

# Tilstandsbasert vedlikehold på tørrgassetninger

**Camilla Erstad**

Marin teknikk

Innlevert: desember 2014

Hovedveileder: Ingrid Bouwer Utne, IMT

Medveileder: Jan Erik Salomonsen, MainTech  
Sverre Wattum, MainTech

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for marin teknikk





## FORORD

Denne masteroppgaven er skrevet ved instituttet for Marin teknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) høsten 2014. Oppgaven er den avsluttende delen av mitt masterstudie innenfor hovedprofilen drift og vedlikehold, og utgjør 30 studiepoeng.

Etter en sommer hos MainTech AS fikk jeg tilbud om å skrive en oppgave for deres kunde, A/S Norske Shell, om vedlikeholdsstyring på gasskompressorer. Selv med begrenset kunnskap om kompressorer og tørrgassystem, var dette en oppgave som virket spennende. Det har vært utfordrende, men samtidig svært lærerikt å fordype seg i et teknisk utstyr av denne typen. Det å få innblikk i hvordan vedlikeholdet for en stor bedrift som A/S Norske Shell utføres, har også vært en motiverende faktor.

Jeg vil gjerne få takke A/S Norske Shell for å ha gitt meg muligheten til å skrive denne oppgaven, og for at de har tatt i mot meg og gitt meg den informasjonen jeg har trengt underveis. En takk går også til Professor Ingrid Bouwer Utne ved NTNU, for at hun stilte opp som veileder til tross for sykdom i starten av semesteret.

En stor takk rettes til veilederen min hos MainTech, Jan Erik Salomonsen, som var initiativtakeren bak oppgaven og som hele veien har vært til stor hjelp med sin tekniske kompetanse. Takker også MainTech for å ha gitt meg muligheten til å sitte i deres lokaler for skriving og tett oppfølging, og til guttene på Jula-kontoret som har tillatt dette.

Den største takknemlighet går til min tredje veileder, Sverre Wattum, som har vært en stor støtte, og gitt meg selvtillit og motivasjon gjennom hele prosessen – tusen takk!

Trondheim, 19.desember 2014

---

Camilla Erstad

## SAMMENDRAG

Tørrgass-tetninger er mekaniske akseltetninger som er plassert på hver sin side av kompressorhuset for å hindre at gass lekker ut til omgivelsene. Tørrgass-tetninger benytter gass som tetningsmedium. Gasslekkasje kontrolleres av et lite, selvregulerende mellomrom som skapes av en roterende og en stasjonær tetningsring.

Formålet med denne oppgaven har vært å se på hvordan man kan drive tilstandsbasert vedlikehold av tørrgass-tetninger i en sentrifugalkompressor. Til dette er det benyttet en kvalitativ metode, hvor informasjonsgrunnlaget er basert på erfaringer fra en utstyrseier (A/S Norske Shell), en leverandør av tetningssystemer (Eagle Burgmann), og et omfattende litteratursøk rundt tetningsproblematikken. Utgangspunktet for oppgaven har vært eksport gasskompressorene på Nyhamna som eies og driftes av A/S Norske Shell. Oppgaven avgrenses til å omhandle de spesifikke tetningene med tilhørende støttesystemer.

Over 80 % av sentrifugalkompressorer som produseres i dag er utstyrt med tørrgass-tetninger, og systemet anses for å være svært pålitelig. Uforutsette feil kan likevel forekomme og potensielt resultere i nedstenging av hele kompressorsystemet. For eksportkompressorer i denne størrelsesorden vil redusert leveringsevne få betydelige økonomiske konsekvenser, og det vil derfor være svært viktig å ha kontroll på nedetiden.

Kontaminering av tettegassen viser seg å være den største trusselen for tørrgasssystemet. Her er ufiltrert prosessgass og smøreolje hovedkildene til kontamineringen. Kontaktskade og forskyvning av tetningsflatene tillater økende mengde gass å strømme over tetningsflatene, og resulterer dermed i redusert tetningsevne. Andre årsaker til tetningssvikt er slitasje av labyrinttetninger og væskedannelse i systemet.

En kompressor som går for full effekt og kjøres kontinuerlig er lite utsatt for tetningsproblemer. Usammenhengende kjøring og avbrutte operasjoner er uheldige operasjonstilstander for tetningssystemet. Videre viser det seg at antall start og stopp øker sannsynligheten for tetningsproblemer betraktelig, både med tanke på kontaminering og generell slitasje av tetningskomponenter.

For å ha kontroll på tetningens tilstand under ulike operasjonstilstander, vil tilstandsovervåking være en mulig løsning. Vedlikeholdet utføres da basert på utstyrets tilstand. Denne teknikken går under tilstandsbasert vedlikehold, og er en metode som brukes for å redusere usikkerheten ved vedlikeholdsaktiviteter. Når utstyret fraviker fra sin normale tilstand skal dette trigge det man i oppgaven definerer som tilstandsbasert feildiagnostikk. Dette forutsetter at utstyret har identifiserbare symptomer som kan si noe om tilstanden.

For å identifisere symptomer for feilmoden «Gass lekker ut av systemet», for de ulike tetningskomponentene, ble analysemetoden FMSA (Feilmode Symptom Analyse) benyttet. For å utføre analysen ble en kunnskapsbasert tilnærming valgt. Analysen krever tilgang på gode utstyrsdata. Informasjonsgrunnlaget ble dannet gjennom

samtaler med teknisk personell, utstyrseier, leverandør og resultatene fra litteratursøket.

Analysen kan kort oppsummeres ved å presentere sammenhengen mellom identifiserte symptom og årsaker. Klammeparentesen indikerer mulige årsaker til tetningsfeil for kombinasjonene av symptomer.

**Tabell 1: Oppsummering av analysen**

Symptom	Beskrivelse	Primærtetning	Sekundærtetning	Barriere-tetning
(1)	Forandring i differensialtrykk over filter	X	X	
(2)	Trykk inn på primærtetning er lavt	X	X	
(3)	Strømning inn på primærtetning er lavt	X	X	
(4)	Økt strømning i primærventilasjon	X	X	
(5)	Økt trykk i primærventilasjon	X	X	
(6)	Temperaturøkning over tetningsflater	X	X	
(7)	Lav temperatur på prosessgass	X		
(8)	Smøreolje i sekundærventilasjon		X	X
(9)	Lavt trykk på buffergass		X	X
(10)	Lav temperatur på buffergass			X

$$(1) \cap (2) \cap (3) = \{\text{Høy motstand over filter}\}$$

$$(2) \cap (3) = \left\{ \begin{array}{l} \text{Uttakstrykket ikke høyt nok} \\ \text{Høy motstand i systemet} \\ \text{Feiljusterte ventiler} \\ \text{Feil på antisurge ventil} \end{array} \right\}$$

$$(2) \cap (7) = \{\text{Væskedannelse i systemet}\}$$

$$(4) \cap (5) = \{\text{Feil på primærtetning}\}$$

$$(4) \cap (5) \cap (6) = \left\{ \begin{array}{l} \text{Kontaktskade mellom tetningsflater} \\ \text{Feil på primærtetning} \end{array} \right\}$$

$$(4) = \{\text{Kontakt mellom tetningsflater}\}$$

$$(4) \cap (5) \cap (8) = \{\text{Feil på sekundærtetning}\}$$

$$(8) = \{\text{Feil på barrieretetning}\}$$

På bakgrunn av analyseresultatene foreslås tiltak som har til hensikt å redusere tetningssvikt ved hjelp av et proaktivt vedlikehold. Anbefalingene er kategorisert etter design, drift og vedlikehold av tetningssystemet.

