\dot{Q} + \dot{W} = \dot{m} \cdot (H_2 - H_1)$$

$$\dot{W}_{is} = \dot{m} \cdot \Delta H_{is} \quad (2.5.1.2)$$

Dersom kompressoren utfører en reversibel adiabatisk prosess av en ideell gass, så gjelder sammenhengen mellom trykk og volum som vist i formel 2.5.1.3.

$$P_i \cdot v_i^k = P \cdot v^k \quad (2.5.1.3)$$

$$v = v_i \cdot \left( \frac{P_i}{P} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (2.5.1.4)$$

Reell gasslov brukes gjennom ligning 2.5.1.5 for å ta hensyn til at den ideelle gassen har en kompressibilitet.

$$v_i \cdot P_i = Z_i \cdot R \cdot T_i \quad (2.5.1.5)$$

For å kunne utføre integrasjonen i ligning 2.5.1.6 må det antas at trykket over kompressoren er den eneste variabelen. Gasskonstanten skrives om til den universelle gasskonstanten.

Ligning 2.5.1.2, 2.5.1.4 og 2.5.1.5 settes inn i uttrykket for isentropisk arbeid over kompressoren. Den største feilkilden ved å bruke denne formelen er at kompressibiliteten antas å være konstant lik som ved innløpet. CCC bruker derfor gjennomsnittlig kompressibilitet for å minimere feilkilden. Isentropeksponenten varierer også, men antas å være lik den oppgitte gjennomsnittlige verdien (CCC, 2013, s. 4).

$$W_{is} = \int_{P_i}^{P_u} V dp \quad (2.5.1.6)$$

$$m \cdot \Delta H_{is} = \int_{P_i}^{P_u} m \cdot v dp$$

$$\Delta H_{is} = \int_{P_i}^{P_u} v_i \cdot \left(\frac{P_i}{P}\right)^{\frac{1}{k}} dp$$

$$\Delta H_{is} = v_i \cdot P_i^{\frac{1}{k}} \cdot \int_{P_i}^{P_u} P^{-\frac{1}{k}} dp$$

$$\Delta H_{is} = v_i \cdot P_i^{\frac{1}{k}} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left( P_u^{\frac{k-1}{k}} - P_i^{\frac{k-1}{k}} \right)$$

$$\Delta H_{is} = v_i \cdot P_i \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left( \left(\frac{P_u}{P_i}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)$$

$$\Delta H_{is} = Z_i \cdot R \cdot T_i \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left( \left(\frac{P_u}{P_i}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)$$

$$\Delta H_{is} = \frac{\bar{Z} \cdot \tilde{R} \cdot T_i}{M} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left( \left(\frac{P_u}{P_i}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \quad (2.5.1.7)$$

## 2.5.2. Virkelig løftehøyde

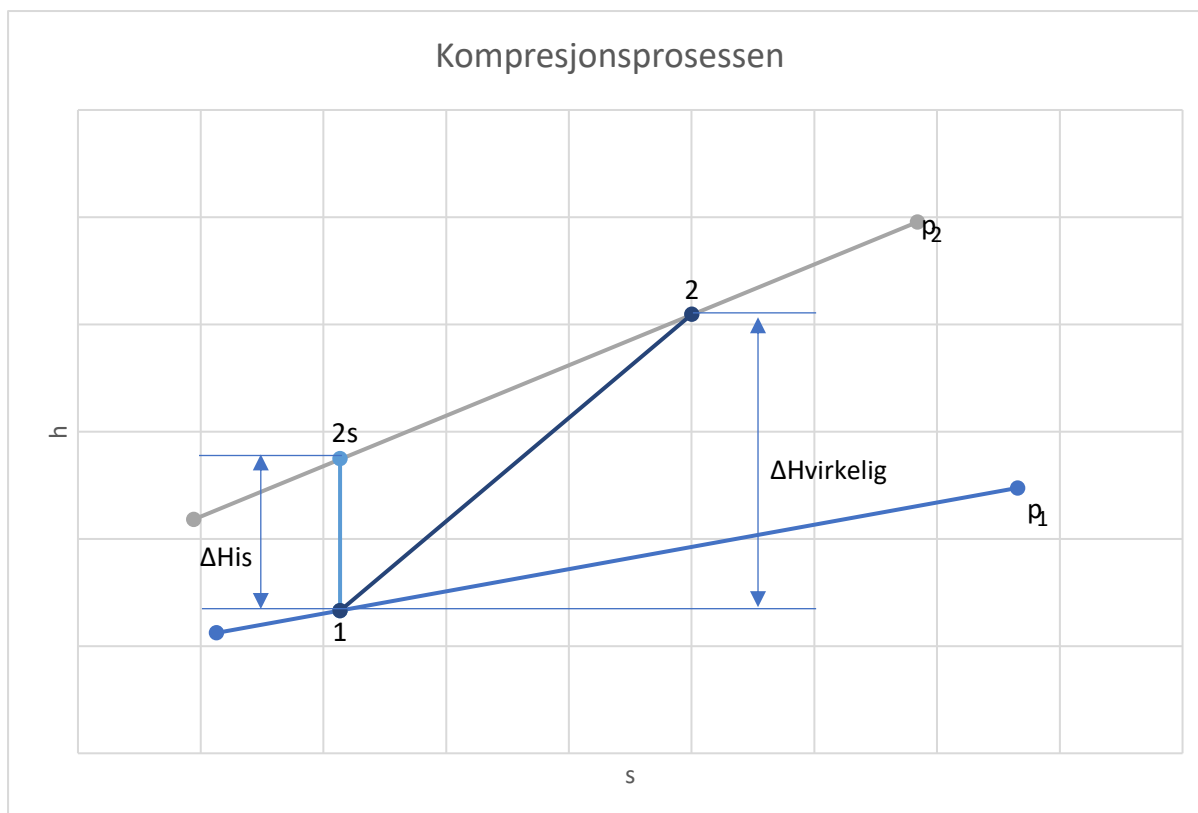
Det er ønskelig med et uttrykk for hvor stor løftehøyde kompressoren tilfører fluidet basert på en isentropisk prosess (lign 2.5.1.7). Den virkelige utløpstemperaturen er høyere enn den isentropiske utløpstemperaturen. Fordi det er en sammenheng mellom temperatur og entalpi, så er dermed den virkelige løftehøyden høyere enn isentropisk løftehøyde, som illustrert i Figur 11. For å ha et uttrykk med virkelig utløpstemperatur, så må ligning 2.5.1.7 skrives om fra isentropisk temperaturforhold (lign. 2.5.2.1) til virkelig temperaturforhold (lign. 2.5.2.2).

Isentropisk  
temperaturforhold:

$$\frac{T_{u,s}}{T_i} = \left(\frac{P_u}{P_i}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (2.5.2.1)$$

Virkelig  
temperaturforhold:

$$\frac{T_u}{T_i} = \left(\frac{P_u}{P_i}\right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (2.5.2.2)$$



FIGUR 11: ENTALPIØKING OVER EN KOMPRESSOR

Utrykket for den virkelige løftehøyden (lign. 2.5.2.4) viser hvor stor løftehøyde som virkelig tilføres fluidet.

$$\Delta H_{virkelig} = \frac{\bar{Z} \cdot \tilde{R} \cdot T_i}{M} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left(\frac{T_u}{T_i} - 1\right) \quad (2.5.2.3)$$

$$\Delta H_{virkelige} = \frac{\bar{Z} \cdot \tilde{R} \cdot T_i}{M} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left(\left(\frac{P_u}{P_i}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right) \quad (2.5.2.4)$$

### 2.5.3. Polytropisk løftehøyde og virkningsgrad

Det er normalt å anta at kompressorer utfører polytropiske prosesser. En polytropisk prosess kalles ofte en virkelig isentropisk prosess. Den er ikke adiabatisk fordi det blir avgitt varme. Den polytropiske prosessen kan betraktes som mange isentropiske kompresjonstrinn etter hverandre som mellom hvert trinn avgir varme. Virkelig utløpstemperatur (lign. 2.5.2.2) brukes i trykket for polytropisk løftehøyde (Ambjørnsen, 2009, ss. 10-12). Fordi uttrykket for polytropisk løftehøyde (lign. 2.5.3.1) ikke er praktisk, så brukes et alternativt uttrykk for polytropisk løftehøyde basert på den virkelige løftehøyden (lign. 2.5.2.4). Grunnen til at det ikke er praktisk å bruke ligning 2.5.3.1 er at kompressorleverandøren oppgir den isentropiske eksponenten og ikke polytropeksponenten i databladet.

$$\Delta H_p = \frac{\bar{Z} \cdot \tilde{R} \cdot T_i}{M} \cdot \frac{n}{n-1} \cdot \left( \left( \frac{P_u}{P_i} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \quad (2.5.3.1)$$

Den polytropiske virkningsgraden defineres som virkningsgraden til den polytropiske prosessen i ligning 2.5.3.2. (General Electric Oil & Gas, s. 20). Virkningsgraden kalles trinnvirkningsgraden fordi den viser virkningsgraden for kompresjonstrinnene (Øverli, 1992, ss. 52-53).

$$\eta_p = \frac{\Delta H_p}{\Delta H_{\text{virkelig}}} \quad (2.5.3.2)$$

$$\eta_p = \frac{\frac{\bar{Z} \cdot \tilde{R} \cdot T_i}{M} \cdot \frac{n}{n-1} \cdot \left( \left( \frac{P_u}{P_i} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)}{\frac{\bar{Z} \cdot \tilde{R} \cdot T_i}{M} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left( \left( \frac{P_u}{P_i} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)}$$

$$\eta_p = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{k-1}{k} \quad (2.5.3.3)$$

Ved å bruke ligning 2.5.3.3 kan den polytropiske virkningsgraden brukes til å definere polytropisk løftehøyde basert på virkelig løftehøyde. Dette uttrykket er praktisk å bruke fordi kompressorleverandøren oppgir alle verdiene i uttrykket.

$$\Delta H_p = \eta_p \cdot \Delta H_{tilført} \quad (2.5.3.4)$$

$$\Delta H_p = \eta_p \cdot \left( \frac{\bar{Z} \cdot \tilde{R} \cdot T_i}{M} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left( \left( \frac{P_u}{P_i} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \right)$$

$$\Delta H_p = \frac{\bar{Z} \cdot \tilde{R} \cdot T_i}{M} \cdot \frac{\eta_p \cdot k}{k-1} \cdot \left( \left( \frac{P_u}{P_i} \right)^{\frac{k-1}{k \cdot \eta_p}} - 1 \right) \quad (2.5.3.5)$$

## 2.6. Volumetrisk strømning

Det kan være utfordrende å finne ligningen for volumetrisk strøm gjennom en kompressor. Dette fordi blant annet gassens egenvekt kan variere. Det tas utgangspunkt i egenvekten ved innløpet for å få en god tilnærming. Reell gass lov brukes gjennom ligning 2.6.1 for å ta hensyn til at den ideelle gassen gjennom kompressoren har en kompressibilitet.

$$P_i \cdot V_i = n \cdot Z_i \cdot \tilde{R} \cdot T_i \quad (2.6.1)$$

$$P_i \cdot m \cdot \frac{1}{\rho_i} = n \cdot Z_i \cdot \tilde{R} \cdot T_i$$

$$\rho_i = \frac{P_i \cdot M}{Z_i \cdot \tilde{R} \cdot T_i} \quad (2.6.2)$$

Dersom det er montert en måleblende eller et venturirør på innløpet av kompressoren så finnes massestrømmen gjennom ligning 2.6.3. Utrykket for massestrømmen følger ISO 5167 standarden (Olav Stene, 2012, s. 3) og brukes for å finne et uttrykk for volumstrømmen ved innløpet til kompressoren. Utrykket for egenvekten ved innløpet (2.6.2) settes inn i ligning 2.6.3.

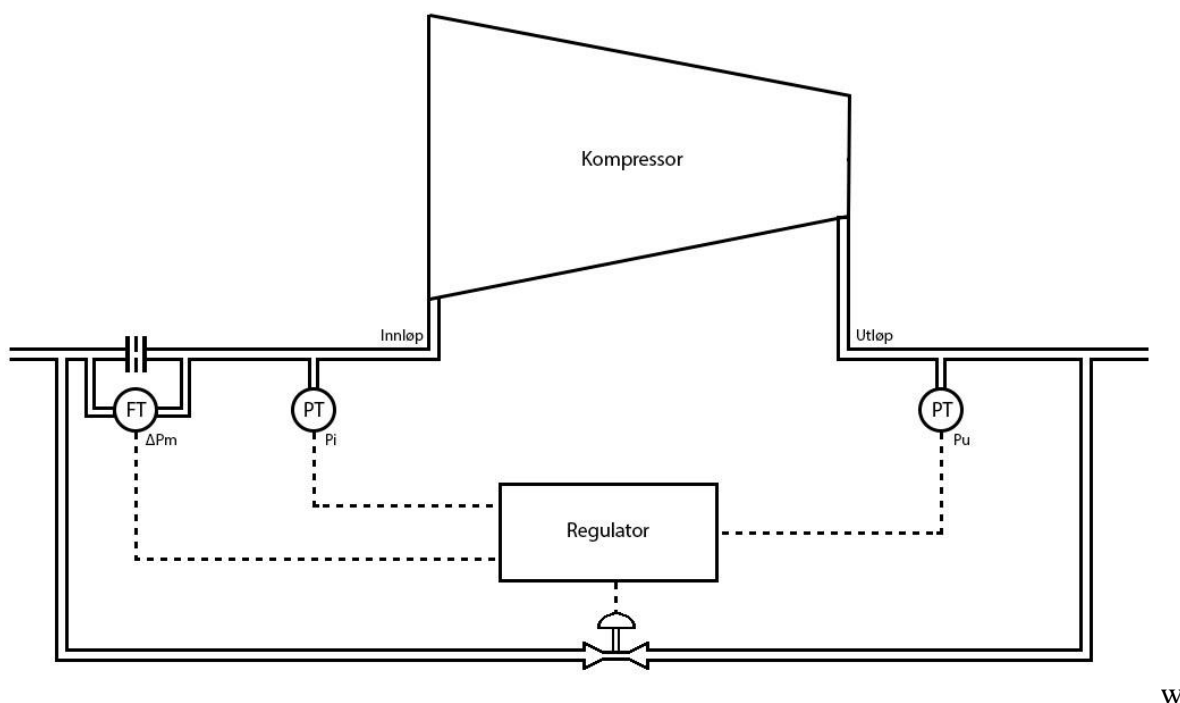
$$\dot{m}_i = K_m \cdot \sqrt{\Delta P_m \cdot \rho_i} \quad (2.6.3)$$

$$Q_i \cdot \rho_i = K_m \cdot \sqrt{\Delta P_m \cdot \rho_i}$$

$$Q_i = K_m \cdot \sqrt{\frac{Z_i \cdot \tilde{R} \cdot T_i}{M}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_m}{P_i}} \quad (2.6.4)$$

### 3. Antisurge regulering

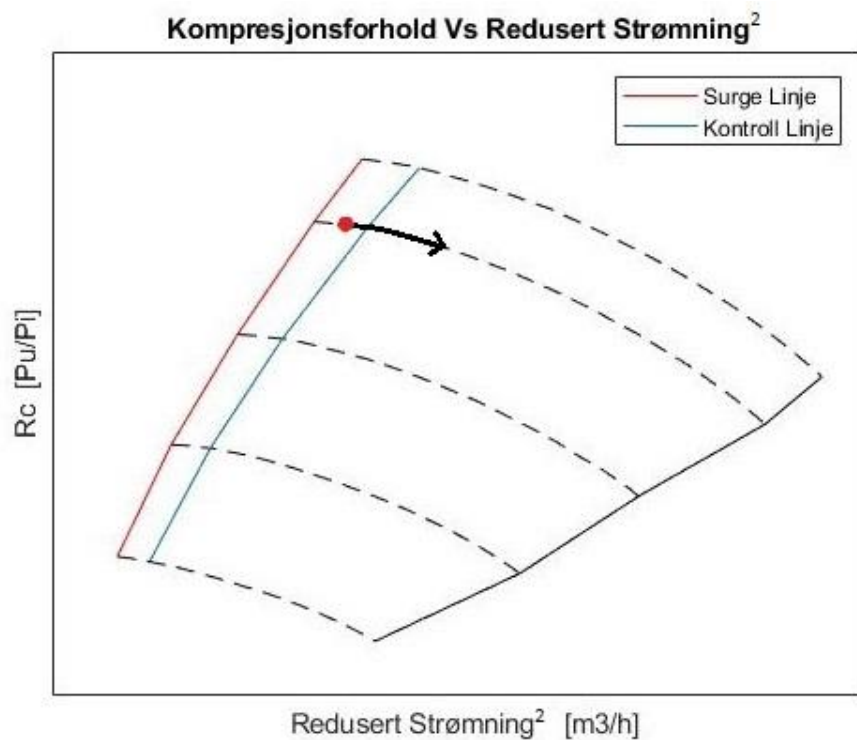
Antisurge systemet er designet for å unngå at kompressoren opererer utenfor sitt definerte arbeidsområde i kompressorkartet. Antisurge reguleringsløyfen består av en reguleringsventil, en regulator og flere transmittere som vist i Figur 12. Hvilke transmittere som benyttes i antisurge reguleringen er avhengig av algoritmen. For CCC er dette avhengig av fA modus, beskrevet i kapittel 4.10. Antisurge reguleringsventilen er en omløpsventil montert i parallell med kompressoren, som vist i Figur 12. Ventilens oppgave er å holde operasjonspunktet på kontroll linjen.



FIGUR 12: ANTISURGE SYSTEM (GENERAL ELECTRIC OIL & GAS, 2008, P. 309)

Noe av fluidet nedstrøms kompressoren resirkuleres tilbake til innløpet når antisurge reguleringsventilen åpner. Reguleringsventil er designet slik at den kan resirkulere all fluidet tilbake til innløpet dersom det ikke er strømning nedstrøms kompressoren. Det stilles strenge krav til hurtigheten på antisurge ventilen. Ventilen må ha så rask responstid at den klarer å forhindre surge eller choke ved større endringer i fluidstrømmen.

Hvor mye antisurge ventilen er åpen varierer med prosessmotstanden rundt kompressoren, men ventilen er normalt stengt. Figur 13 illustrerer at operasjonspunktet beveger seg bort fra surgelinjen dersom prosessmotstanden reduseres ved å åpne antisurge ventilen.



**FIGUR 13: PROSESSMOTSTANDENS PÅVIRKNING PÅ OPERASJONSPUNKTET (CCC, 2010, s. 34)**



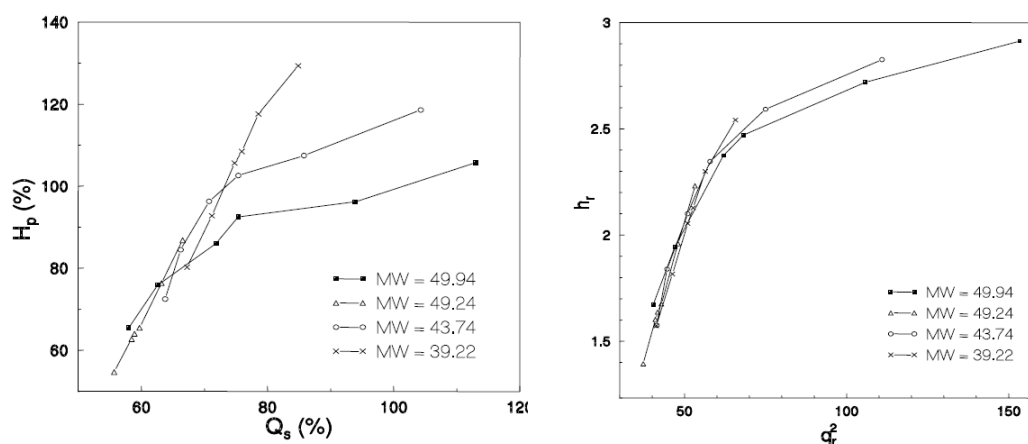
## 4. Antisurge regulatoren

CCC – Compressor Controls Corporation er et av flere firma som leverer kompressor kontroll systemer. Det er deres antisurge regulatorer som blir fokuset i denne oppgaven.

### 4.1. Prosessering av inputsignaler

Den generelle problemstillingen i oppgaven omhandler at kompressor leverandør og kontrollsystem leverandør opererer med forskjellige formater for kompressorkart og beregning av surgelinjen.

Kompressor leverandøren opererer som nevnt med polytropisk løftehøyde og volumetrisk strømning. Dette fungerer greit i et laboratorium, men polytropisk løftehøyde er en variabel som ikke kan måles direkte da den er avhengig av parametere som gass komposisjon. Det er relativt omfattende å beregne disse variablene fordi de krever stor datakraft å beregne i sanntid, og er sensitiv for flere variabler som for f.eks. molvekt på gassen, temperatur, kompresjons faktor og variasjon i turtall.



FIGUR 14: GASSKOMPOSISJONENS PÅVIRKNING PÅ SURGELINJEN (CCC, 2010, s. 33)

Figur 14 viser at ved å benytte redusert polytropisk løftehøyde og redusert strømning så er det nok å implementere en surgelinje ved variabel molvekt på gassen. Ved kompressorleverandørens format så må det derimot implementeres flere ulike surgelinjer for å få en god nøyaktighet.

#### 4.1.1. Redusert polytropisk løftehøyde

Fordi verdien på variabler som molvekt endres noe med tiden så er det et problem at surgelinjen er veldig sensitiv for en endring som vist i Figur 14. Surgelinjen blir beregnet ut fra en bestemt molvekt og en endring fører dermed til at surgelinjen som er implementert i regulatoren får en unøyaktighet. En endring i gassens molvekt eller kompressibilitet fører ikke til at surgelinjen blir mer unøyaktig enn akseptabelt dersom de reduserte størrelsene brukes som akser i kompressorkartet. Redusert polytropisk løftehøyde kan beregnes gjennom ligning 4.1.1.2.

$$\Delta H_p = \frac{\bar{Z} \cdot \tilde{R} \cdot T_i}{M} \cdot \frac{\eta_p \cdot k}{k-1} \cdot \left( \left( \frac{P_u}{P_i} \right)^{\frac{k-1}{k \cdot \eta_p}} - 1 \right) \quad (2.5.3.5)$$

$$\frac{\Delta H_p \cdot M}{\bar{Z} \cdot \tilde{R} \cdot T_i} = \frac{(R_c^\sigma - 1)}{\sigma} \quad (4.1.1.1)$$

$$h_{p,redusert} = \frac{(R_c^\sigma - 1)}{\sigma} \quad (4.1.1.2)$$

CCC har benyttet seg av egne symboler på noen av variablene. Kompresjonsforholdet,  $R_c$ , brukes som forholdet mellom utløps- og innløpsstrykket. Eksponenten i ligning 2.5.3.5. skrives om til polytropeksponenten i CCC format,  $\sigma$ , som er definert i kapittel 4.1.3.

#### 4.1.2. Redusert volumstrøm

Volumstrømmen er som polytropisk løftehøyde avhengig av endringer i gassens molvekt. CCC baserer beregningene sine på «reduert volumstrøm kvadrert», som ikke er direkte avhengig av endringer i gassens molvekt. Kompressibiliteten ved innløpet antas derimot å være rimelig konstant. Dersom akse i kompressorkartet gjøres om til sin reduserte størrelse så blir den beregnede surgelinjen mindre avhengig av endringer i molvekt. Ligning 4.1.2.2. kan brukes til å beregne «reduert volumstrøm kvadrert».

$$Q_i = K_m \cdot \sqrt{\frac{Z_i \cdot \tilde{R} \cdot T_i}{M}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_m}{P_i}} \quad (2.2.17)$$

$$\frac{M}{Z_i \cdot \tilde{R} \cdot T_i} \cdot Q_i^2 = K_m^2 \cdot \frac{\Delta P_m}{P_i} \quad (4.1.2.1)$$

$$q_{i,redusert}^2 = K_m^2 \cdot \frac{\Delta P_m}{P_i} \quad (4.1.2.2)$$

### 4.1.3. Polytropeksponenten i CCC format

I CCC defineres polytropeksponenten som  $\sigma$  og kan beregnes ved ligning 2.5.4.2 eller

2.5.4.4. Det anbefales å benytte 2.5.4.4 dersom gasskomposisjonen eller virkningsgraden til kompressoren varierer (CCC, 2010, s. 31).

$$\frac{n-1}{n} = \frac{k-1}{k \cdot \eta_p} \quad (2.5.4.1)$$

$$\sigma = \frac{k-1}{k \cdot \eta_p} \quad (2.5.4.2)$$

En ligning for polytropeksponenten kan også finnes ut ifra sammenhengen mellom temperatur og trykk gitt i ligning 2.5.4.3 (General Electric Oil & Gas, ss. 12-20).

$$\frac{T_u}{T_i} = \left( \frac{P_u}{P_i} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (2.5.4.3)$$

$$\log \left( \frac{T_u}{T_i} \right) = \log \left( \left( \frac{P_u}{P_i} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right)$$

$$\log \left( \frac{T_u}{T_i} \right) = \frac{n-1}{n} \cdot \log \left( \frac{P_u}{P_i} \right)$$

$$\frac{n-1}{n} = \frac{\log \left( \frac{T_u}{T_i} \right)}{\log \left( \frac{P_u}{P_i} \right)}$$

$$\sigma = \frac{\log\left(\frac{T_u}{T_i}\right)}{\log\left(\frac{P_u}{P_i}\right)} \quad (2.5.4.4)$$

## 4.2. Surgelinjen i UPC format

I olje- og gassindustrien er det en bransjestandard for algoritme for beregning av antisurge system. Denne kalles UPC, «Universal Performance Curve». UPC bruker ikke de reduserte størrelsene som akser og dermed gir UPC formatet en unøyaktighet som beskrevet i kapittel 4.1.1 og 4.1.2. UPC tar utgangspunkt i å bruke alle parametrene som lå til grunn når kompressor leverandøren testet kompressoren. I denne formelen er det kun  $H_{\text{polytropisk}}$  og  $Q_i$  som er betraktet som variabler, mens resten antas å være konstanter lik verdiene i databladet til kompressoren (Alf R. Kluge, Statoil, 2008, s. 5).

*X-AKSEN*

$$Q_i = K_m \cdot \sqrt{\frac{Z_i \cdot \tilde{R} \cdot T_i}{M}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_m}{P_i}} \quad (2.2.17)$$

$$\sqrt{\frac{\Delta P_m}{P_i}} = \frac{Q_i}{K_m} \cdot \sqrt{\frac{M}{Z_i \cdot \tilde{R} \cdot T_i}} \quad (4.2.1)$$

*Y-AKSEN*

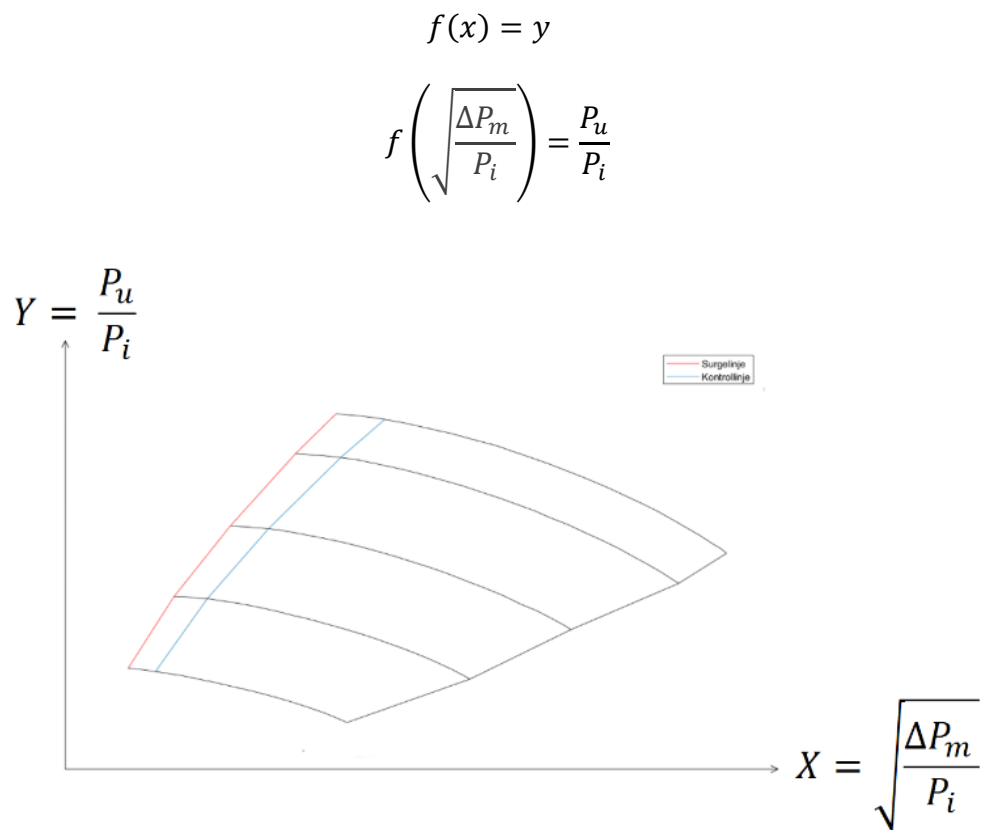
$$\Delta H_p = \frac{Z_i \cdot \tilde{R} \cdot T_i}{M} \cdot \frac{n \cdot \eta_p}{n - 1} \cdot \left( \left( \frac{P_u}{P_i} \right)^{\frac{k-1}{k \cdot \eta_p}} - 1 \right) \quad (2.2.12)$$

$$\frac{P_u}{P_i} = \left( 1 + \frac{H_p \cdot M}{Z_i \cdot \tilde{R} \cdot T_i} \cdot \frac{k - 1}{k \cdot \eta_p} \right)^{\frac{k \cdot \eta_p}{k-1}} \quad (4.2.2)$$

### Surgelinjen i UPC format

Surgelinjen defineres ved y-koordinatene  $\left(\frac{P_u}{P_i}\right)$  og x-koordinatene  $\left(\sqrt{\frac{\Delta P_m}{P_i}}\right)$  som vist i Figur

15. Verdier fra kompressorkartet og kompressordatabladet brukes til å beregne surgelinjen.



**FIGUR 15: SURGELINJE I UPC FORMAT**

### 4.3. Surgelinjen i CCC format

CCC bruker ikke de reduserte størrelsene som akser og dermed gir CCC formatet en unøyaktighet som beskrevet i kapittel 4.1.1 og 4.1.2. Dette er fordi gassens molvekt ikke er konstant, men varierer i virkeligheten. Ved utledning av uttrykket for isentropisk løftehøyde ble det antatt at kompressibiliteten til gassen gjennom kompressoren er konstant lik den gjennomsnittlige verdien, som også gir en akseptabel unøyaktighet. De reduserte størrelsene beregnes av venstre siden i ligning 4.1.1.1 og 4.1.2.1.

*Y-AKSEN*

$$q_{i,redusert}^2 = K_m^2 \cdot \frac{\Delta P_m}{P_i} \quad (4.1.2.2)$$

$$\frac{\Delta P_m}{P_i} = \left( \frac{q_{i,redusert}}{K_m} \right)^2 \quad (4.3.1)$$

*X-AKSEN*

$$h_{p,redusert} = \frac{(R_c^\sigma - 1)}{\sigma} \quad (4.1.1.2)$$

$$R_c = \left( 1 + h_{p,redusert} \cdot \sigma \right)^{\frac{1}{\sigma}} \quad (4.3.2)$$

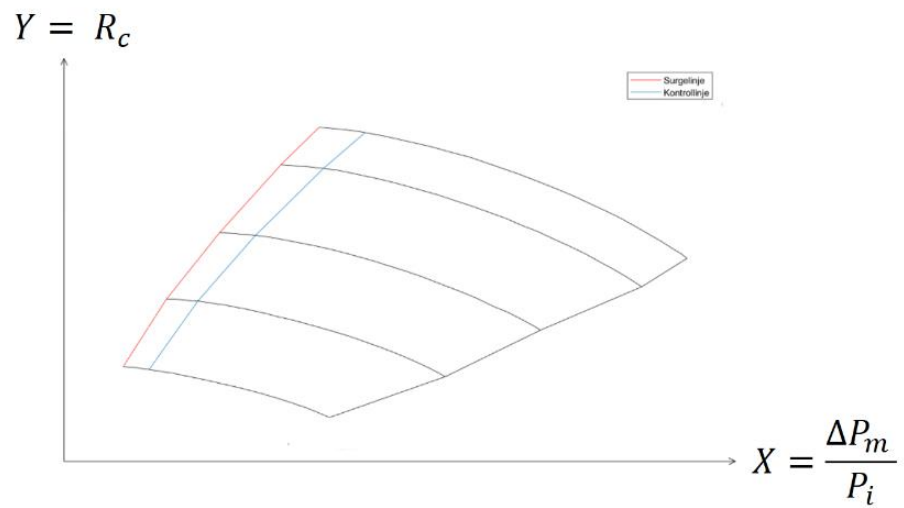
#### *SURGELINJEN I CCC FORMAT*

Surgelinjen defineres ved y-koordinatene ( $R_c$ ) og x-koordinatene  $\left( \frac{\Delta P_m}{P_i} \right)$  som vist i Figur 16.