#### Utforming og tilpasning av tetningssystemet

- Sekundær kilde til tettegass for å unngå kontaminering
- Trykkutligningsvolum for bedre kontroll på trykkvariasjoner
- Koalescerfilter og dreneringsventiler ved fare for væskedannelse
- Installere aktuelle alarmer for overvåking av utstyrets tilstand

#### Drift av kompressorsystemet

- Unngå start og stopp, i størst mulig grad, for å redusere sannsynligheten for kontaminering
- Unngå å kjøre på redusert effekt for å redusere sannsynligheten for kontaminering
- Fastsatte prosedyrer for håndtering av kompressorsystemet ved uforutsett driftsstans

#### Vedlikehold av tetningsystemet

- Overvåke filter
- Manuell kontroll av filter
- Overvåke temperatur på tetningskomponenter
- Overvåke trykk og strømning i primærventilasjon
- Overvåke trykk på buffergass

## SUMMARY

Dry gas seals are mechanical face seals which are placed on each side of a compressor casing to prevent gas leaking out of the compressor to the atmosphere. A dry gas seal uses gas as a sealing medium. The gas leakage is controlled by a small, self-regulating gap between a rotating and a stationary seal ring.

The purpose of this thesis has been to look at the possibilities of using condition-based maintenance to prevent failure of the dry gas seals in a centrifugal compressor. A qualitative method has been used. The data has been gathered and based on experiences from an equipment owner (A/S Norske Shell), a supplier of seal gas systems (Eagle Burgmann) and an extensive literature search within the topic of seal gas issues.

Over 80 percent of centrifugal compressors manufactured today are equipped with dry gas seals. The system is considered to be very reliable. Despite this, unpredicted failures may occur, which could result in a shutdown of the compressor system. The economic consequences are severe when a compressor of this magnitude reduces its ability to deliver gas. For this reason, it is important to keep control of the downtime.

Contamination is a leading cause of dry gas seal deterioration. Unfiltered process gas and lubrication oil is the main sources of gas seal contamination. Further, contact damage and displacement of the sealing surfaces would increase the gas ability to flow between the sealing faces, thereby resulting in reduced sealing capability. Other causes of reduced sealing capability are wearing of the labyrinth seals and fluid formation in the system.

There is a small risk of dry gas seal problems for a compressor running at full power continuously. A compressor that is running discontinuous and is being interrupted may result in seal problems. Furthermore, it appears that the number of start and stop increases the likelihood of sealing problems considerably; both in terms of contamination and in general wear of seal components.

Condition monitoring of the seal gas system is a possible solution to keep control of the seal state at various operational conditions. The maintenance is based on the equipment's condition. This technique is used for condition-based maintenance, which is a method used to reduce the uncertainty of certain maintenance activities. When the equipment deviates from its normal condition this should trigger what this thesis defines as condition-based fault diagnostics. The equipment must have detectable symptoms which can say something about its condition.

A Failure Mode Symptom Analysis (FMSA) was used to identify the symptoms for the failure cause "Gas is leaking out of the system". A knowledge-based approach was chosen to perform the analysis. The information data was formed through discussions with technical personnel, the equipment owner, the supplier of seal gas systems and use of the results from the literature review.



The analysis can be summarized by presenting the connection between the identified symptoms and causes.

Table 2: Analysis summary

Symptom	Description	Primary seal	Secondary seal	Barrier seal
(1)	Change in differential pressure (filter)	X	X	
(2)	Low pressure to primary seal	X	X	
(3)	Reduced flow to secondary seal	X	X	
(4)	Increased flow in primary vent	X	X	
(5)	Increased pressure in primary vent	X	X	
(6)	Increase in seal face temperature	X	X	
(7)	Sealing gas temperature low	X		
(8)	Lubrication oil present in primary vent		X	X
(9)	Buffer gas pressure low		X	X
(10)	Buffer gas temperature low			X

$$(1) \cap (2) \cap (3) = \{\text{High resistance across filter}\}$$

$$(2) \cap (3) = \left\{ \begin{array}{l} \text{Outlet pressure not high enough} \\ \text{High resistance in the system} \\ \text{Improper adjustments of valves} \\ \text{Failure of anti surge valve} \end{array} \right\}$$

$$(2) \cap (7) = \{\text{Fluid formation in the system}\}$$

$$(4) \cap (5) = \{\text{Failure of primary seal}\}$$

$$(4) \cap (5) \cap (6) = \left\{ \begin{array}{l} \text{Contact damage of seal faces} \\ \text{Failure of primary seal} \end{array} \right\}$$

$$(6) = \{\text{Contact damage of seal faces}\}$$

$$(4) \cap (5) \cap (8) = \{\text{Failure of secondary seal}\}$$

$$(8) = \{\text{Failure of barrier seal}\}$$

The proposed measures will reduce the likelihood of seal failure by using condition-based maintenance. The recommendations are categorized by design, operation and maintenance activities.

Design and adjustments of the seal gas system

- Secondary source of sealing gas to prevent contamination
- Volume for pressure equalization for better control of pressure variations
- Coalesce filter and drain valves at the risk of fluid build up
- Installation of appropriate alarms for condition-monitoring

#### Operation of the compressor system

- Avoid starts and stops to reduce the likelihood of contamination
- Avoid running the compressor at reduced effect
- Scheduled procedures for managing the compressor system in cases of unplanned shutdowns

#### Maintenance of seal gas system

- Monitoring the filter
- Manual control of the filter
- Temperature monitoring of seal components
- Monitoring pressure and flow in the primary vent
- Monitoring the buffer gas pressure

# INNHold

FORORD.....	II
SAMMENDRAG .....	III
SUMMARY .....	VI
INNHold .....	IX
FIGURLISTE.....	XII
TABELLISTE.....	XIII
<b>1. INNLEDNING.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. BAKGRUNN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. FORMÅL OG PROBLEMSTILLING.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. METODE.....</b>	<b>2</b>
<b>1.4. AVGRENSNINGER.....</b>	<b>2</b>
<b>1.5. RAPPORTENS OPPBYGGING.....</b>	<b>3</b>
<b>1.6. SENTRALE BEGREP .....</b>	<b>3</b>
<b>2. LITTERATUR.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. SENTRIFUGALKOMPRESSOR – FUNKSJON, VIRKEMÅTE OG OPPBYGGING.....</b>	<b>5</b>
2.1.1. Bruksområder.....	5
2.1.2. Kompressorens oppbygging .....	6
2.1.3. Begrep og begrensninger .....	7
<b>2.2. TØRRGASSTETNINGER.....</b>	<b>9</b>
2.2.1. Prinsipp .....	9
2.2.2. System for tørrgasstetninger.....	10
2.2.3. Identifisering av feil og årsaker .....	13
2.2.4. Når problemer oppstår .....	17
<b>2.3. VEDLIKEHOLDSSTYRING.....</b>	<b>19</b>
2.3.1. Vedlikehold før og nå.....	19
2.3.2. Styringsmodeller .....	20
2.3.3. Valg av vedlikeholdsstrategi .....	22
2.3.4. Tilstandsbasert vedlikehold.....	25
<b>3. METODE.....</b>	<b>28</b>
<b>3.1. FEILMODE SYMPTOM ANALYSE.....</b>	<b>28</b>
3.1.1. Behov ved gjennomføring av analyse .....	28
3.1.2. Tilnæringsmåter .....	29
3.1.3. Diagnostisering .....	29
3.1.4. Informasjonsgrunnlag.....	30
<b>4. RESULTAT.....</b>	<b>31</b>
<b>4.1. UTSTYRETS KRITIKALITET .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2. IDENTIFISERING AV FUNKSJON, FEILMODE OG FEILÅRSAKER.....</b>	<b>31</b>
4.2.1. Feilårsaker for primær- og sekundærtetning.....	32
4.2.2. Feilårsaker for barrieretetning.....	32
<b>4.3. FEILÅRSAKER OG SYMPTOMER .....</b>	<b>38</b>
4.3.1. Feil på primærtetninger .....	38
4.3.2. Feil på sekundærtetninger .....	38
4.3.3. Feil på barrieretetninger.....	39