I CCC regulatoren benyttes den inverse funksjonen  $f_1(x)$  til å beregne surgelinjen.  $f_1(x)$  er beskrevet i neste delkapittel.

$$f(x) = y$$

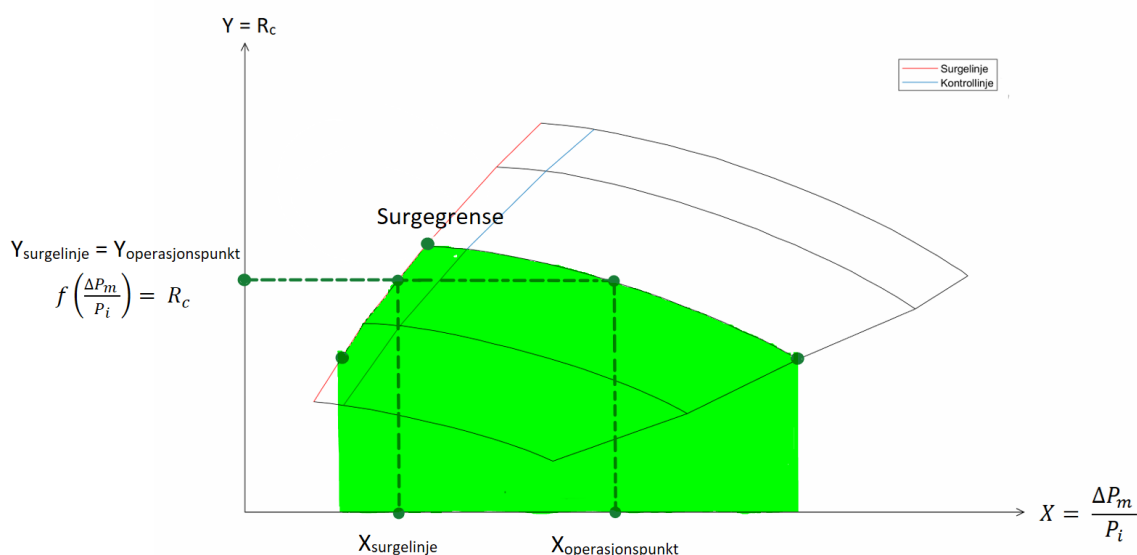
$$f\left(\frac{\Delta P_m}{P_i}\right) = R_c$$



FIGUR 16: SURGELINJE I CCC FORMAT

#### 4.4. Avstand til surge i CCC format

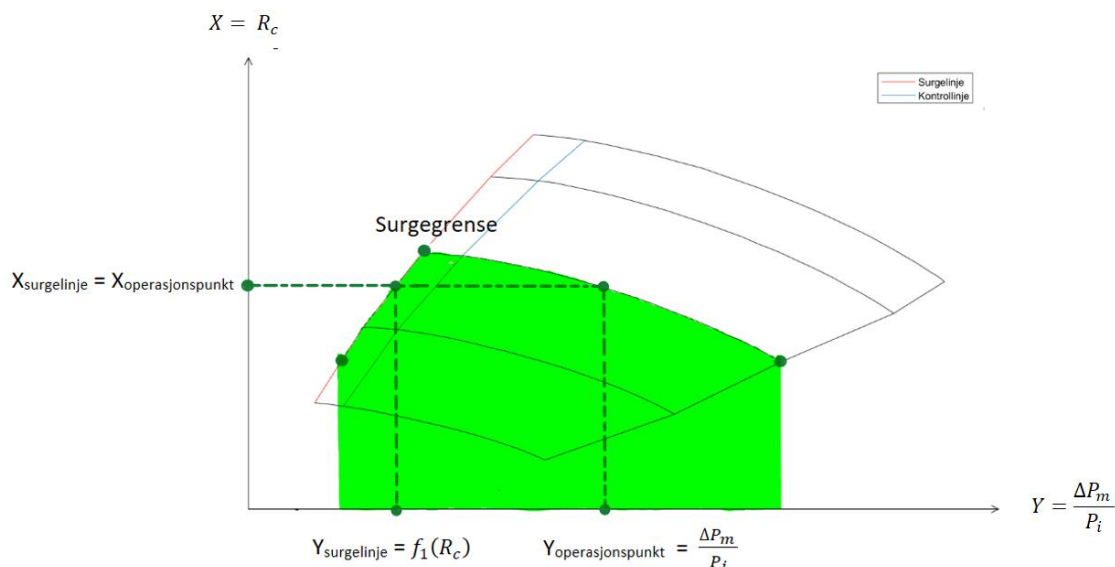
Dersom en kompressor opererer på et bestemt turtall skal operasjonspunktet ideelt sett bevege seg langs den valgte turtallskurven. CCC regulatoren sammenligner kontinuerlig verdien til operasjonspunktet opp mot surgelinjen for å finne avstand til surge. I delkapittelet over ble surgelinjen definert som  $f\left(\frac{\Delta P_m}{P_i}\right) = R_c$  slik at surgelinjen kan beskrives med  $Y_{surgelinje} = f\left(\frac{\Delta P_m}{P_i}\right)$  mens operasjonspunktet kan beskrives av  $Y_{operasjonspunkt} = R_c$ . Figur 17 viser at y-verdien til operasjonspunktet og surgelinjen er like for en gitt turtallskurve. Det er ingen nytteverdi i å sammenligne y-verdien til operasjonspunktet opp mot surgelinjen fordi begge sider av ligningen har samme tallverdi.



**FIGUR 17: PROBLEMATIKK VED MÅLING AV AVSTAND TIL SURGE**

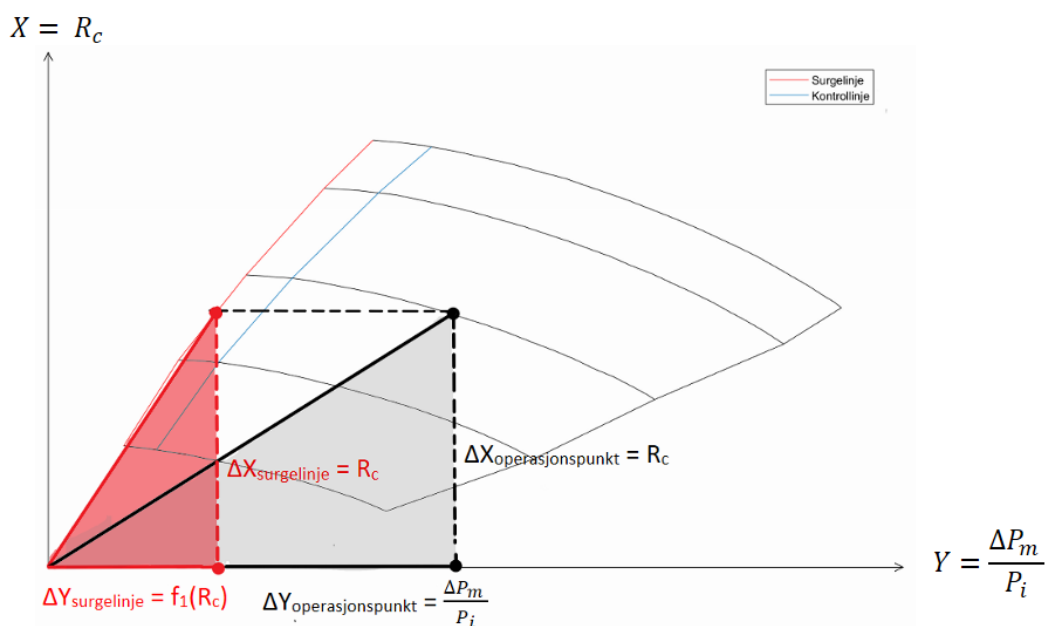
Den inverse funksjonen av surgelinjen er definert som  $f_1(R_c) = \frac{\Delta P_m}{P_i}$  og brukes til å finne avstand til surge. Verdien til surgelinjen ved operasjonspunktet finnes nå ved  $Y_{surgelinje} = f_1(R_c)$  mens verdien til operasjonspunktet finnes som  $Y_{operasjonspunkt} = \frac{\Delta P_m}{P_i}$ .  $f_1(x)$  kalles for «Y-Coordinate Characterizer» fordi den bruker x-verdier til å definere formen på surgelinjen i y-retning. Utgangspunktet er fortsatt en formel på formen  $f_1(x) = y$ . Forskjellen nå er at funksjonen har skiftet plasseringen på x- og y-aksen. Dette illustreres i Figur 18.





**FIGUR 18: BRUK AV DEN INVERSE FUNKSJONEN AV SURGELINJEN LØSER PROBLEMATIKKEN MED Å MÅLE AVSTAND TIL SURGE.**

Avstand til surge har fått variabelen  $S_s$  og er definert som forholdet mellom stigningstallet til surge- og kontrollinjen (CCC, 2013, s. 6). Avstand til surge er beskrevet av ligning 4.4.1 og illustrert av Figur 19. Surgelinjen beregnes ved hjelp av funksjonen  $f_1(R_c)$  mens operasjonspunktet beregnes ut ifra feltmålingene  $\frac{\Delta P_m}{P_i}$ .



**FIGUR 19: MÅLING AV AVSTAND TIL SURGE**

$$S_s = K \cdot \frac{\text{Stigningstall}_{\text{operasjonspunkt}}}{\text{Stigningstall}_{\text{surgelinje}}} \quad (4.4.1)$$

$$S_s = K \cdot \frac{\frac{\Delta Y_{\text{operasjonspunkt}}}{\Delta X_{\text{operasjonspunkt}}}}{\frac{\Delta Y_{\text{surgelinje}}}{\Delta X_{\text{surgelinje}}}} \quad (4.4.2)$$

$$S_s = K \cdot \frac{\Delta Y_{\text{surgelinje}}}{\Delta Y_{\text{operasjonspunkt}}} \quad (4.4.3)$$

$$S_s = K \cdot \frac{f_1(R_c)}{\frac{\Delta P_m}{P_i}} \quad (4.4.4)$$

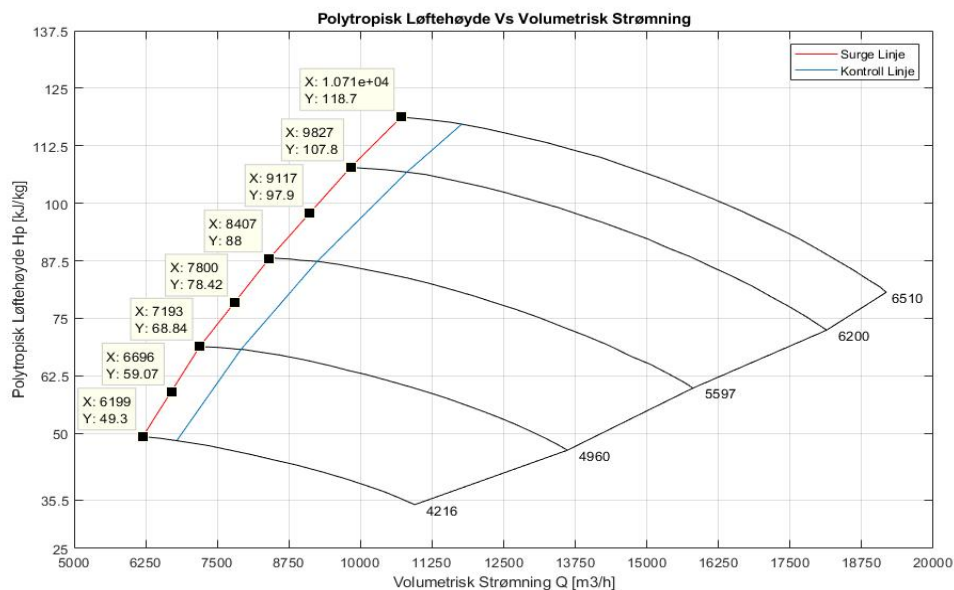
Utrykket for  $S_s$  varierer etter hvilken reglormodus som er valgt og er beskrevet under delkapittelet om fAmodus. Konstanten  $K$  kan kalles en kalibreringskonstant som gjør det enkelt å finjustere surge-linjen i ettertid og skaleres fra 0 til 1. Vanligvis settes  $K = 0.5$  slik at det er like stor justeringsmulighet begge veier (CCC, 2005, s. 63). Ut ifra hvilken verdi  $S_s$  har så kan det oppstå en av tre situasjoner beskrevet nedenfor (CCC, 2000, pp. 63-65)

$S_s < 1$ : Normal situasjon. Operasjonspunktet er til høyre for surgelinjen.

$S_s = 1$ : Kritisk situasjon. Operasjonspunktet til regulatoren treffer surgelinjen.

$S_s > 1$ : Surge. Operasjonspunktet er til venstre for surgelinjen.

## 4.5. Beregning av surgelinjen i CCC format



FIGUR 20: TI VALGTE PUNKTER PÅ SURGELINJEN

For å digitalisere surgelinjen må opptil ti punkter av  $H_p$  og  $Q$  manuelt leses av fra surgelinjen i kompressorkartet fra leverandøren. Verdiene kan deretter regnes om til sine reduserte størrelser,  $h_{p,redusert}$  og  $q_{redusert}$ . Surgelinjen kan alternativt leses av ved hjelp av et digitalt verktøy som heter «Pointpicker», beskrevet i kapittel 5.2.

For at CCC regulatoren skal forstå inngangssignalene skalerer regulatoren automatisk måleverdien til hver enkelt transmitter om til prosessverdier mellom 0 og 1, også kalt PV, beskrevet i kapittel 5.3. Transmitternes måleverdier ved surge må derfor beregnes om til prosessverdier før de kan brukes til å beregne surgelinjen. Hvilke transmittere som brukes i beregningen av surgelinjen er avhengig av fA modus, men det tas utgangspunkt i fA modus 31. Ved fA modus 31 så må utløpstrykket (lign. 4.5.1) og differensialtrykket over måleblenden (lign. 4.5.2) beregnes før de kan gjøres om til prosessverdier. Selve beregningen av prosessverdier er beskrevet i kapittel 5.3.