<b>4.4.</b>	<b>OPPSUMMERING AV RESULTATENE</b> .....	<b>43</b>
4.4.1.	Feilårsaker og primærtetningens tilstand .....	43
4.4.2.	Feilårsaker og sekundærtetningens tilstand .....	44
4.4.3.	Feilårsaker og barrieretetningens tilstand.....	45
<b>5.</b>	<b>DISKUSJON</b> .....	<b>46</b>
<b>5.1.</b>	<b>HVORDAN MÅLE OG REGISTRERE SYMPTOMER</b> .....	<b>46</b>
5.1.1.	Symptomer for primærtetning .....	46
5.1.2.	Symptomer for sekundærtetning .....	47
5.1.3.	Symptomer for barrieretetning.....	48
<b>5.2.</b>	<b>VEDLIKEHOLDSSTYRING</b> .....	<b>49</b>
5.2.1.	Mål og krav.....	49
5.2.2.	Vedlikeholdsprogram .....	49
5.2.3.	Planlegging og gjennomføring .....	52
5.2.4.	Rapportering og analyser.....	52
5.2.5.	Tiltak.....	53
<b>6.</b>	<b>KONKLUSJON</b> .....	<b>54</b>
6.1.	<b>OPPSUMMERING OG KONKLUSJONER</b> .....	<b>54</b>
6.2.	<b>ANBEFALINGER OG VIDERE ARBEID</b> .....	<b>56</b>
	<b>REFERANSER</b> .....	<b>58</b>
	<b>VEDLEGG A: OPPGAVETEKSTEN</b> .....	<b>A</b>
	<b>VEDLEGG B: A/S NORSKE SHELL OG ORMEN LANGE [10]</b> .....	<b>B</b>
	<b>VEDLEGG C: ARRANGEMENTTEGNING – EKSPORT GASSKOMPR. [38]</b> .....	<b>C</b>
	<b>VEDLEGG D: P&amp;ID FOR EKSPORT GASSKOMPR. – TETNINGSSYSTEM [38]</b> .....	<b>D</b>
	<b>VEDLEGG E: OVERSIKTSBILDE KONTROLLROM (NYHAMNA) [38]</b> .....	<b>E</b>

## FIGURLISTE

Figur 1: Hovedkomponenter for en sentrifugalkompressor [12].....	6
Figur 2: Prinsipp anti-surge ventil.....	8
Figur 3: Operasjonskurver for kompressor [14].....	8
Figur 4: Prinsipp tørrgassetninger [2].....	9
Figur 5: Labyrinttetninger [15].....	10
Figur 6: Gasskompressor med hjelpesystem [12] .....	11
Figur 7: Tørrgassetning [19] .....	12
Figur 8: Kontaminering fra prosessgass.....	13
Figur 9: Kontaminering fra smøreolje.....	13
Figur 10: Kontaminering fra tettegass .....	14
Figur 11: Slitasje på labyrinttetning.....	14
Figur 12: Slitasje og tilsmussing av labyrinttetninger .....	15
Figur 13: Roterende tetningsring [21] .....	15
Figur 14: Typisk fasediagram for tettegass [21] .....	16
Figur 15: Separasjon av fluider .....	16
Figur 16: Vedlikeholdsmetoder .....	19
Figur 17: Styringsløyfa [28].....	20
Figur 18: Kritikalitetsvurdering av vedlikeholdsenhet [6] .....	23
Figur 19: RCM beslutningslogikk [27].....	24
Figur 20: Tilstandsbasert overvåkning [33] .....	26
Figur 21: Vedlikeholdsanbefalinger basert på utstyrets tilstand [30] .....	27
Figur 22: Årsakstre - feil på primærtetning.....	40
Figur 23: Årsakstre - feil på sekundærtetning .....	41
Figur 24: Årsakstre - feil på barrieretetning.....	42
Figur 25: Sekundær kilde til tettegass.....	50
Figur 26: Trykkutligningsvolum.....	50

## TABELLISTE

Tabell 1: Oppsummering av analysen .....	IV
Tabell 2: Analysis summary .....	VII
Tabell 3: Personer involvert i innhenting av informasjon til analysen .....	30
Tabell 4: Feilårsaker for primærtetning ved feilmoden «Gass lekker ut av systemet» ....	33
Tabell 5: Feilårsaker for sekundærtetning ved feilmoden «Gass lekker ut av systemet»	35
Tabell 6: Feilårsaker for barrieretetning ved feilmoden «Gass lekker ut av systemet» ...	37
Tabell 7: Symptomer primærtetning .....	43
Tabell 8: Symptomer sekundærtetning .....	44
Tabell 9: Symptomer barrieretetning.....	45
Tabell 10: Resultater fra årsaksanalysen .....	54





# 1. INNLEDNING

## 1.1. BAKGRUNN

I oljeindustrien er bruk av sentrifugalkompressorer svært utbredt, både når det gjelder produksjon og leveranse av gass. Tørrgass tetninger har blitt det vanligste systemet å benytte for å hindre gasslekkasje fra kompressoren til omgivelsene. Over 80 % av sentrifugalkompressorer som produseres i dag er utstyrt med dette systemet [1]. A/S Norske Shell benytter denne typen kompressor og tetninger ved sine installasjoner, både til havs og til lands.

Årsakene til den utstrakte bruken av dette systemet er blant annet at tetningene har en lavere utslippsrate, et lavere energibehov, forbedrer kompressorens pålitelighet og krever vesentlig mindre vedlikehold, sammenlignet med andre tetninger [2]. Til tross for dette er tetningene utsatt for uforutsette feil. Hele 69 % av årsakene til at roterende utstyr svikter, skyldes feil på tetningsutstyr [3]. Tetningssvikt kan føre til at hele kompressoren settes ute av drift, og potensielt resultere i store økonomiske konsekvenser for utstyrseieren.