X-koordinatene av surgelinjen i CCC er definert som  $R_c$  eller  $\frac{P_u}{P_i}$ .  $P_u$  finnes ved å snu på ligningen for  $R_c$  fra likning 4.3.2.  $P_u$  beregnes deretter for alle verdiene av  $h_{p,redusert}$ :

$$P_u = P_i \cdot (1 + h_{p,redusert} \cdot \sigma)^{\frac{1}{\sigma}} \quad (4.5.1)$$

Y-koordinatene av surgelinjen i CCC, er definert som  $\frac{\Delta P_m}{P_i}$ .  $\Delta P_m$  finnes ved å snu på ligningen for volumstrøm og kalkulerer  $\Delta P_m$  for opptil 10 verdier av  $q_{i,redusert}$ :

$$q_{i,redusert}^2 = K_m^2 \cdot \frac{\Delta P_m}{P_i} \quad (4.1.2.2)$$

$$\Delta P_m = \left( \frac{q_{i,redusert}}{K_m} \right)^2 \cdot P_i \quad (4.5.2)$$

Verdiene av  $\Delta P_m$  skaleres om til PV verdier. Operasjonspunktet plasseres på surgelinjen slik at  $S_s$  er lik 1. Punktene for surgelinjen,  $f_1(R_c)$ , kan dermed finnes ved alle verdiene av  $\Delta P_m$  og brukes til å danne surgelinjen i CCC format (Honeywell, 2001, s. 4)

$$S_s = K \cdot \frac{f_1(R_c)}{\frac{\Delta P_m}{P_i}} \quad (4.4.3)$$

$$1 = K \cdot \frac{f_1(R_c)}{\frac{\Delta P_m}{P_i}}$$

Likningen for  $S_s$  varierer etter hvilken fA modus som er valgt for antisurge regulatoren. Mer om dette kan leses i senere kapittel 4.10. Opptil ti verdier av  $P_u$  og  $\Delta P_m$  beregnes og gjøres om til PV verdier. Konstantene gjøres om til PV verdier. Surgelinjen kan nå beregnes gjennom ligning 4.5.3 og 4.5.4.

$$f_1(X): \quad f_1(R_c) = \frac{PV_{\Delta P_m}}{K \cdot PV_{P_i}} \quad (4.5.3)$$

$$X: \quad R_c = \frac{PV_{P_u}}{PV_{P_i}} \quad (4.5.4)$$

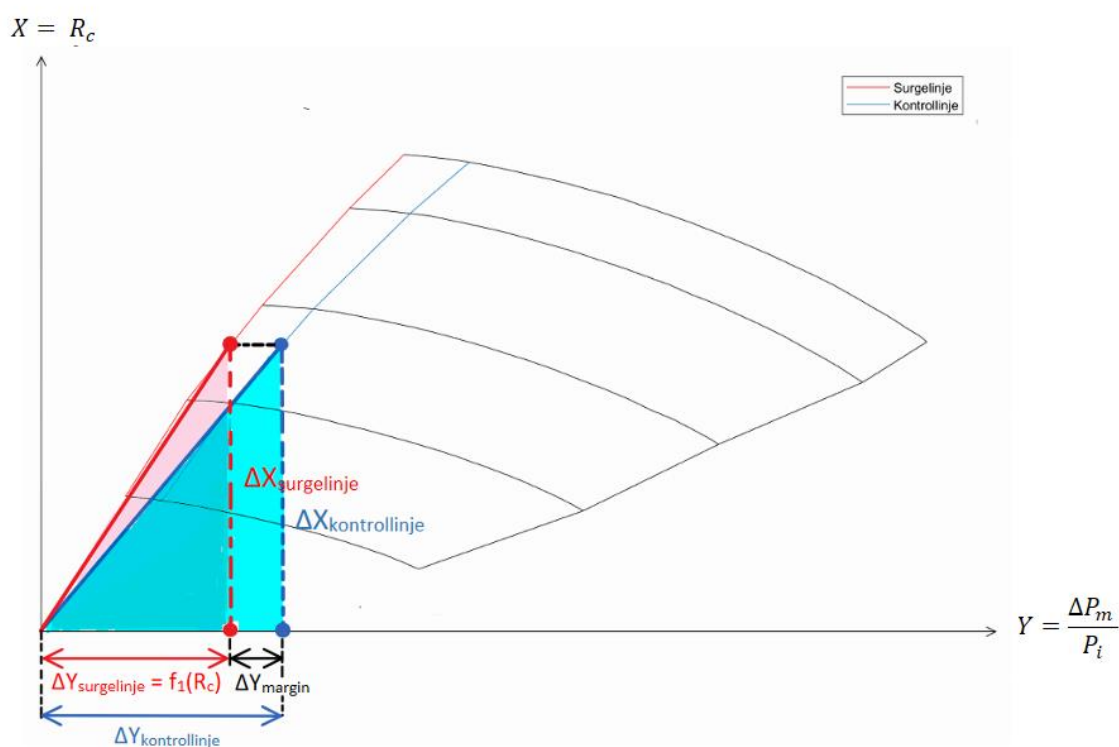
Variablene i likningene finnes som:

- $P_u$  og  $\Delta P_m$  beregnes ut fra de opptil ti utregnede verdiene for  $q_{i,redusert}^2$
- $P_i$ ,  $\sigma$  og  $\eta_p$  er oppgitt som konstanter i kompressor databladet
- $K$  er en konstant koeffisient for at  $S_s$  alltid skal være 1 på surgelinjen, denne er ofte satt til 0.5

#### 4.6. Surge kontroll margin i CCC format

Surge kontroll margin, også kalt SKM, er avstanden mellom surge- og kontrollinjen i CCC format. Sikkerhetsmarginen defineres gjennom likning 4.6.1 (CCC, 2013, s. 72). Fordi marginen er i CCC format, så er det vanskelig å visualisere seg denne avstanden direkte. Det er derimot en lineær sammenheng mellom SKM og  $\Delta Y_{margin}$ . Avstanden SKM kan dermed visualiseres ved avstanden  $\Delta Y_{margin}$  i Figur 21.

$$SKM = S_s - S \quad (4.6.1)$$



FIGUR 21: KONTROLLINJEN VED VALGT SIKKERHETSMARGIN

#### 4.6.1. Beregning av surge kontroll marginen, SKM

SKM beregnes kontinuerlig av CCC regulatoren gjennom ligning 4.6.1.2 (CCC, 2005, s. 72).

Den initielle sikkerhetsmarginen,  $b_1$ , er en konstant som må beregnes ut ifra ønsket flowmargin og plottes deretter inn i regulatoren. Tallverdien til SKM er alltid negativ. Dette er for å få riktig fortegn på avviket fra kontrollinjen, også kalt DEV. Resterende parametere i ligning 4.6.1.2 er valgfrie å bruke.

$$SKM = -b \cdot f_4(U_4) \quad (4.6.1.1)$$

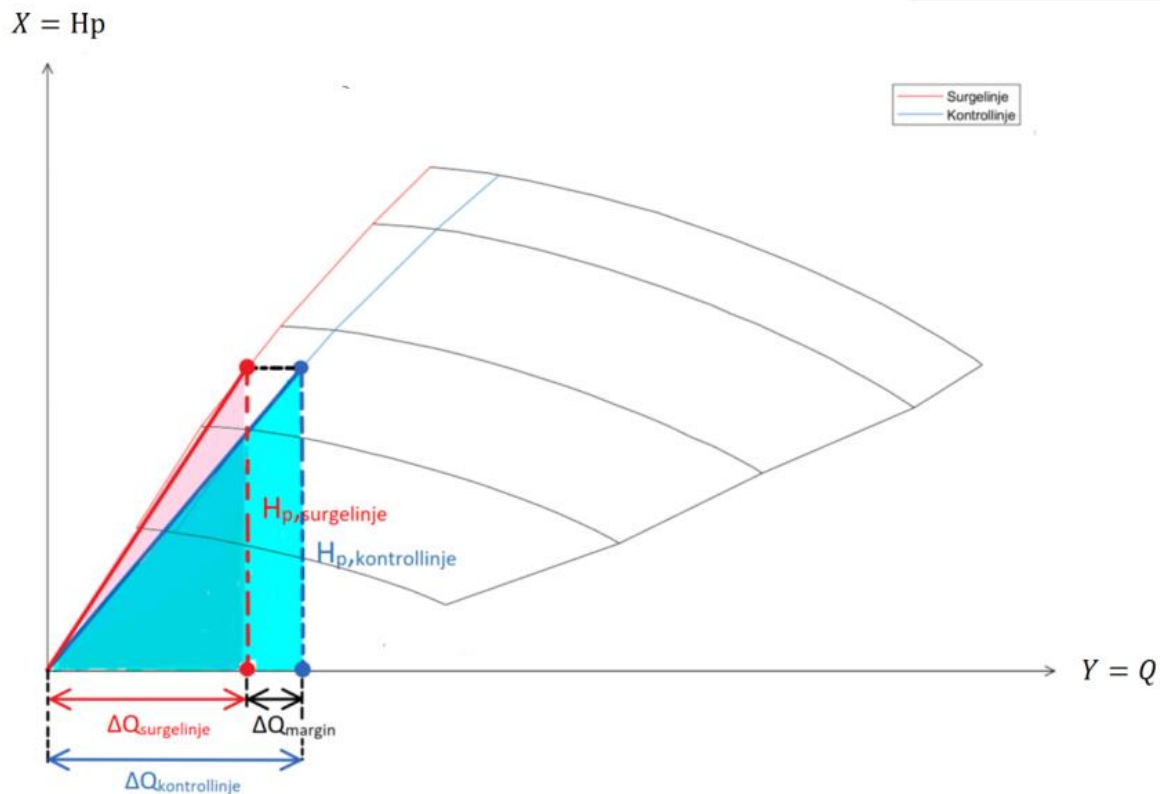
$$SKM = -(b_1 + CR_{SO} + CR_D) \cdot f_4(U_4) \quad (4.6.1.2)$$

- $b$ : Den totale sikkerhetsmarginen eller avstanden mellom surge- og kontrollinjen i CCC format.
- $b_1$ : Den initielle sikkerhetsmarginen
- $CR_{SO}$ : «Safety on response» som er en sikkerhetsfunksjon som teller antall ganger kompressoren har opplevd surge, og øker sikkerhetsmarginen for hver gang.
- $CR_D$ : «Derivative response» som er en funksjon som ser hvor raskt kompressoren beveger seg mot surge linjen og endrer sikkerhetsmarginen deretter.
- $f_4$  er en funksjon som definerer «formen» på kontrollinjen. Denne beskrives videre i kapittel 4.9.

#### 4.6.2. Valg av flow sikkerhetsmargin

Den initielle sikkerhetsmarginen,  $b_1$  bestemmes ut fra ønskelig flowmargin prosent,  $Q_{margin}\%$ .

En flowmargin prosent på 0 – 1 tilsvarer 0 – 100 % (Total Train Control, ss. 2-3).



FIGUR 22: FLOW SIKKERHETSMARGIN (TOTAL TRAIN CONTROL, s. 2)

$\Delta Q_{margin}$ , i Figur 22 bestemmes ved å velge en verdi for flowmargin prosenten,  $Q_{margin}\%$ , i ligning 4.6.2.1 (Total Train Control, s. 2). Dersom det er ønskelig med en flowmargin prosent på 10 %, så velges  $Q_{margin}\%$  som 0.1.

$$Q_{kontrollinje} = (1 + Q_{margin}\%) \cdot Q_{surgelinje} \quad (4.6.2.1)$$

#### 4.6.3. Beregning av den initielle sikkerhetsmarginen, $b_1$

Det er i hovedsak den initielle sikkerhetsmarginen,  $b_1$ , som beregnes for å bestemme avstanden mellom surgelinjen og kontrollinjen i CCC. Den initielle sikkerhetsmarginen bestemmes ut ifra hvilken flowmargin som er ønskelig mellom surge- og kontrollinjen. Nedenfor utledes uttrykket for  $b_1$ .

$$Q_{kontrollinje} = (1 + Q_{margin}\%) \cdot Q_{surgelinje} \quad (4.6.2.1)$$

$$\frac{Q_{kontrollinje}}{Q_{surgelinje}} = (1 + Q_{margin}\%)$$

$$\frac{K_m \cdot \sqrt{\frac{Z_i \cdot \tilde{R} \cdot T_i}{M}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{m, kontrollinje}}{P_i}}}{K_m \cdot \sqrt{\frac{Z_i \cdot \tilde{R} \cdot T_i}{M}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{m, kontrollinje}}{P_i}}} = (1 + Q_{margin}\%)$$

$$\frac{\Delta P_{m, surgelinje}}{\Delta P_{m, kontrollinje}} = \frac{1}{(1 + Q_{margin}\%)^2} \quad (4.6.3.1)$$

Finner et uttrykk for  $f_1(R_c)$ . Plasseringen til operasjonspunktet påvirker ikke verdien til  $b_1$  og dermed settes operasjonspunktet på surgelinjen slik at  $S_s = 1$ .

$$S_s = K \cdot \frac{f_1(R_c)}{\frac{\Delta P_{m, operasjonspunkt}}{P_i}} \quad (4.4.4)$$

$$1 = K \cdot \frac{f_1(R_c)}{\frac{\Delta P_{m, surgelinje}}{P_i}}$$

$$f_1(R_c) = \frac{\Delta P_{m, surgelinje}}{P_i \cdot K} \quad (4.6.3.2)$$

SKM skrives først om ved hjelp av ligning 4.6.1.2. Fordi det er regulatoren som utfører beregningen av SKM, så kan ikke  $b_1$  være avhengig av de andre parameterne som beskriver SKM. SKM kan dermed skrives om til  $-b_1$ .



$CR_{SO}$  og  $CR_D$  settes lik verdien null og  $f_4(U_4)$  settes lik verdien en. Forenkler ligning 4.6.3.3 ved å sette operasjonspunktet på kontrollinjen, slik at  $S = 1$ . Deretter settes ligning 4.6.3.2 inn i høyre siden av ligning 4.6.3.4. Ligning 4.6.3.1 settes inn i ligning 4.6.3.5.

$$SKM = S_s - S \quad (4.6.1)$$

$$-(b_1 + CR_{SO} + CR_D) \cdot f_4(U_4) = S_s - S$$

$$-b_1 = S_s - S \quad (4.6.3.3)$$

$$-b_1 = K \cdot \frac{f_1(R_c)}{\frac{\Delta P_{m, kontrollinje}}{P_i}} - 1 \quad (4.6.3.4)$$

$$b_1 = 1 - \frac{\frac{\Delta P_{m, surgelinje}}{P_i \cdot K}}{\frac{\Delta P_{m, kontrollinje}}{P_i}}$$

$$b_1 = 1 - \frac{\Delta P_{m, surgelinje}}{\Delta P_{m, kontrollinje}} \quad (4.6.3.5)$$

$$b_1 = 1 - \frac{1}{(1 + Q_{margin} \%)^2} \quad (4.6.3.6)$$

## 4.7. Avstand til kontrollinjen i CCC format

Kontrollinjen blir beregnet ut ifra surgelinjen ved å legge til en sikkerhetsmargin.

Kontrollinjen fungerer som setpunktet til antisurge regulatoren. Dersom operasjonspunktet overstiger kontrollinjen åpnes reguleringsventilen for å motvirke at operasjonspunktet beveger seg ytterligere mot surgelinjen.

Avstand til kontrollinjen har mye likheter med avstand til surge. Denne variabelen beskriver avstanden mellom operasjonspunktet og kontrollinjen. Avstand til kontrollinjen, også kalt  $S$  kan også defineres som differansen mellom avstand til surge og surge kontroll marginen.

Avstand til kontrollinjen er beskrevet i forhold til  $S_s$  som er avhengig av fA modus. Dermed er avstand til kontrollinjen indirekte avhengig av fA modus. I formelen er det tatt utgangspunkt i fA modus 31.

$$S = S_s - SKM \quad (4.7.1)$$

$$S = K \cdot \frac{f_1(R_c)}{\frac{\Delta P_m}{P_i}} - SKM \quad (4.7.2)$$

S vil på lik linje med  $S_s$  ha verdier som følger:

- $S < 1$ : *Normal situasjon. Operasjonspunktet er til høyre for kontrollinjen.*
- $S = 1$ : *Optimal situasjon. Operasjonspunktet til regulatoren treffer kontrollinjen.*
- $S > 1$ : *Kritisk situasjon. Operasjonspunktet er til venstre for kontrollinjen.*

#### 4.8. Avviket fra kontrollinjen i CCC format

CCC kaller avviket mellom et operasjonspunkt og kontrollinjen for «DEV» og er definert av ligning 4.8.1 (CCC, 2005, s. 72). Avviket er positivt når operasjonspunktet er til høyre for kontrollinjen, null når operasjonspunktet er på kontrollinjen, og blir negativ når operasjonspunktet er til venstre for kontrollinjen. (CCC, 2013, s. 11)

$$DEV = 1 - S \quad (4.8.1)$$

$$DEV = 1 - S_s + SKM \quad (4.8.2)$$

$$DEV = 1 - S_s - (b_1 + CR_{SO} + CR_D) \cdot f_4(U_4) \quad (4.8.3)$$

Regulatoren endrer utgangen etter avviket fra kontrollinjen. Antisurge reguleringsventilen skal være helt stengt så lenge DEV er null eller mindre.

## 4.9. fA modus

CCC antisurge regulatorene kan konfigureres for mange forskjellige moduser. Modusene kalles for «fA modes» av CCC.

Modusene krever ulik grad av feltinstrumentering. De mest primitive modusene krever kun differansetrykks transmitter over kompressor og mengdemåler, mens andre moduser krever innløps- og utløpstemperatur, samt turtallsmåler i tillegg. Tabell 1 viser hvilke transmittere som kreves ved de mest brukte fA modusene.

fA	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH72
1	$\Delta P_m$	$\Delta P_{ui}$					
2	$\Delta P_m$	$\Delta P_{ui}$					
31	$\Delta P_m$	Pu	Pi				
33	$\Delta P_m$	Pu	Pi				
34	$\Delta P_{m,ss}$	Pu	Pss	N		Pi-	
35	$\Delta P_{m,ss}$	Pss	Pi	N			
51	J	Pu	Pi	N			
61	$\Delta P_{m,i}$	Pu	Pi				
63	$\Delta P_{m,u}$	Pu	Pi		Tu	Ti	
65	$\Delta P_{m,i}$	Pu	Pi		Tu	Ti	
67	$\Delta P_{m,u}$	Pu	Pi		Tu	Ti	
68	$\Delta P_{m,ek}$	Pu	Pi		Tu	Ti	Tek

**TABELL 1: OVERSIKT OVER DE FORSKJELLIGE fA MODUSENE (CCC, 2005, s. 151)**

Felles for alle fA modus er at de tar utgangspunkt i algoritmen i ligning 4.8.1 (CCC, 2005, s. 63). De forskjellige modusene bruker derimot forskjellige enheter på aksene til kompressorkartet i CCC format.

$$S_s = K \cdot \frac{f_1(R_c) \cdot f_5(U_5) \cdot f_3(N)}{\frac{\Delta P_m}{P_i}} \quad (4.8.1)$$

Variablene i  $S_5$  kan forklares slik:

- $K$  er en kalibrerings koeffisient som normalt settes til 0.5. Dette for å ha en enkel justering av surgelinjen i begge retninger i ettertid.
- $f_1(R_c)$ , også kalt «Y Coordinate Characterizer», definerer surgelinjen ved hjelp av opptil 10 x- og y-koordinater.

#### 4.9.1. $f_5(U_5)$ , «General Characterizer»

Dette er en generell funksjon som endrer surgelinjen. Formålet med funksjonen kan være flere, men det er i hovedsak tre ting den kan bli brukt til (Gerardus Johannes De Boer, 2018):

- Endre variabel på x-aksen
- Øke nøyaktigheten på avstand til surge gjennom å innføre en ekstra variabel
- Settes konstant for å øke verdiene ved veldig lave strømminger eller kompresjonsforhold.

Argumentet som blir brukt i funksjonen er valgfri. Polytropeksponenten kan brukes som variabel, eller en av de 7 inngangskanalene i regulatoren. I Statoil er det mest vanlige er å sette  $f_5$  lik en konstant verdi (Gerardus Johannes De Boer, 2018).

$f_5$  er definert som en simpel inversfunksjon, slik at om variabelen eksempelvis er polytropeksponenten, så er funksjonen som vist i ligning 4.8.3 (CCC, 2005, s. 53).

$$\sigma = \frac{1}{f_5(\sigma)} \quad (4.8.2)$$

$$f_5(\sigma) = \sigma^{-1} \quad (4.8.3)$$

Et eksempel for bruksområdet til  $f_5(U_5)$  er en kompressor på Troll feltet i Nordsjøen. Der ble funksjonen brukt for å skille mellom om kompressoren komprimerer naturgass eller nitrogen (Gerardus Johannes De Boer, 2018).

#### 4.9.2. $f_3(N)$ , «X-Coordinate Characterizer»

Dette er en funksjon som bruker turtallet til å bedre nøyaktigheten til surgelinjen. Utrykket for funksjonen er vist i ligning 4.9.2.1. Det mest vanlige er derimot å sette funksjonen lik en konstant verdi. Dersom turtallsmålingen brukes så er det vanlig at «reduisert strømming kvadrert» er valgt som y-akse. I noen fA modus så brukes derimot funksjonen til å beregne hvordan redusert effekt endres som funksjon av turtallet (CCC, 2005, s. 53).

$$f_3(N) = N \quad (4.9.2.1)$$

Dersom det er ønskelig å kompensere for effekttapet i kompressoren, så kan funksjonen alternativt defineres gjennom ligning 4.9.2.2 (CCC, 2005, s. 53). Utrykket sier hvor mye den virkelige effekten til kompressoren endres med turtallet.

$$f_3(N) = N \cdot \frac{J_{tilført}}{J_{virkelig}} \quad (4.9.2.2)$$

#### 4.9.3. fA modus 31

Det er mye likt mellom fA modus 31 og UPC standarden, beskrevet i kapitel 4.2.

Koordinatsystemet består av kompresjonsforholdet og «reduisert strømming kvadrert» på aksene.

$$f(x) = y$$

$$f(R_c) = q_{i,redusert}^2 \quad (4.9.3.1)$$

fA modus 31 er den enkleste og mest generelle modusen. Andre fA moduser bygger videre på denne, men benytter flere sensorer i tillegg. Avstand til surge ved fA modus 31 er definert gjennom ligning 4.9.3.2 (CCC, 2005, s. 158).

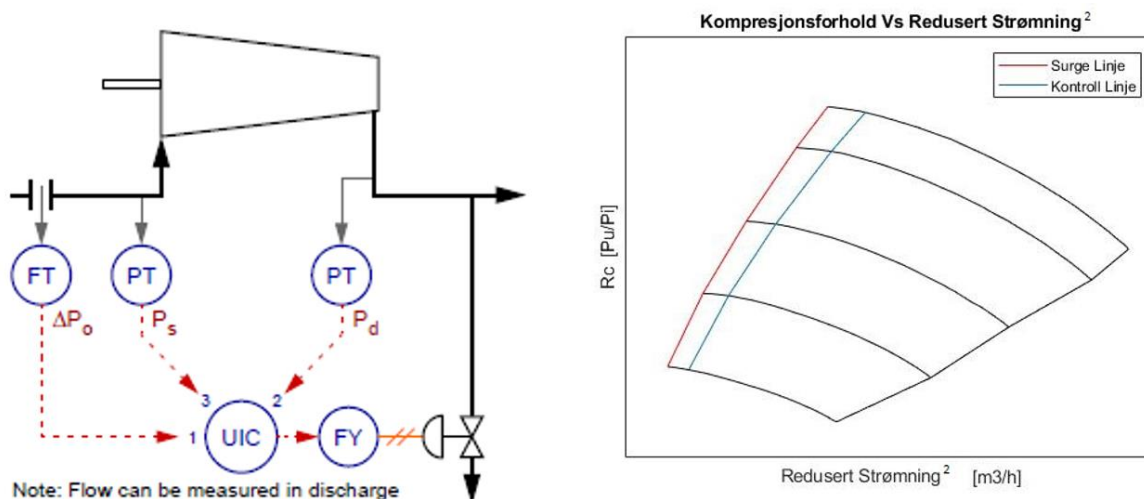
$$S_{s,fA31} = K \cdot \frac{f_{1,fA31}(R_c)}{\frac{\Delta P_m}{P_i}} \quad (4.9.3.2)$$

Operasjonspunktet plasseres på surgelinjen slik at verdien til  $S_{s,fA31}$  er lik 1. Dermed kan surgelinjen finnes gjennom ligning 4.9.3.3 og 4.9.3.4.

$$f_1(X): \quad f_{1,fA31}(R_c) = \frac{1}{K} \cdot \frac{\Delta P_m}{P_i} \quad (4.9.3.3)$$

$$X: \quad R_c = \frac{P_u}{P_i} \quad (4.9.3.4)$$

Instrumenteringen og deres inngangskanal på regulatoren ved fA modus 31 vises i Figur 23. Kompressorkartet ved modusen vises også i samme figur.



FIGUR 23: INSTRUMENTERING OG KOMPRESSORKART VED fA MODUS 31 (CCC, 2005, s. 158)

#### 4.9.4.fA modus 61

fA modus 61 består koordinatsystemet av kompresjonsforholdet og «reduert strømning kvadrert» på aksene og er veldig lik fA mode 31.

$$f(x) = y$$

$$f(R_c) = q_{i,redusert}^2 \quad (4.9.4.1)$$

fA modus 61 skiller seg ut fra fA mode 31 ved at den inkluderer funksjonen  $f_5(U_5)$  som er beskrevet i kapitel 4.9.1 Avstand til surge ved fA modus 61 er definert av ligning 4.9.4.2 (CCC, 2005, s. 178).

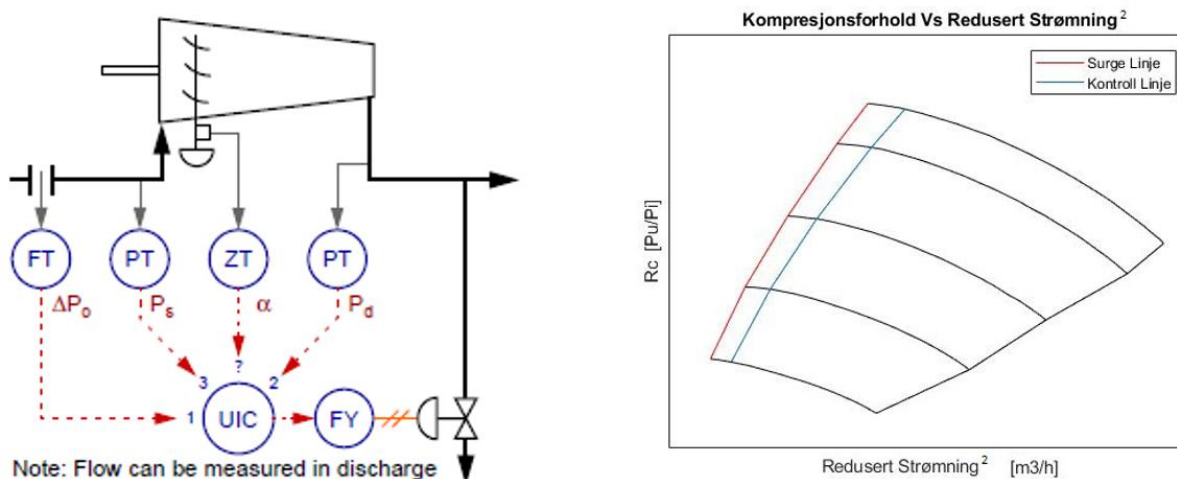
$$S_{s,fA61} = K \cdot \frac{f_{1,fA61}(R_c) \cdot f_5(U_5)}{\frac{\Delta P_m}{P_i}} \quad (4.9.4.2)$$

Operasjonspunktet plasseres på surgelinjen slik at verdien til  $S_{s,fA61}$  er lik 1. Dermed kan surgelinjen finnes gjennom ligning 4.9.4.3 og 4.9.4.4.

$$f_1(X): \quad f_{1,fA61}(R_c) = \frac{1}{K \cdot f_5(U_5)} \cdot \frac{\Delta P_m}{P_i} \quad (4.9.4.3)$$

$$X: \quad R_c = \frac{P_u}{P_i} \quad (4.9.4.4)$$

Instrumenteringen og deres inngangskanal på regulatoren ved fA modus 61 vises i Figur 24. Kompresorkartet ved modusen vises også i samme figur.



FIGUR 24: INSTRUMENTERING OG KOMPRESORKART VED FA61 (CCC, 2005, s. 176)

#### 4.9.5.fA modus 51

fA modus 51 skiller seg tydelig fra fA mode 31 og 61. Modusen benytter et koordinatsystem med aksene kompresjonsforhold og redusert effekt som vist i ligning 4.9.5.1 (CCC, 2005, s. 173).

$$f(x) = y$$

$$f(R_c) = j_{\text{redusert}} \quad (4.9.5.1)$$

Modusen inkluderer både  $f_5(U_5)$  og  $f_3(N)$ . Avstand til surge ved fA modus 51 er definert av ligning 4.9.5.2 (CCC, 2005, s. 173).

$$S_{s,fA51} = K \cdot \frac{f_{1,fA51}(R_c) \cdot f_3(N) \cdot P_i \cdot f_5(U_5)}{J} \quad (4.9.5.2)$$

Redusert effekt er y-aksen på kompressorkartet og er definert gjennom ligning 4.9.5.3 (CCC, 2005, s. 173).

$$j_{\text{redusert}} = \frac{J}{N \cdot P_i} \quad (4.9.5.3)$$

Utrykket for redusert effekt gjennom ligning 4.9.2.1 gjør at  $f_3(N)$  kan antas å være lik argumentet,  $N$  (CCC, 2005, s. 173).

$$f_3(N) = N \quad (4.9.2.1)$$

Som nevnt i kapittel 4.9.1, så er  $f_5(U_5)$  ofte valgt som en konstant verdi, men kan også settes til en valgfri variabel. Dersom kompressoren har betydelig effekttap, så kan  $f_5(J)$  kombinert med  $f_3(N)$  brukes til å beskrive netto energiforbruk gjennom ligning 4.9.5.3 (CCC, 2005, ss. 174, 53).

$$f_5(J) = \frac{J}{J_{\text{virkelig}}} \quad (4.9.5.3)$$



Utrykket for fA mode 51 kan dermed skrives om ved å sette ligning 4.9.2.1 og 4.9.5.3 inn i ligning 4.9.5.4.

$$S_{s,fA51} = \frac{K \cdot f_{1,fA51}(R_c) \cdot N \cdot P_i}{J_{\text{virkelig}}} \quad (4.9.5.4)$$

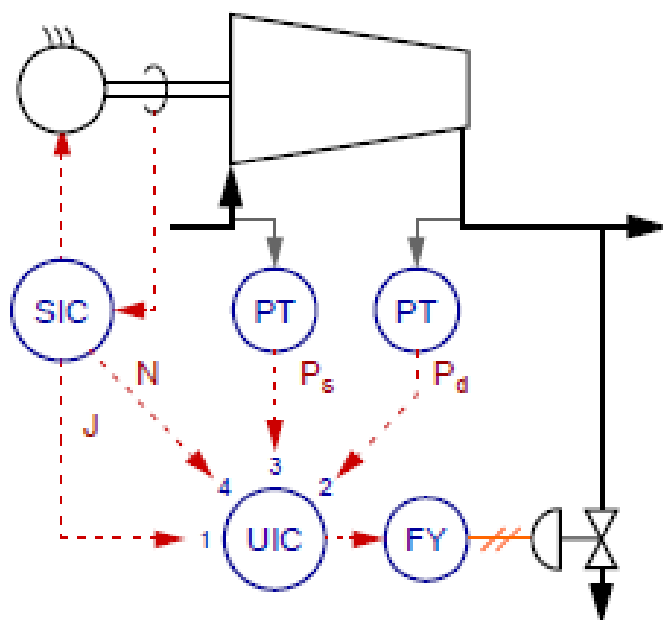
$$S_{s,fA51} = K \cdot \frac{f_{1,fA51}(R_c)}{j_{\text{virkelig, redusert}}}$$

Operasjonspunktet plasseres på surgelinjen slik at  $S_{s,fA51}$  er lik 1. Dermed kan surgelinjen finnes gjennom ligning 4.9.5.6 og 4.9.5.7.

$$f_1(X): \quad f_{1,fA51}(R_c) = \frac{1}{K} \cdot j_{\text{virkelig, redusert}} \quad (4.9.5.6)$$

$$X: \quad j_{\text{virkelig, redusert}} = \frac{J_{\text{virkelig}}}{N \cdot P_i} \quad (4.9.5.7)$$

Instrumenteringen og deres inngangskanal på regulatoren ved fA modus 51 vises i Figur 25.



FIGUR 25: INSTRUMENTERING SOM BRUKES VED FA MODUS 51 (CCC, 2005, s. 173)

#### 4.9.6.fA modus 68

Denne modusen benytter samme koordinatsystem som fA mode 31 og 61. Koordinatsystemet består av aksene «reduisert løftehøyde» og «reduisert strømnings ved innløp kvadrert» som vist i ligning 4.9.6.1 (CCC, 2005, s. 189).

$$f(x) = y$$

$$f(h_{\text{reduisert}}) = q_{i,\text{reduisert}}^2 \quad (4.9.6.1)$$

fA modus 68 er den modusen som krever størst antall sensorer. I tillegg er en kjøler installert nedstrøms kompressoren og strømningsmåleren plasseres nedstrøms kjøleren igjen. Modusen inkluderer både  $f_5(U_5)$  og  $f_3(N)$ . Avstand til surge ved fA modus 68 er definert av ligning 4.9.6.1 (CCC, 2005, s. 189).

$$S_{s,fA68} = K \cdot \frac{f_{1,fA68}[h_{\text{reduisert}} \cdot f_3(0)] \cdot f_5(U_5) \cdot \frac{P_i^2 \cdot T_{ek}}{T_i \cdot P_u}}{\Delta P_{m,ek}} \quad (4.9.6.1)$$

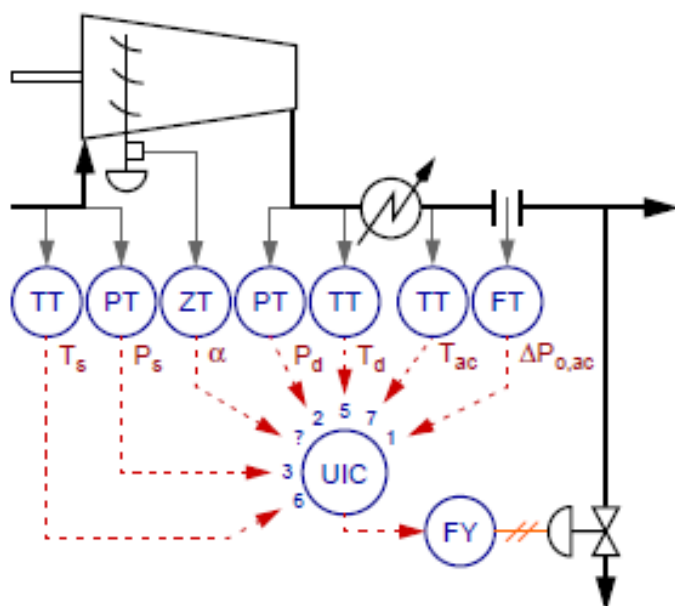
Trykket etter kjøleren,  $P_{ek}$ , er skrevet om til  $P_u$  ved å anta at differensialtrykket over kjøleren er neglisjerbart. Siden strømningsmålingen er nedstrøms både kompressoren og kjøleren, må strømmingen ganges med en koeffisient for å få den ekvivalente strømmingen i innløpet (CCC, 2005, s. 190) Kun det første punktet i «X-Coordinate Characterizer» funksjonen brukes, som  $f_3(0)$ .