Tilstandsbasert vedlikehold er med på å prege dagens vedlikeholdsgenerasjon. Ved å avgjøre vedlikeholdsbehovet basert på utstyrets tilstand, sikrer man å gjøre rett vedlikehold til rett tid. Tilstanden til tetningssystemet til en kompressor kan i dag bedømmes ved å benytte kontinuerlig overvåking av sentrale driftsparametere. En utfordring kan være å vite hva en skal være oppmerksom på og hvilke faresignaler som bør identifisere for å forebygge tetningssvikt.

Bakgrunnen for denne oppgaven blir å kartlegge Shells erfaring, leverandørens erfaring og den nyeste forskningen som er gjort med tanke på tetningsproblemer. Oppgaven går ut på å sette kunnskapen i system, slik at en kan forstå tetningsproblematikken bedre og på den måten styre vedlikeholdet slik at man unngår uforutsette feil i fremtiden. Utstyrseiere, leverandører og andre som er berørt av tetningsproblematikken, vil kunne ha interesse av å lese denne oppgaven.

Oppgaven er formulert i samarbeid med MainTech AS, som har en langsiktig kontrakt med A/S Norske Shell for tilstandskontroll, vedlikehold og inspeksjon ved deres anlegg på Nyhamna. Se vedlegg A og B for oppgaveteksten og generell informasjon om bedriftene og anlegget på Nyhamna.

## **1.2. FORMÅL OG PROBLEMSTILLING**

Formålet med denne oppgaven blir å avdekke årsakene til tetningsfeil, og i tillegg se på muligheten for å forutsi når disse feilene inntreffer. På den måten vil en kunne planlegge og tilpasse vedlikeholdet basert på den observerte tilstanden til utstyret.

De konkrete spørsmålene denne oppgaven ønsker å besvare blir derfor:

- Hva er årsakene til tetningsfeil, og hvilke symptomer har disse?
- Hvordan drive proaktiv vedlikeholdsstyring på tetningssystemet i kompressorene, slik at uforutsette feil forhindres?

## **1.3. METODE**

For å løse problemstillingen blir det i denne oppgaven benyttet en kvalitativ metode. Med dette menes det en metode som ikke tar utgangspunkt i kvantifiserbare størrelser (kvantitativ metode), men heller fokuserer på å undersøke etablert kunnskap og erfaringer fra aktuelle informanter. Metoden søker dybdekunnskap framfor breddekunnskap, med få sentrale informanter [4].

Data som benyttes i denne oppgaven består av et generelt litteratursøk som omfatter den aktuelle problemstillingen, gjennomgang av rapporter, datastyrte vedlikeholdssystemer og andre relevante dokumenter. Det er også utført observasjoner og samtaler med personell hos det aktuelle anlegget.

## **1.4. AVGRENSNINGER**

Utgangspunktet for oppgaven var vedlikeholdsstyring av eksport gasskompressorene til A/S Norske Shell på Nyhamna. I denne oppgaven er det valgt å fokusere på tetningsproblematikken knyttet til disse kompressorene. Dette systemet avgrenses dermed til å inkludere følgende:

- Tetningskomponenter (primær-, sekundær- og barrieretetning)
- Støttesystem for tetningene (filter og tilførsel av tettegass)

I litteraturen vil tørrgasssystemet presenteres på et generelt grunnlag. I analysen og diskusjon vinkles det mer mot det spesifikke systemet på Nyhamna. Anbefalinger og tiltak som foreslås rettes hovedsakelig mot A/S Norske Shell, men er også ment å gjelde generelt for kompressorer med samme type tetningssystem.

Når det gjelder hvordan proaktivt vedlikeholdsstyring skal foregå vil ikke denne oppgaven gå inn på detaljer rundt de nødvendige ressursene som bør være tilstede. Dette gjelder hovedsakelig det som går på organisasjon, materiell og støttedokumentasjon.

## 1.5. RAPPORTENS OPPBYGGING

Rapporten er delt inn i seks deler; innledning, litteraturstudie, metodebeskrivelse, resultater, etterfulgt av diskusjon og oppsummering av funnene.

Litteraturstudiet er tredelt. Første del introduserer gasskompressoren med fokus på funksjon, virkemåte og oppbygging. Andre del går nærmere inn på tørrgasssystemet og detaljer rundt feilårsaker og problemer. Siste og tredje del av litteraturstudiet tar for seg vedlikeholdsstyring og strategier, med hovedfokus på tilstandsbasert vedlikehold.

I kapittel 3 presenteres metoden som er brukt i oppgaven, hvordan informasjonen er innhentet og hvilken tilnæringsmetode som er benyttet i analysen. Resultatet fra analysen presenteres i kapittel 4 og diskuteres videre i kapittel 5.

Opgaven oppsummeres til slutt med konklusjon og forslag til videre arbeid i kapittel 6.

## 1.6. SENTRALE BEGREP

Under dette punktet følger definisjoner av sentrale begreper som benyttes gjennom oppgaven. Det understrekes at listen ikke er fullstendig, og definisjoner av enkelte begrep underveis i oppgaven vil forekomme. Flertallet av definisjonene er basert og oversatt fra vedlikeholdsterminologien hentet fra Norsk Standard [5]. For unntakene følger egen kilde.

<b>Diagnose:</b>	Konklusjonen eller samlingen av konklusjoner som trekkes om tilstanden til enhet ut i fra tolkning av symptomer.
<b>Feil:</b>	En tilstand der enheten ikke evner eller har nedsatt evne til å utføre sin tiltenkte funksjon.
<b>Feilmode:</b>	En av mulige feiltilstander til en enhet. Feiltilstanden fører til at den tiltenkte funksjonen ikke tilfredstilles. [6]
<b>Feilårsak:</b>	Omstendigheter under utformingen, produksjon, installering, bruk eller vedlikehold, som kan resultere i svikt.
<b>Funksjon:</b>	Utstyret eller systemets oppgave.
<b>Kontaminere:</b>	Forurensning.
<b>Kritikalitet:</b>	Numerisk indeks som angir alvorlighetsgraden av svikt eller feil kombinert med sannsynligheten eller frekvensen for hendelsen.
<b>Nedetid:</b>	Tid fra enheten settes ut av drift til den igjen er driftsklar.
<b>Oppetid:</b>	Tid enheten er i drift.

<b>Overhaling:</b>	Et omfattende sett av preventive vedlikeholdsaktiviteter som gjøres for å opprettholde utstyrets evne til å utføre sin tiltenkte funksjon.
<b>Pålitelighet:</b>	Enhetens evne til å utføre sin påkrevde funksjon under gitte tilstander for et gitt tidsintervall.
<b>Redundans:</b>	Når det for en enhet eksisterer mer enn én måte å utføre den påkrevde funksjonen etter behov.
<b>Svikt:</b>	En hendelse hvor enheten ikke lenger evner å utføre sin tiltenkte funksjon.
<b>Symptom:</b>	Enkeltstående eller flere tegn som sier noen om tilstanden til et utstyr, basert observasjoner og/eller målinger.
<b>Tilgjengelighet:</b>	Evnen til å utføre sin tiltenkte oppgave i en gitt tilstand under gitte forhold, gitt at nødvendige eksterne ressurser er tilstede.
<b>Tilstandsbasert overvåkning:</b>	En aktivitet, utført enten manuelt eller automatisk, med den hensikt å observere den aktuelle tilstanden til enheten.
<b>Tilstandsbasert vedlikehold:</b>	Forebyggende vedlikehold som baseres på tilstanden til det aktuelle utstyret. Kontroll gjennomføres enten kontinuerlig (målinger), periodisk (inspeksjon/kontroll, målinger, funksjonstest) eller ved behov [6].
<b>Vedlikehold:</b>	Kombinasjonen av alle tekniske og administrative aktiviteter som har til hensikt å opprettholde eller gjenvinne en tilstand som gjør en enhet i stand til å utføre en krevd funksjon.
<b>Vedlikeholdsstrategi:</b>	Styringsmetoden som benyttes for å oppnå vedlikeholdsmålene som er satt.
<b>Vedlikeholdsstyring:</b>	Alle vedlikeholdsaktiviteter som fastsetter vedlikeholdsmålene, strategiene og ansvar, og implementerer dem gjennom tiltak som vedlikeholdsplanlegging, vedlikeholdskontroll og tilsyn, og forbedring av metoder i organisasjonen, inkludert økonomiske aspekter [7].

## 2. LITTERATUR

### 2.1. SENTRIFUGALKOMPRESSOR – FUNKSJON, VIRKEMÅTE OG OPPBYGGING

En kompressors funksjon er å komprimere gassen for redusere volumet og øke trykket. I olje- og gassindustrien benyttes både dynamiske og volumetriske kompressorer for kompresjon av naturgass. Prinsippet bak en dynamisk kompressor er roterende skovlhjul som kontinuerlig tilfører gassen kinetisk energi som videre konverteres til trykk i en utløpskanal. Aksial- og sentrifugalkompressorer er eksempler på dynamiske kompressorer. Volumetriske kompressorer øker trykket ved å fortrenge gassen innenfor et pumpevolum. Stempel- og skruekompressorer er volumetriske kompressorer [8].

Sentrifugalkompressorer er i følge Gudmundsson [8] den mest brukte kompressortypen i olje- og gassindustrien, og den typen A/S Norske Shell benytter i gassanlegget på Nyhamna. Arrangementtegning av kompressorsystemet er gitt i vedlegg C. I denne oppgaven vil fokuset være på sentrifugalkompressorer.

En sentrifugalkompressor oppnår trykkøkning ved å benytte sentrifugalkraften til å øke gassens kinetiske energi. Denne energien konverteres videre til potensiell energi (økt trykk) ved å redusere gassens hastighet. Kompressorens bruksområder, oppbygging og begrensninger vil videre forklares nærmere.

#### 2.1.1. Bruksområder

Komprimert gass brukes hovedsakelig til [9]:

- Reinjeksjon i reservoar
- Gassløft
- Øke lagringskapasitet
- Trykkøkning i prosesser
- Transport

Etter hvert som olje og gass utvinnes, vil reservoartrykket naturlig avta. Trykket som er nødvendig for å øke eller opprettholde oljeproduksjonen oppnås ved at komprimert gass pumpes ned i reservoaret.

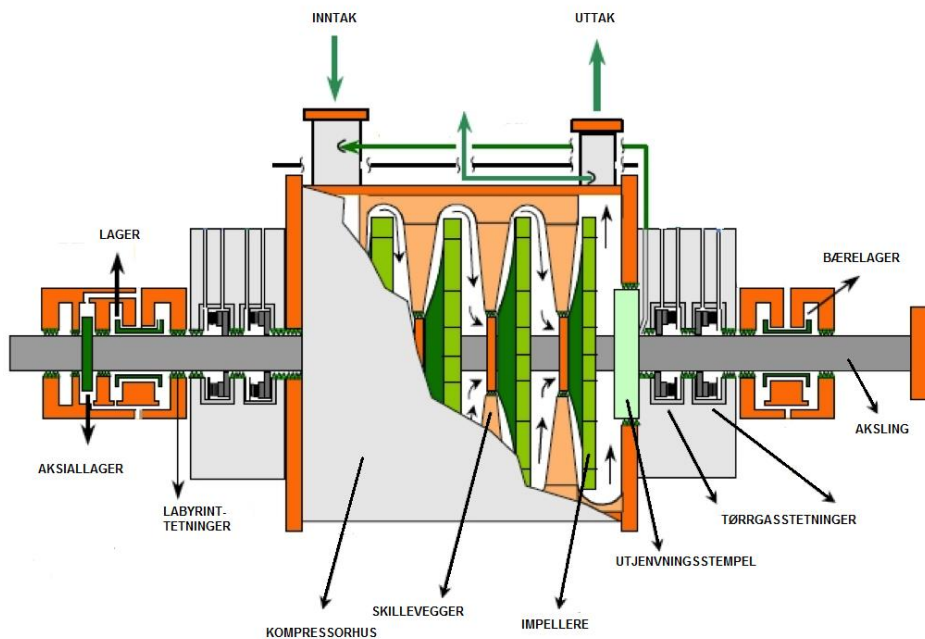
Trykket i produksjonsbrønnen vil også kunne avta. For å kompensere for dette benytter man *gassløft*. Løftet skjer ved at gass pumpes ned i ringrommet som omkranser oljebrønnen. Etter hvert som gassen når en gitt dybde vil den bevege seg gjennom en gassventil og inn i produksjonsbrønnen. Gassen ekspanderer og sørger for at olje presses opp mot overflaten [8].

Kompressorer benyttes også i forbindelse med lagring av gass. Komprimering av gass reduserer volumet, og øker dermed *lagringskapasiteten*. Den komprimerte gassen kan lagres som potensiell energi, og benyttes senere som kinetisk energi i prosesser som har behov for dette. Prosessering, kjøling og produksjon av væske, er alle eksempler på *prosesser* hvor trykkøkning er nødvendig.

Gass vil alltid bevege seg fra høyt trykk til lavere trykk. Dette utnyttes ved *transport* av gass gjennom rørledninger. Et eksempel på dette er gassanlegget på Nyhamna (se vedlegg B), som benytter tre gasskompressorer som til sammen produserer et gasstrykk på 230 bar. Gassen eksporteres 1200 kilometer gjennom rørledningen, Langeled, til Easington sør i England [10].

### 2.1.2. Kompressorens oppbygging

Et kompressorsystem er bygd opp av flere enheter, typisk består systemet av kompressor, driver, girboks, koblinger og tetning- og smøreljesystem. I noen tilfeller vil også gasskjølingssystem være en del av kompressorsystemet [11]. Selve kompressoren består hovedsakelig av et kompressorhus, en rotor, statiske deler, lager og tetninger. Hovedkomponentene er illustrert i Figur 1 og vil bli nærmere forklart i de påfølgende avsnittene.



Figur 1: Hovedkomponenter for en sentrifugalkompressor [12]

#### **Kompressorhus**

Kompressorhuset er et trykkbærende hus som omslutter de statiske og bevegelige delene av kompressoren, og som holder på trykket som skapes av impellerne. Gassen sendes inn via et inntaksrør i overkant av kompressorhuset og ut på motsatt side gjennom et uttaksrør (se Figur 1).

#### **Rotor**

Rotoren er den eneste bevegelige delen i en kompressor. Denne består av en aksling med impellere. En kompressor kan ha én eller flere slike komponenter montert på akslingen. På kompressoren illustrert i figur 1, er fire impellere montert på akslingen. Flere impellere skaper høyere trykk. Impellerne har til hensikt å øke hastigheten på gassen når akslingen roterer.