Operasjonspunktet plasseres på surgelinjen slik at verdien til  $S_{s,fA68}$  er lik 1. Dermed kan surgelinjen finnes gjennom ligning 4.9.6.2 og 4.9.6.3.

$$f_1(X): \quad f_{1,fA68}[h_{\text{reduisert}} \cdot f_3(0)] = \frac{1}{K \cdot f_5(U_5)} \cdot \frac{\Delta P_{m,ek} \cdot T_i \cdot P_u}{P_i^2 \cdot T_{ek}} \quad (4.9.6.2)$$

$$X: \quad h_{\text{reduisert}} \cdot f_3(0) = \frac{(R_c^\sigma - 1)}{\sigma} \cdot f_3(0) \quad (4.9.6.3)$$

Instrumenteringen og deres inngangskanal på regulatoren ved fA modus 68 vises i Figur 26.



FIGUR 26: INSTRUMENTERING SOM BRUKES VED FA MODUS 68 (CCC, 2005, s. 189)

#### 4.9.7. $f_2(R_c)$ , «Reported Flow Characterizer»

$f_2$  er en funksjon som brukes til å regne ut ekvivalent strømming når det er flere kompressor steg (dermed også flere antisurge regulatorer) i serie. Funksjonen skalerer den mottatte strømmingen fra en regulator på et ned- eller oppstrøms kompressorsteg før den brukes i regulatoren. Dette er avhengig av hvor i systemet strømningsmåleren er plassert. Oppgaven går ikke i dybden på seriekoblede kontrollere i denne oppgaven.

#### 4.9.8. $f_4(U_4)$ , «Control Line Characterizer»

Dette er en funksjon som definerer formen på kontrollinjen som nevnt i kapittel 4.6.1. Funksjonen brukes dersom det er ønskelig å endre formen på kontrollinjen slik at den har en annen form enn surgelinjen. Eksempelvis kan det være gunstig å bruke funksjonen dersom kompressoren er mer ustabil på høyere turtall enn lave. Funksjonen kan være definert som en konstant, men kan også være en valgfri variabel, på samme måte som  $f_5$ , beskrevet i kapittel 4.9.1. Oppgaven går ikke i dybden på denne funksjonen, da denne blir valgt eksperimentelt.

## 4.10. fD mode

«fD mode» eller også kalt «fallback strategies» er flere metoder å forsikre seg om at kompressoren fortsatt er beskyttet mot surge dersom man mister en eller flere målinger som er nødvendig for å opprettholde reguleringen. Hver fA modus har forskjellige mulige fD moduser. Nedenfor er to eksempel på fD moduser som er tilgjengelige i alle fA moduser.

fD 31 er en modus som heter «Default Output Fallback». Dersom kompressoren mister signalet på strømningsmålingen, så fryses utgangsverdien til antisurge regulatoren.

Utgangsverdien vil da være lik den siste verdien før feilen oppstod (CCC, 2005, s. 159).

fD 32 er en modus som heter «Minimum Flow Fallback». Denne virker slik at dersom kompressoren mister signalet på innløpstrykket, struper kontrolleren ned kompressoren til det som er satt som minimum strømning (CCC, 2005, s. 159).

## 5. Omregning mellom formater

### 5.1. Utfordring med forskjellige formater

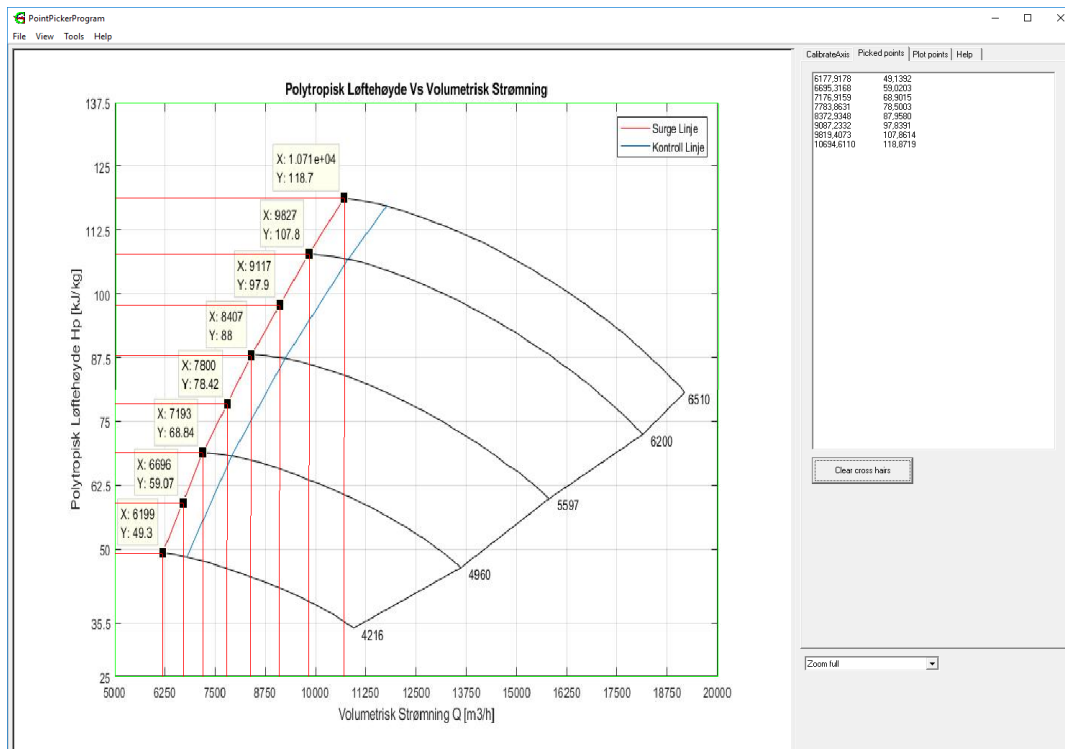
Et kjent problem er at kompressorkartene fra kompressorleverandøren opererer i andre formater enn det leverandøren av antisurge regulatoren bruker i sine beregninger.

Utfordringen er å konvertere fra kompressorleverandørens format til antisurge regulatorens format riktig og vise versa. For å kunne utføre beregningene riktig kreves det spesialkunnskap til antisurge regulatoren som er levert med kompressoren, men også kunnskap til termodynamikk. Beregningene tar også mye tid dersom de utføres manuelt.

### 5.2. Digitalisering av kompressorkart gitt av leverandør

Nyere kompressorkart inneholder som regel en tabell med verdier i tillegg til kompressorkartet, men gamle kompressorkart inneholder typisk et eller flere kompressorkart.

Dersom kompressorkartet ikke inneholder en tabell med verdier så må verdiene leses av fra grafene i kompressorleverandørens kompressorkart. For å få god nøyaktighet så kan det brukes et verktøy som er designet for formålet. Et eksempel på et slikt verktøy er «Pointpicker», som henter ut nøyaktige verdiene fra punkt som velges i kompressorkartet. Verdiene fra «Pointpicker» brukes deretter videre til å beregne surgelinjen i CCC format. Figur 27 viser et skjermbilde fra «Pointpicker» programmet med åtte sett avleste verdier. Disse verdiene kan brukes videre til å beregne surgelinjen i CCC format. Verdiene brukes som input i tabellen «Avleste verdier fra kompressorkart» i Figur 30 dersom surgelinjen skal beregnes av Matlab programmet.



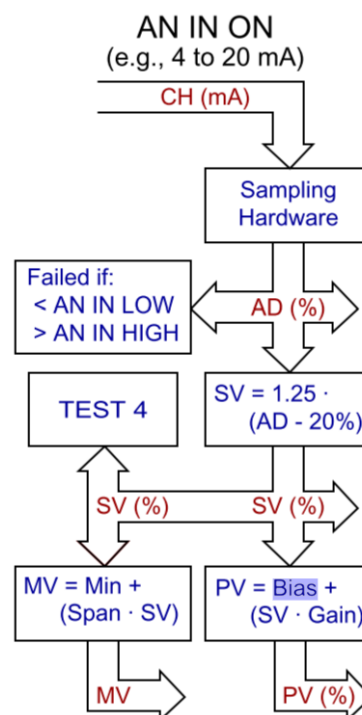
FIGUR 27: SKJERMBILDET FRA POINTPICKER PROGRAMMET (LARS ARNE AGA, STATOIL)

### 5.3. Prosessering av analoge inngangssignaler

Regulatorene til CCC har flere inngangskanaler som kan benyttes. Disse inngangskanalene kan settes opp som 4 - 20 mA eller 0 - 5 VDC innganger (CCC, 2005, s. 38). I denne oppgaven brukes kun 4 – 20 mA som eksempel, da det er den mest vanlige signalformen i olje- og gassindustrien.

#### 5.3.1. Analog til digital variabel

Det analoge mA inngangssignalet blir samlet til diskrete verdier og konvertert til ekvivalente digitale verdier gjennom en analog til digital konverter, også kalt A/D konverter. Dette gjøres for at en CPU kan prosessere informasjonen. Ut av A/D konverteren kommer et A/D signal som beskriver hvor mange prosent av det absolutte måleområdet målesignalet er på. Eksempelvis så tilsvarer 20 mA 100 %FS (full scale) mens 4 mA tilsvarer 20 %FS (CCC, 2005, s. 39). Figur 28 viser at verdien til A/D signalet brukes videre til transmittertesting og generering av signal variablene.



FIGUR 28: ANALOG TIL DIGITAL PROSESSERING (CCC, 2005, s. 38)

#### 5.3.2. Transmittertesting

Etter at signalet har blitt prosessert av ei CPU så sammenlignes hver AD variabel mot sine alarmgrenser. Ved et 4 – 20 mA signal så kan eksempelvis en verdi under 3 mA indikere sløyfebrudd, mens en verdi over 21 mA kan indikere kortslutning. En alarm genereres når signalet går utenfor sitt definerte område (CCC, 2005, s. 39).

#### 5.3.3. Signal variabel, SV

Hver A/D variabel konverteres om til sin egen signal variabel, SV som vist i Figur 28. SV verdien beskriver hvor mange prosent av måleområdet signalet er på, der 4 – 20 mA har et målområde på 16 mA (CCC, 2005, s. 39). Ligning 5.3.3.1 viser hvordan SV verdien kan regnes ut. Et signal på 4 mA har eksempelvis en SV verdi på 0 %, mens et 8 mA signal har en SV verdi på 25 %.

$$SV [\%] = \frac{Måleverdi - \text{offset}}{Måleområdet} \cdot 100 \quad (5.3.3.1)$$

#### 5.3.4. Prosess variabel, PV

Etter at fA modus er valgt, så vet regulatoren hvilke inngangssignaler som representerer et trykksignal, turtallssignal osv. Dersom flere trykktransmittere brukes ved den valgte modusen, så må målesignalet til transmitterne skaleres i forhold til hverandre. Signal variablene gjøres dermed om til prosess variable, PV, ved hjelp av gain og bias. PV verdien er definert gjennom ligning 5.3.4.1 (CCC, 2005, s. 40).

$$PV [\%] = Gain \cdot SV + Bias \quad (5.3.4.1)$$

#### 5.3.5. Gain og Bias

Gain til et inngangssignal beskriver gjennom ligning 5.3.5.1 hvor stort måleområdet til transmitteren er i forholdet den høyeste absoluttverdien som målesignalet kan ha. Men dersom flere transmittere med samme måleenhet brukes, så gjelder den høyeste absoluttverdien som noen av disse kan ha (CCC, 2005, s. 40).

$$Gain = \frac{Måleområdet}{Maks. absoluttverdi} \quad (5.3.5.1)$$

Bias beskriver gjennom ligning 5.3.5.2 hvor mange prosent offset hvert enkelt målesignal har i forhold til den høyeste absoluttverdien transmitteren kan ha. Dersom det er flere transmittere med samme måleenhet, så gjelder den høyeste absoluttverdien av disse (CCC, 2005, s. 40).

$$bias [\%] = \frac{Offset}{Maks. absoluttverdi} \cdot 100 \quad (5.3.5.2)$$



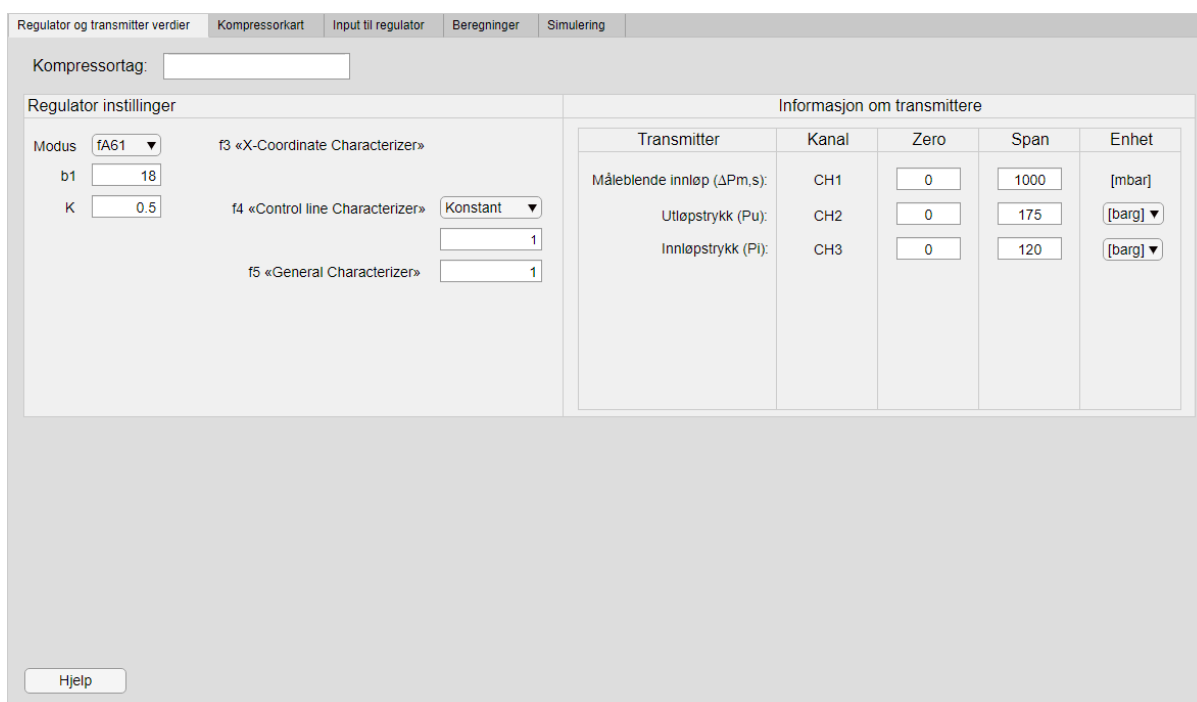
## 6. Produkt

Produktet til denne bachelor rapporten er et program laget i Matlab 2018. Programmet skal gjøre alle de nødvendige beregningene for at ingeniøren skal raskt og enkelt kunne plote CCC surge- og kontrollinjen ut ifra kompressordatabladet, samt å kunne simulere et datapunkt i kartet.

Programmet har vært «hovedoppgaven» og har underveis fått utvidet funksjonalitet utover hva oppgaven gikk ut på. Det har blitt innhentet forslag og ønsker fra flere ingeniørgrupper i Statoil som jobber med kompressorer for å øke sannsynligheten til at produktet blir brukt og eventuelt videreutviklet.