### ***Stasjonære deler***

Det er to gasspassasjer som former den stasjonære delen av kompressoren; innløpet og diffusor. En diffusor er formet for å bremse gassens strømningshastighet som er skapt av impellerne. Ved å redusere gassens strømningshastighet vil den kinetiske energien konverteres til potensiell energi i form av økt trykk.

### ***Lager***

Rotoren støttes opp av lagre. Lagrene skal gi friksjonsfri støtte til aksling og forhindre uønsket bevegelse. En skiller mellom aksiallager og bærelager (se Figur 1). Aksiallager skal forhindre aksielle bevegelser av akslingen som forårsakes av skyvekrefter. Bærelager støtter opp under vekten av rotoren og hindrer samtidig radiell bevegelse av akslingen.

### ***Tetninger***

Tetninger skal hindre gass fra å lekkke til omgivelsene og mellom stegene i kompressoren. Tetninger kan i hovedsak deles inn i tre klasser:

- Klareringstetninger (labyrinttetninger og restriktive tetningsringer)
- Oljetetninger (mekaniske- og væskefilmtetninger)
- Tørrgasstetninger

I Figur 1 er klareringstetning (labyrinttetning) og tørrgasstetninger markert. Disse vil bli forklart i detalj i kapittel 2.2.

### **2.1.3. Begrep og begrensninger**

I forbindelse med kompressorer og kompresjon av gass benyttes det definerte begrep og ord for å uttrykke en kompressors virkemåte og begrensninger. Videre følger noen sentrale definisjoner og forklaringer på dette.

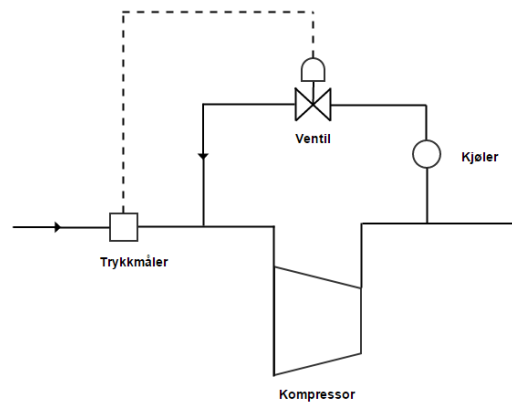
### ***Løftehøyde***

Energien en kompressor produserer i form av trykk uttrykkes gjerne som løftehøyde (eng. head). For kompressible medier er løftehøyde et ikke-fysisk begrep som angir høyden av en tenkt søyle av gassen som komprimeres. I bunnen av denne søylen vil trykket være tilsvarende den trykkøkningen som oppnås over kompressoren [13]. Løftehøyden kan angis både i meter og kJ/kg.

### ***Tilbakestrømning***

For at kompressoren skal oppnå trykkøkning må strømmingen jobbe mot et mottrykk. Dersom dette mottrykket blir for stort eller strømmingen gjennom kompressoren blir for liten, vil man få en reversering av gasstrømmen [13]. Tilbakestrømning gir et kraftig trykksjokk gjennom systemet, og er spesielt ødeleggende for tetninger og lager [8].

For å hindre tilbakestrømning er sentrifugalkompressoren utstyrt med en anti-surge ventil. Ventilen åpnes når trykket blir for lavt oppstrøms, og sender deler av gasstrømmen tilbake til innløpet av kompressoren for å øke strømningsraten og sørge for at trykket blir høyere ved uttaket av kompressoren (se Figur 2).

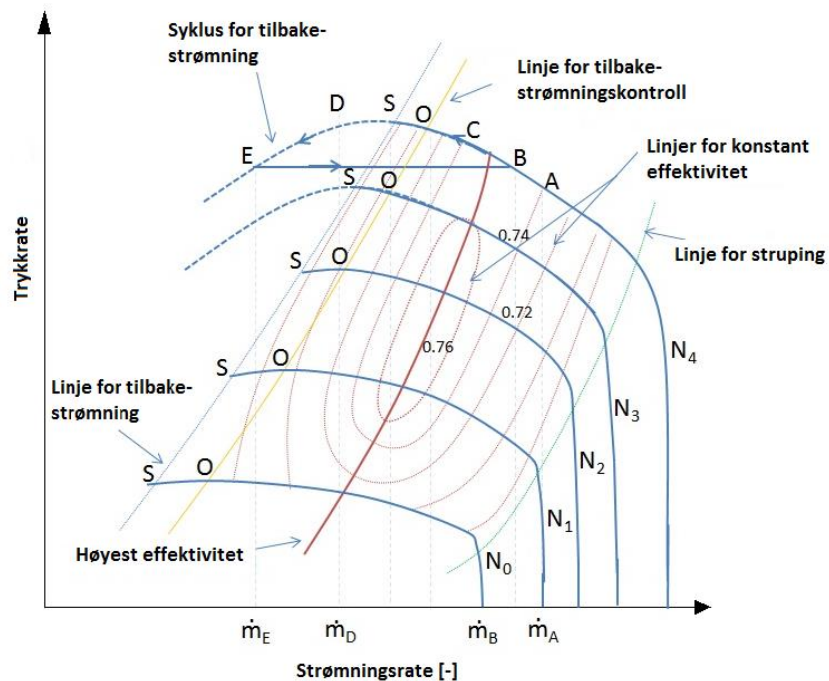


Figur 2: Prinsipp anti-surge ventil

### Struping

Når volumraten er høy og hastigheten på gassen blir lik den lokale lydshastigheten til gassen, oppstår struping (eng. choking). Når dette punktet er nådd vil det ikke lenger være mulig å øke gassens hastighet [8].

Tilbakestrømning og struping er to strømningsgrenser som setter begrensninger for driften av en sentrifugalkompressor. Figur 3 illustrerer typiske operasjonskurver hvor tilbakestrømning og struping er indikert.



Figur 3: Operasjonskurver for kompressor [14]



## ***Virkningsgrad***

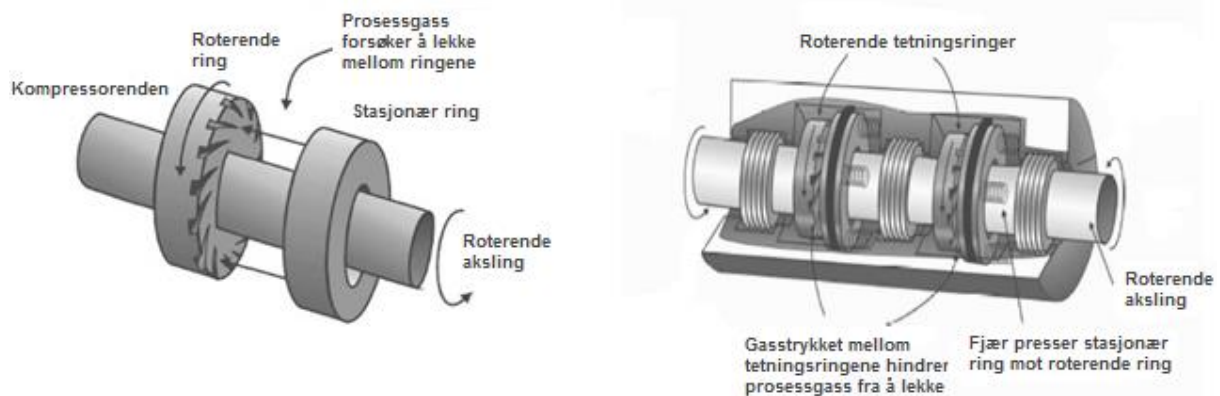
Ved valg av kompressortype og størrelse vil volumstrøm, løftehøyde og utløpstrykket være de viktigste parameterne å ta hensyn til. Den minste kompressortypen som klarer å levere kapasiteten vil som regel gi den beste virkningsgraden [13].

## **2.2. TØRRGASSTETNINGER**

Tørrgasstetninger (eng. dry gas seal) har de siste 20 årene vært å foretrekke framfor tradisjonelle oljetetninger, både av økonomiske og miljømessige hensyn. Som det ble nevnt i innledningen, er over 80 % av dagens sentrifugalkompressorer utstyrt med tørrgasstetninger [1]. En mer detaljert forklaring rundt denne typen tetninger, vil videre bli presentert.

### **2.2.1. Prinsipp**

Tørrgasstetninger benytter gass som tetningsmedium, hovedsakelig prosessgass fra uttaket av kompressoren. Gasslekkasjen kontrolleres av et lite, selvregulerende mellomrom som skapes av en roterende og en stasjonær tetningsring [15], som illustrert til venstre i Figur 4. Mellomrommet oppstår som et resultat av motarbeidende krefter. Når akslingen roterer vil hydrodynamiske krefter genereres av gass som ledes via innrissede spor i den roterende ringens overflate. De motsatt rettede kreftene, med høytrykksgass som ledes mellom ringene og fjærkraften som presser ringene sammen, skaper et lite mellomrom mellom tetningene hvor svært lite gass kan lekke. Når akslingen ikke roterer vil den stasjonære tetningsringen presses mot den roterende ringen på grunn av fjærkrefter (se Figur 4) [2].



**Figur 4: Prinsipp tørrgasstetninger [2]**

Figur 4 viser det vanligste oppsettet for tørrgasstetninger. Oppsettet består av en primærtetning og en sekundærtetning. Sistnevnte fungerer som støtte dersom primærtetningen skulle svikte. Doble motsatte tetninger er et alternativt oppsett, hvor to sett av tørrgasstetninger er vendt mot hverandre. Disse er vanlig dersom prosessgassen ikke egner seg som tetningsmedium [15]. En mer detaljert illustrasjon av tørrgasstetningene er å finne i Figur 7.

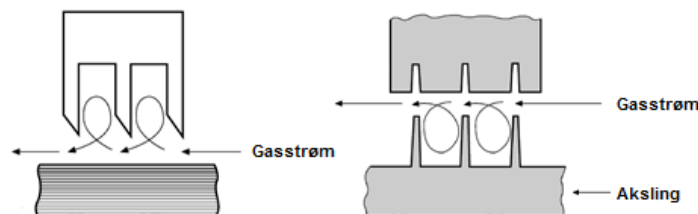
### 2.2.2. System for tørrgasstetninger

For å forme et komplett tetningssystem kombineres tørrgasstetningene med andre tetninger og eksterne hjelpesystem [16]. Som vist i Figur 7 består systemet av primær-, sekundær- og barrieretetning, labyrinttetninger, samt en rekke hjelpesystemer. Disse vil bli nærmere forklart i de påfølgende avsnittene.

#### **Barrieretetning**

Barrieretetningen er plassert etter primær- og sekundærtetningen, og har til hensikt å hindre at smøreolje fra lager trenger inn i tetningssystemet (se Figur 7). Tradisjonelt benyttes labyrinttetninger i kombinasjon med tørrgasstetninger.

Labyrinttetninger benyttes hvor det varieres mellom lavt til moderat trykk og hvor relative høye lekkasjerater er akseptabelt. Tetningene er bygd opp av et gitt antall tenner jevnt fordelt med åpninger mellom hver tann. To mulige utforminger er illustrert i Figur 5.



Figur 5: Labyrinttetninger [15]

Strømningen langs akslingen begrenses ved at gassen ekspanderer i åpningene mellom tennene. Lekkasjeraten er proporsjonal med størrelsen på åpningene, altså kan strømningen av gass reduseres ved å minimere disse åpningene.

Labyrinttetninger er også plassert mellom tørrgasstetningene og kompressorhuset, mellom primærtetningen og sekundærtetningen, og i barrieretetningen (se Figur 7). Disse benyttes for å regulere og styre gasstrømmen innad i tetningssystemet.

#### **Hjelpesystemer**

Hjelpesystemer skal sørge for at en jevn strøm av tørr og ren tettegass. Et typisk hjelpesystem for tørrgasstetninger består av filter, reguleringskomponenter og instrumentering [15].

Det eksisterer to systemer for å kontrollere strømning av tettegass – differensialtrykk (DP-system) eller strømningskontroll [1]. Ved bruk av DP-system benyttes en forhåndsbestemt trykkverdi over tetningens referansetrykk. Trykket kontrolleres ved hjelp av kontrollventiler.

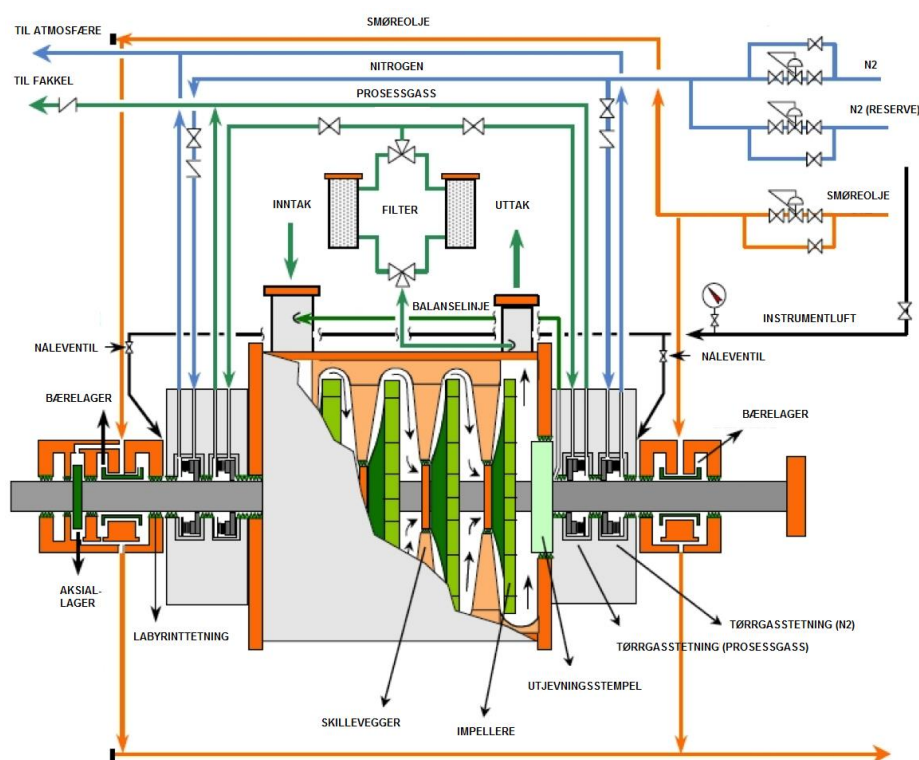
Ved bruk av strømningskontroll leveres trykket med en jevn strøm gjennom åpninger oppstrøms for tetningen. Åpningen kan reguleres av en enkel nåleventil, eller ved hjelp av kontrollventiler som måler differensialtrykket på hver side av åpningen.