### 6.1. Matlab program

#### 6.1.1. Regulator og transmitter verdier



Regulator instillinger		Informasjon om transmittere					
Modus	fA61	f3 «X-Coordinate Characterizer»	Transmitter	Kanal	Zero	Span	Enhet
b1	18	f4 «Control line Characterizer»	Måleblende innløp ( $\Delta P_{m,s}$ ):	CH1	0	1000	[mbar]
K	0.5	Konstant	Utløpstrykk (Pu):	CH2	0	175	[barg]
		1	Innløpstrykk (Pi):	CH3	0	120	[barg]
		f5 «General Characterizer»					
		1					

**FIGUR 29: SKJERMBILDET FRA FANEN SOM INNEHOLDER REGULATOR- OG TRANSMITTERVERDIER.**

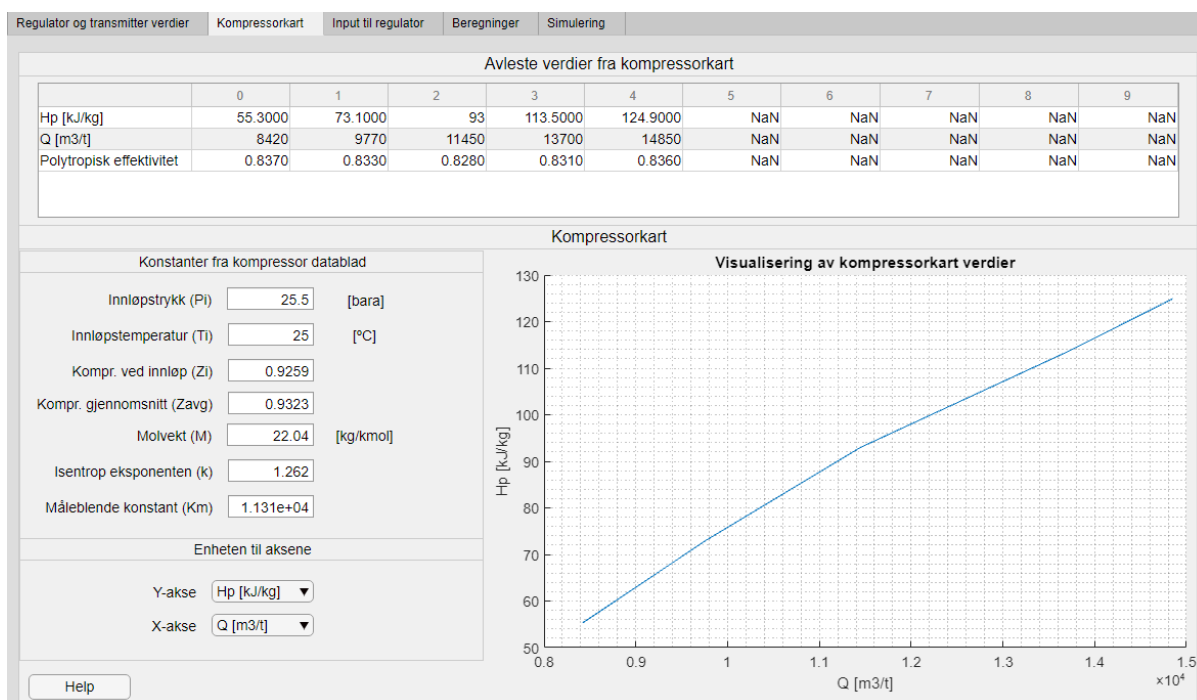
Figur 29 viser skjermbildet fra første side i programmet. Øverst i bildet skrives løpenummeret til kompressoren som jobbes på, heretter kalt tag nummer. Tag nummeret blir navnet på fanen i Excel rapporten når den genereres.

I ruten for «Regulatorinnstillinger» velges først riktig fA modus. fA modus velges etter hvilke feltmålinger som er installert rundt kompressoren. For å øke brukervennligheten til programmet skjules informasjon fra transmittere som ikke er aktuelle ved valgt fA modus. Det samme gjelder for «characterizerene» ved aktuell fA modus.

Nedenfor velges verdi for  $b_1$ . Det er naturlig at sikkerhetsmarginen bestemmes ved å velge en flowmargin prosent,  $Q_{margin}\%$ . Statoil ønsket derimot å bruke sikkerhetsmarginen i CCC format,  $b_1$ , som input i stedet for  $Q_{margin}\%$ . K kan velges, men settes som regel lik 0.5. f3, f4 og f5 kan så velges ved aktuell fA modus.

På høyre side i ruten «Informasjon om transmittere» settes de aktuelle nullpunkt og måleområdet til alle transmitterne. Her vises kun de nødvendige transmittere for valgt fA modus. Antall og navn på de ulike kanalene varierer i henhold til Tabell 1.

## 6.1.2. Kompressorkart



FIGUR 30: VERDIER FRA KOMPRESSORKARTET OG KOMPRESSORDATABLADET

Siden «Kompressorkart» er hvor alle verdier fra kompressorens datablad settes inn. Alle konstantene settes inn i «Konstanter fra kompressor datablad».

I «Enheten til aksene» velges det hvilke akser man har oppgitt i databladet. Valgene her er Polytropisk løftehøyde, Utløpstrykk eller Kompresjonsforhold på Y-aksen og Volumetrisk strømning eller Massestrøm på X-aksen. De øvrige aksevalgene blir kalkulert og kan leses av, ref. Figur 33.

Øverst på siden i tabellen «Avleste verdier fra kompressorkart» skrives de opptil 10 avleste punktene inn ut ifra kompressorkartet. En graf plottes automatisk ut fra punktene for å visualisere verdiene og for å kunne sammenligne grafen opp mot kompressorkartet.

### 6.1.3. Input til regulator

Regulator og transmitter verdier										
f1(Y) «Y-Coordinate Characterizer»										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f1 X0	1.6415	1.9017	2.2274	2.6065	2.8390	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
f1 f(X)	1.8740	2.5231	3.4654	4.9611	5.8290	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
f3(N) «X-Coordinate Characterizer»										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f3 X0	0	0.1110	0.2220	0.3330	0.4440	0.5560	0.6670	0.7780	0.8890	1
f3 f(X)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
f5(U5) «General Characterizer»										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f5 X0	0	0.1110	0.2220	0.3330	0.4440	0.5560	0.6670	0.7780	0.8890	1
f5 f(X)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Input variabler til regulatoren			
fA Modus	Kanal	Gain	Bias
fA61	CH1	1.0	0.0 [%]
b1	CH2	1.0	0.6 [%]
K	CH3	0.7	0.6 [%]
	CH4		
	CH5		
	CH6		
	CH7		

Navn:	<input type="text"/>	<input type="button" value="Beregne"/>	<input type="button" value="Lagre"/>
<input type="button" value="Help"/>			

**FIGUR 31: BEREGNEDE VERDIER SOM BRUKES SOM INPUT I REGULATOREN**

Siden «Input til regulator» viser de ferdig beregnede verdiene som kan implementeres i CCC regulatoren. Når de to første fanene er utfylt betjenes knappen «Beregne». Deretter beregner programmet verdiene av f1, f3 og f5 samt gain og bias for alle transmitterne.

Under «Beregne» knappen i Figur 31 kan alle beregnede data eksporteres til et enkelt Excel ark. I ruten «Navn:» velges navnet på filen, og knappen «Lagre» lagrer Excel filen. Filen

lagres på samme lokasjon som programfilen ligger. Et eksempel på Excel rapport vises i Figur 32.

	A	B	C	D	E	F	G
1	i						
2	famode	fA61	Pi [bara]	25,500			
3	b1	18,000	Ti [°C]	25,000			
4	K	0,500	Zi	0,926			
5			Zavg	0,932			
6			M [kg/kmol]	22,040			
7			k	1,262			
8			Km	11308,600			
9			rho,i	24,486			
10	b						
11	Pu [bara]	41,859	48,494	56,799	66,467	72,394	
12	deltaPm [mbar]	135,746	182,765	251,024	359,373	422,237	
13	Tu [°C]	64,000	76,801	91,301	105,623	113,191	
14	Hp [kJ/kg]	55,300	73,100	93,000	113,500	124,900	
15	w [kg/t]	206173,825	239230,198	280367,018	335460,974	363620,107	
16	Q [m3/t]	8420,000	9770,000	11450,000	13700,000	14850,000	
17	Q [Sm3/t]	221614,712	257146,762	301364,425	360584,508	390852,551	
18	ηp	0,837	0,833	0,828	0,831	0,836	
19	i						
20	f1 X0	1,642	1,902	2,227	2,607	2,839	
21	f1 f(X)	1,874	2,523	3,465	4,961	5,829	
22	BIAS:1	0,000	GAIN:1	1,000			
23	BIAS:2	0,576	GAIN:2	0,994			
24	BIAS:3	0,576	GAIN:3	0,682			
25	BIAS:4	0,000	GAIN:4	0,000			
26	BIAS:5	0,000	GAIN:5	0,000			
27	BIAS:6	0,000	GAIN:6	0,000			
28	BIAS:7	0,000	GAIN:7	0,000			

FIGUR 32: EXCEL RAPPORT

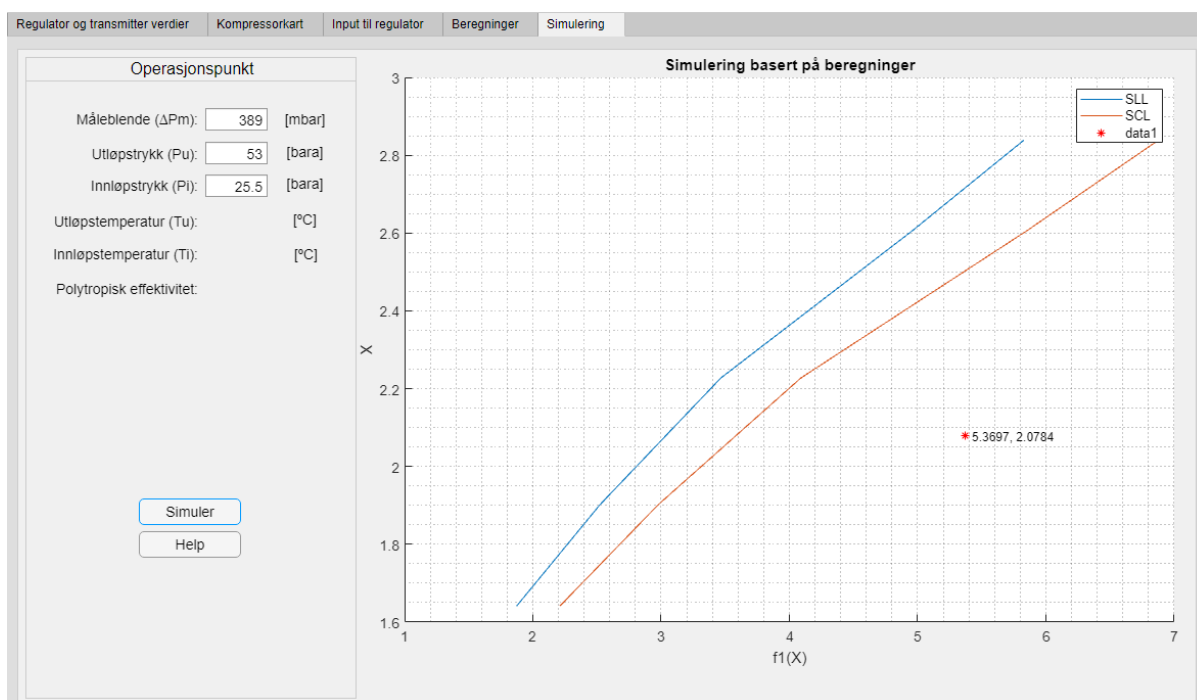
## 6.1.4. Beregninger

Beregnete verdier										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pu [bara]	41.8586	48.4945	56.7985	66.4669	72.3941	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
deltaPm [mbar]	135.7463	182.7649	251.0237	359.3725	422.2374	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
Tu [°C]	64.0001	76.8011	91.3008	105.6234	113.1907	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
Hp [kJ/kg]	55.3000	73.1000	93	113.5000	124.9000	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
w [kg/t]	2.0617e+05	2.3923e+05	2.8037e+05	3.3546e+05	3.6362e+05	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
Q [m3/t]	8420	9770	11450	13700	14850	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
Q [Sm3/t]	2.2161e+05	2.5715e+05	3.0136e+05	3.6058e+05	3.9085e+05	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
ηp	0.8370	0.8330	0.8280	0.8310	0.8360	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
σ	0.2480	0.2492	0.2507	0.2498	0.2483	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN

**FIGUR 33: VISNING AV ALLE BEREGNINGER OG VERDIER**

Siden «Beregninger» viser alle brukte og beregnede variabler. Dette for å kunne enklere vurdere om beregningene er korrekte.

## 6.1.5. Simulering



**FIGUR 34: SIDE FOR SIMULERING VED ET BESTEMT OPERASJONSPUNKT**

På siden «Simulering» plottes surge- og kontrollinjen til kompressorkartet i CCC format fra input verdiene fra de andre sidene.

På venstre side under «operasjonspunkt» skrives aktuelle verdier for operasjonspunktet.

Operasjonspunktet simuleres i grafen som vist i Figur 34 når knappen «Simuler» betjenes.

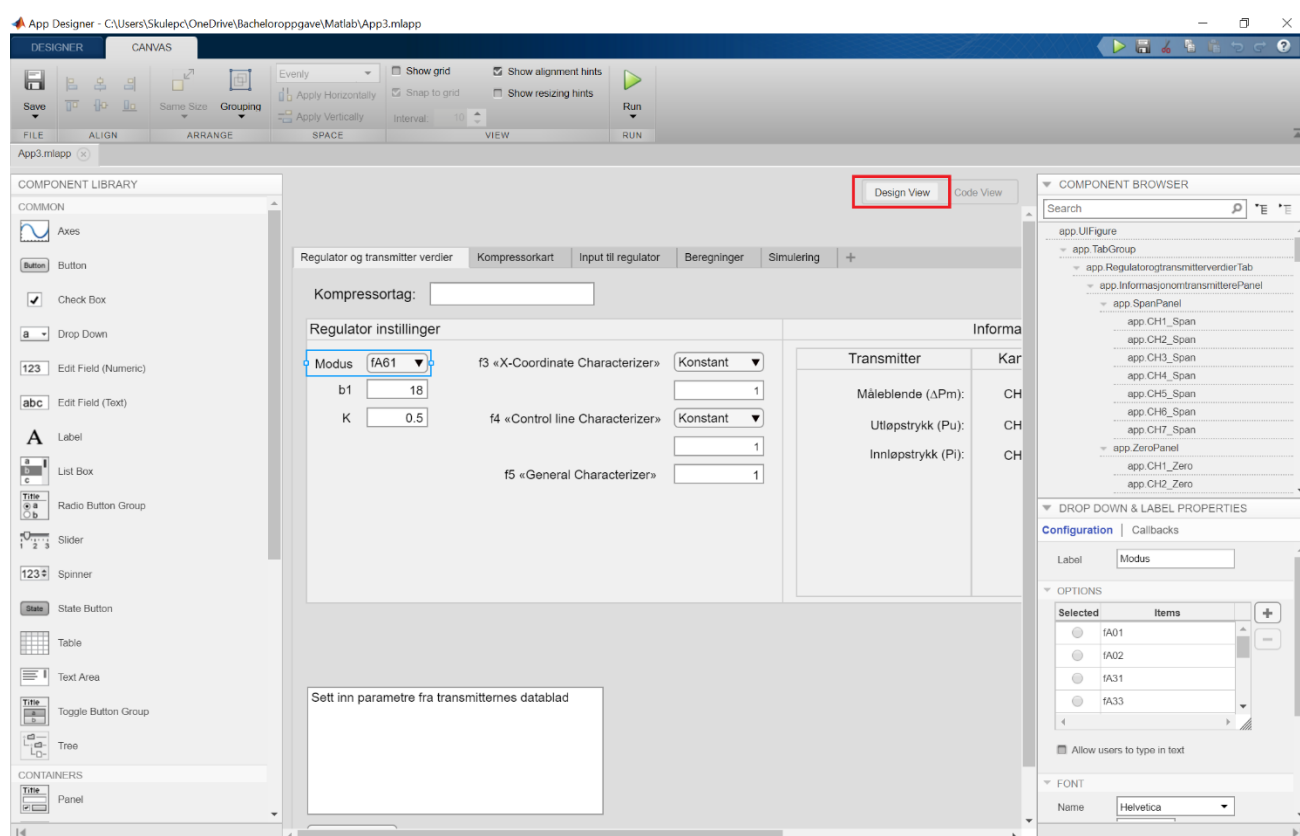
Hvilke transmitterverdier som brukes varierer med fA modus. Transmitterverdiene som ikke er i bruk skjules for å unngå unødvendig informasjon i programmet.

## 6.2. Matlab App Designer

Programmet er laget i Matlab 2018 sitt verktøy som heter App Designer. Dette er et verktøy som gjør det lett å lage et visuelt brukergrensesnitt ved å dra og plassere komponenter slik en ønsker det. Deretter kan en tilordne kode til hver enkelt komponent eller skrive funksjoner som blir aktivert av visse aksjoner rundt komponentene.

Dette gjør at en kan fokusere på å skrive kode og lage funksjonalitet fremfor å bruke tid på brukergrensesnittet. På denne måten kan hele programmet sitt brukergrensesnitt settes opp og gjøres ferdig før noe som helst funksjonalitet eller kode er skrevet.

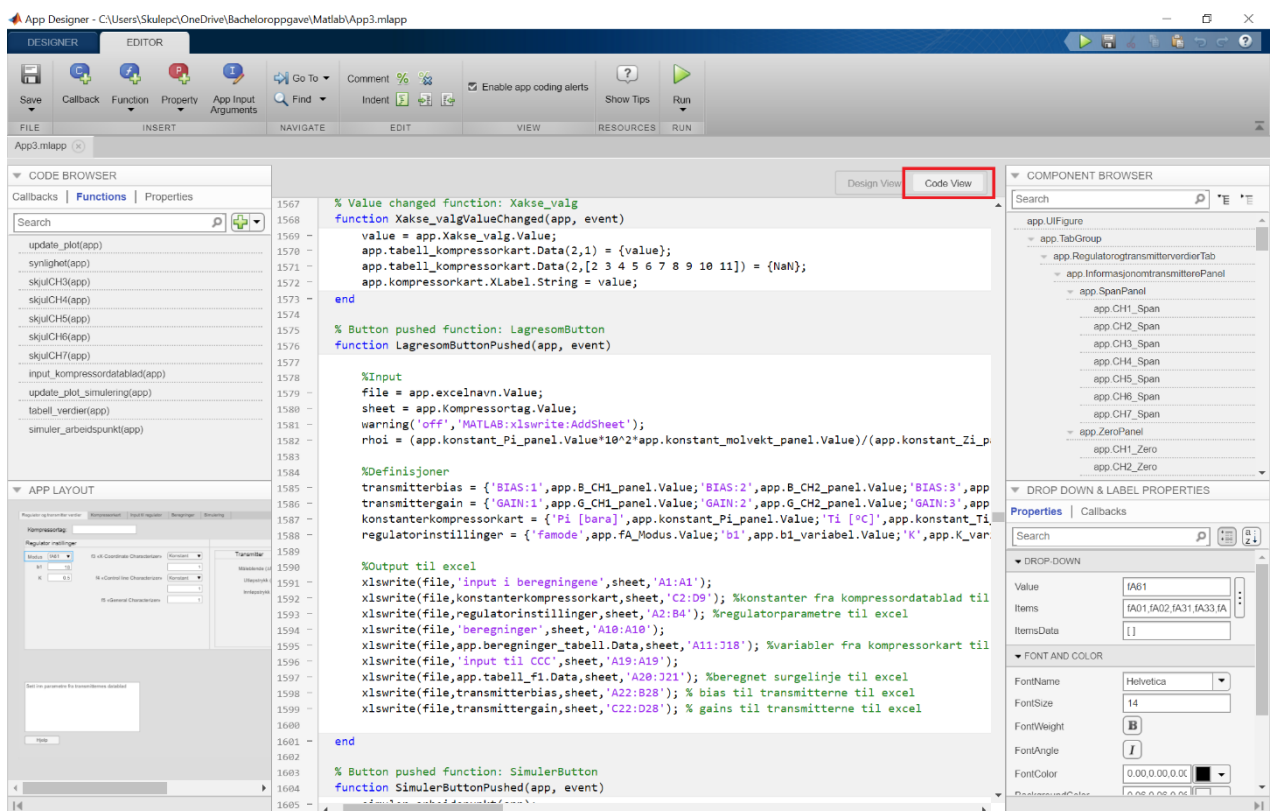
Objektene i Matlab opererer med maksimalt fire desimaler, noe som gjør at det vil bli en minimal differanse mellom beregninger gjort av Matlab programmet og eksempelvis Excel. Brukergrensesnittet til programmet lages under «Design View» i Figur 35.



FIGUR 35: MATLAB 2018 APP DESIGNER

Den andre delen av verktøyet lager koden til programmet, under «Code View». I denne delen lages all funksjonalitet som skal være i programmet. Koden kan knyttes direkte til hver komponent, slik at koden blir utført hver gang komponenten blir endret eller betjent i brukergrensesnittet. Hele funksjoner kan også bli aktivert dersom en komponent i brukergrensesnittet endres, betjenes og så videre. En funksjon kan eksempelvis endre både design, plassering, verdier osv.

Programmeringen av koden gjøres under «Code View» i App Designer. Figur 36 viser litt av koden som er knyttet direkte opp mot komponentene «X akse valg» og «Lagre som knappen».



FIGUR 36: MATLAB 2018 APP DESIGNER



## 6.3. Matlab kode

I dette kapitlet illustreres noen utdrag fra koden i programmet.

Aksevalgene som er vist i Figur 30 endrer hele oppsettet på siden slik at både tabellen og grafen stemmer overens med de valgte aksene. Dette gjøres med de to «funksjonene» som er plassert direkte inne i aksevalg velgerne som vist i Figur 37.

```
% Value changed function: Xakse_valg
function Xakse_valgValueChanged(app, event)
    value = app.Xakse_valg.Value;
    app.tabell_kompressorkart.Data(2,1) = {value};
    app.tabell_kompressorkart.Data(2,[2 3 4 5 6 7 8 9 10 11]) = {NaN};
    app.kompressorkart.XLabel.String = value;
end

% Value changed function: Yakse_valg
function YakseValueChanged(app, event)
    value = app.Yakse_valg.Value;
    app.tabell_kompressorkart.Data(1,1) = {value};
    app.tabell_kompressorkart.Data(1,[2 3 4 5 6 7 8 9 10 11]) = {NaN};
    app.kompressorkart.YLabel.String = value;
end
```

**FIGUR 37: KODE FOR VALG AV AKSER PÅ SIDEN «KOMPRESSORKART»**

For x-aksen blir mbar målingen over måleblenden beregnet med koden øverst i Figur 38. Dersom variabelen på y-aksen ikke er utløpstrykket blir utløpstrykket kalkulert av koden nederst i Figur 38.

```

%Valg av enhet til X-akse
if app.Xakse_valg.Value == 'Q [m3/t]'
    Q = X_surge;
    deltaPm_Pa = ((Pi*10^5*M)/(Zi*R*Ti)).*(Q./Km).^2;
    deltaPm_mBar = deltaPm_Pa*10^(-2);
    w = Pi*10^5*M *Q./(Zi*R*1000*Ti);
    Q_standard = Pi*Q*288.71./(Zi*Ti*1.01325);
elseif app.Xakse_valg.Value == 'W [kg/t]'
    w = X_surge;
    deltaPm_Pa = ((Zi*R*Ti)/(Pi*10^5*M)).*(w./Km).^2;
    deltaPm_mBar = deltaPm_Pa*10^(-2);
    Q = w*Zi*R*1000*Ti./Pi*10^5*M;
    Q_standard = Pi*Q*288.71./(Zi*Ti*1.01325);
end

%Valg av enhet til Y-akse
if strcmp(app.Yakse_valg.Value, 'Pu [bara]') == 1
    Pu = Y_surge;
    Hp = (1./poleksp).*Zi.*R.*1000.*(Ti./M).*((Pu/Pi).^poleksp-1)./1000;
elseif strcmp(app.Yakse_valg.Value, 'Rc') == 1
    Pu = Y_surge.*Pi;
    Hp = (1./poleksp).*Zi.*R.*1000.*(Ti./M).*((Pu/Pi).^poleksp-1)./1000;
elseif strcmp(app.Yakse_valg.Value, 'Hp [kJ/kg]') == 1
    Hp = Y_surge;
    hpred = (Hp.*M)./(Zavg*R*Ti);
    Pu = Pi.*(1+hpred.*poleksp).^(1./poleksp);
end

```

**FIGUR 38: KODE FOR BEREGNING AV MBAR OG UTLØPSTRYKK**

Formel for Q er vist i kapittel 2.6. Differensialtrykket over måleblenden, deltaPm, beregnes ut fra strømmingen, Q. Strømmingen i standard kubikk og massestrøm er ikke tatt med i rapporten, men er inkludert i programmet som et ønske fra Statoil. Utledningen av formel for Hp er vist i kapittel 2.5.3. Formel for hpred og Pu er hentet fra kapittel 4.1.1.

Beregning av surgelinjen,  $f_1(R_c)$ , gjøres av koden i Figur 39 og resultatet vises i Figur 31. Beregningen av surgelinjen er den lang og komplisert fordi den er avhengig av fA modus. Ulike fA modus nytter forskjellige målinger som vist i Tabell 1. Dermed endres også verdiene til bias og gain ved de forskjellige modusene. Beregningene av bias og gain gjøres ihht. kapittel 5.3. Figur 39 viser kun beregning av  $f_1$  for fA modus 61. Formelen for  $f_1$  er utledet i kapittel 4.9.

```
elseif app.fA_Modus.Value == 'fA61'
    %Input
    M_deltaPm = app.CH1_Span.Value - app.CH1_Zero.Value;
    M_Pu = app.CH2_Span.Value - app.CH2_Zero.Value;
    M_Pi = app.CH3_Span.Value - app.CH3_Zero.Value;
    %Bias og Gain til transmitterne
    B_deltaPm = 0;
    G_deltaPm = 1;
    B_Pu = (offset_Pu/(app.CH2_Span.Value + offset_Pu))*100;
    G_Pu = M_Pu/(app.CH2_Span.Value + offset_Pu);
    B_Pi = (offset_Pi/(app.CH2_Span.Value + offset_Pi))*100;
    G_Pi = M_Pi/(app.CH2_Span.Value + offset_Pi);
    %Beregning av PV verdier ved surge tilstand
    SV_Pi = (Pi - 1.01325)/M_Pi;
    SV_Pu = (Pu - 1.01325)./M_Pu;
    SV_deltaPm = deltaPm_mBar./M_deltaPm;
    PV_Pi = G_Pi * SV_Pi + B_Pi/100;
    PV_Pu = G_Pu * SV_Pu + B_Pu/100;
    PV_deltaPm = G_deltaPm * SV_deltaPm + B_deltaPm/100;
    %Output
    app.B_CH1_panel.Value = B_deltaPm;
    app.B_CH2_panel.Value = B_Pu;
    app.B_CH3_panel.Value = B_Pi;
    app.G_CH1_panel.Value = G_deltaPm;
    app.G_CH2_panel.Value = G_Pu;
    app.G_CH3_panel.Value = G_Pi;
    Rc = PV_Pu./PV_Pi;
    f1 = PV_deltaPm./(PV_Pi*K*f5);
```

**FIGUR 39: KODE FOR BEREGNING AV  $f_1$  VED fA MODUS 61**

Brukergrensesnittet til simuleringen av operasjonspunktet er vist i Figur 34. Koden for kalkulering av operasjonspunktet ved fA modus 31 vises i Figur 40. Denne koden minner mye om koden for f1. Formelen for  $sim\_x$  (f1) er beskrevet i kapittel 4.9. Formel for bias og gain er beskrevet i kapittel 5.3.

```

if app.fA_Modus.Value == 'fA31'
    %Input
    M_deltaPm = app.CH1_Span.Value - app.CH1_Zero.Value;
    M_Pu = app.CH2_Span.Value - app.CH2_Zero.Value;
    M_Pi = app.CH3_Span.Value - app.CH3_Zero.Value;
    %Bias og Gain til transmitterne
    B_deltaPm = 0;
    G_deltaPm = 1;
    B_Pu = (offset_Pu/(app.CH2_Span.Value + offset_Pu))*100;
    G_Pu = M_Pu/(app.CH2_Span.Value + offset_Pu);
    B_Pi = (offset_Pi/(app.CH2_Span.Value + offset_Pi))*100;
    G_Pi = M_Pi/(app.CH2_Span.Value + offset_Pi);
    %Beregning av PV verdier ved surge tilstand
    SV_Pi = (app.sim_CH3.Value - 1.01325)/M_Pi;
    SV_Pu = (app.sim_CH2.Value - 1.01325)/M_Pu;
    SV_deltaPm = app.sim_CH1.Value./M_deltaPm;
    PV_Pi = G_Pi * SV_Pi + B_Pi/100;
    PV_Pu = G_Pu * SV_Pu + B_Pu/100;
    PV_deltaPm = G_deltaPm * SV_deltaPm + B_deltaPm/100;
    %Output
    sim_y = PV_Pu./PV_Pi;
    sim_x = PV_deltaPm./(PV_Pi*app.K_variabel.Value);

End
%Plot av operasjonspunkt i simulert graf
plot(app.simulering, sim_x, sim_y, 'r*');
verdier = [num2str(sim_x), ', ', num2str(sim_y)];
text(app.simulering, sim_x+0.05, sim_y, verdier);
end

```

**FIGUR 40: KODE FOR Å SIMULERE ARBEIDSPUNKT I GRAFEN PÅ «SIMULERING» SIDEN**

## 7. Konklusjon

Utgangspunktet for denne oppgaven var å lage en applikasjon i Matlab som digitaliserer beregningene av surge- og kontrollinjen for bruk i CCC antisurge regulatorer. Grunnlaget for å lage applikasjonen var å ha en bred forståelse for fysikken og virkemåten rundt surge og antisurge regulering av en sentrifugal kompressor. Dette er beskrevet detaljert i denne rapporten og er så implementert i applikasjonen.

Applikasjonen er blitt et produkt som langt overgår funksjonaliteten som var forespeilet. Den inneholder alle moduser som blir brukt offshore, og kan benyttes til å gjøre de fleste generelle beregninger for førstegangs oppsett av en CCC regulator mot en sentrifugal kompressor. Den inneholder også funksjonalitet for eksport av beregninger til Excel, og feilsøking i form av simulering av kompressorens arbeidspunkt mot de beregnede surge- og kontrollinjen, visuelt fremstilt i en graf.

Veien videre er å videreutvikle applikasjonen med utvidet funksjonalitet for å øke bruksområdet og brukervennligheten, blant annet:

- Input av strømming i flere formater (*Standard  $m^3/h$ , tonn/h,  $m^3/h$ , kg/h* samt egendefinert formel)
- Lagring av sesjonen i programmet for å kunne gjenoppta sesjonen senere
- Importere verdier fra en CCC konfigurasjons fil
- Beregning av f4 og DEV
- Konvertere fra CCC format tilbake til kompressorleverandørens format

Applikasjonen skal overrekkes som åpen kildekode til ingeniørene i Statoil etter ferdig utvikling og testing, slik at applikasjonen kan brukes og videreutvikles internt i selskapet. Formålet var å effektivisere og forenkle hverdagen til ingeniørene i Statoil. Det er oppnådd gjennom denne rapporten, som kan fungere som ett oppslagsverk ved jobbing mot CCC regulatorer, og applikasjonen, som kan spare mye tid på enkle beregninger.

# Referanser

- Alf R. Kluge, Statoil. (2008, Juli). Centrifugal Compressors Typical SAS Related Control Structures Functional Requirements.
- Ambjørnsen, T. K. (2009, 08 30). Ytelsesberegning av kompressor, TNE-kurs.
- CCC. (2000). *Series 3 Plus Antisurge Controller - Training Reference Manual - Operations Module 1*.
- CCC. (2005, September). Series 3 Plus Antisurge Controller for Axial and Sentrifugal Compressors.
- CCC. (2010). Introduction Off-Shore Turbo Machinery Control Challenges.
- CCC. (2013). Development and Design of Antisurge and Performance Control Systems for Sentrifugal Compressors.
- General Electric Oil & Gas. (2008). *Centrifugal Compressor Multicustomer Manual*.
- General Electric Oil & Gas. (u.d.). Some Notes about Centrifugal Compressors.
- Gerardus Johannes De Boer, S. (2018, mars).
- Hanlon, P. C. (2001). *Compressor Handbook*. McGraw-Hill.
- Honeywell. (2001). *Engineering Calculations and Results Project #9747*.
- Olav Stene. (2012, Januar 1.). CCC antisurgeregulator.
- Total Train Control. (u.d.). *Determining b1 and Other b parameters*.
- Øverli, J. M. (1992). Strømningsmaskiner bind 3.
- Øverli, J. M. (1992). Strømningsmaskiner, bind 3.