Primærtetningen forsynes med prosessgass som hentes ut fra uttaket av kompressoren. Gassen filtreres og injiseres i første og indre del av tetningssystemet som illustrert i Figur 7 (grønn linje). I tilfeller hvor prosessgassen er ekstremt giftig eller skitten, kan

ekstern gass benyttes. For tetningsgass som har en økt tendens til å kondensere, kreves ytterligere behandling av gassen. To-steps-filter, væskeutskiller og mekaniske separatore er eksempler på instrument som kan benyttes for å håndtere væskedannelse [15].

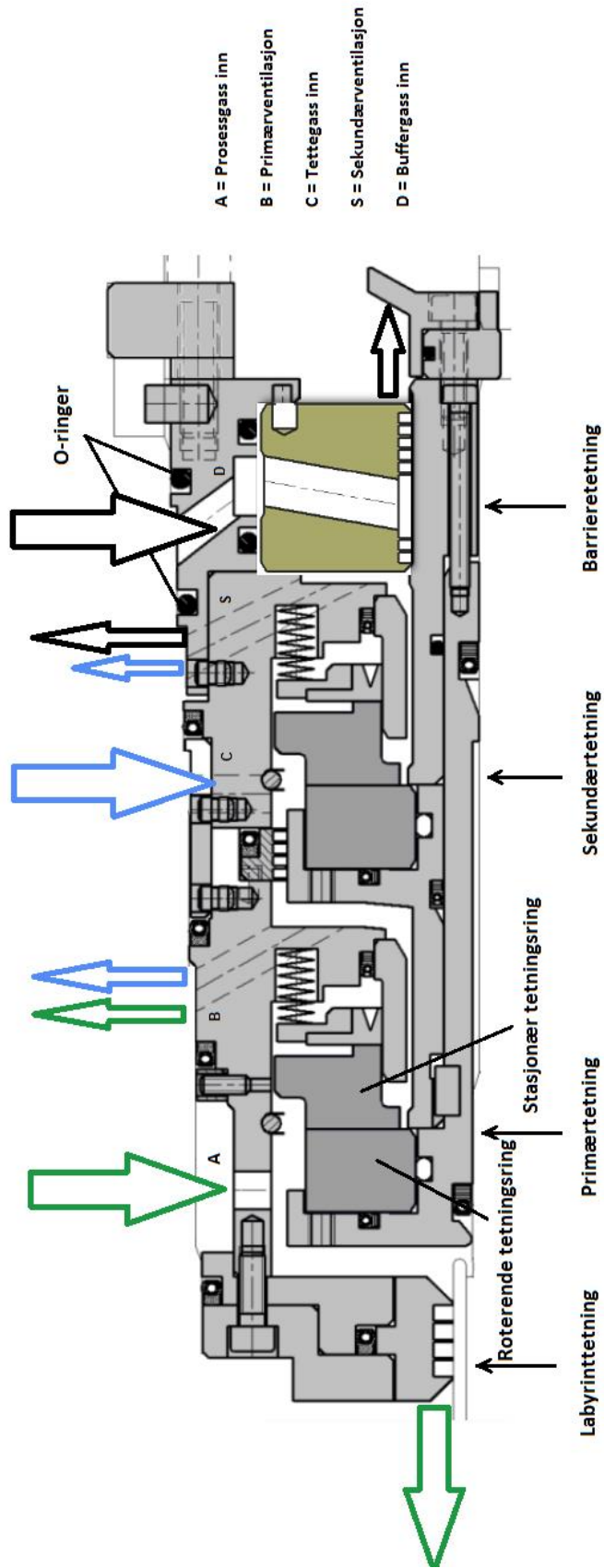
Sekundærtetningen forsynes med ekstern tettegass (blå linje i Figur 7). Normalt vil dette være nitrogen. Nitrogen finnes naturlig i luften og vil ikke gjøre skade på selve prosessen. Ventiler og trykkmålere skal sørge for at strømmingen reguleres.

Nitrogen kan også benyttes som tettegass for barrieretetningene, et annet alternativ er bruk av luft. Gassen som benyttes for barrieretetningen vil heretter omtales som buffergass. Dette for å skille mellom tettegassen som går inn på tørrgasstetningene (primær- og sekundærtetning) og tettegassen inn på barrieretetningen.



Figur 6: Gasskompressor med hjelpegasystem [12]

En trykksatt gass vil alltid velge den letteste vei gjennom et system [17]. Av den grunn vil om lag 90 % av gassen som sendes inn på primærtetningen bevege seg over den innvendige labyrinttetningen og tilbake inn i kompressoren. De resterende 10 % vil bevege seg mellom den roterende- og stasjonære tetningsflaten, og videre mot primærventilasjon og sekundærtetningen. 90 % av de resterende 10 % fra primærdelen vil forsvinne ut primærventilasjonen. Det samme prinsippet vil også gjelde for sekundærtetningen. For barrieretetningen vil buffergassen ledes over labyrinttetningen med færrest tenner, som utgjør den letteste vei. Gasstrømningen gjennom tetningssystemet er illustrert i Figur 7.



Figur 7: Tørrgasstetning [19]

### 2.2.3. Identifisering av feil og årsaker

Feil på tetningsutstyr utgjør 69 % av årsakene til at roterende utstyr svikter [3]. I de neste avsnittene vil feil og årsaker presenteres, og som videre benyttes i analysen av utstyret.

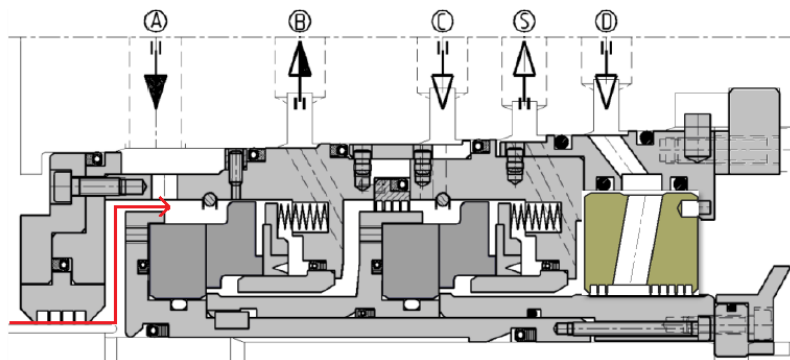
#### **Kontaminering av tettegass**

I følge Stahley [1] vil 80 % av tetningene svikte før tiden på grunn av kontaminering. Åpningen som skapes mellom den stasjonære og roterende tetningsringen ligger vanligvis på 3-4 mikrometer. Dersom fremmedpartikler trenger inn mellom disse to delene, vil det oppstå en økning i skjærkrefter mellom tetningsringene, som bidrar til overoppheting og i verste fall resulterer i mekanisk tetningssvikt.

Det er tre hovedkilder til kontaminering av tettegass:

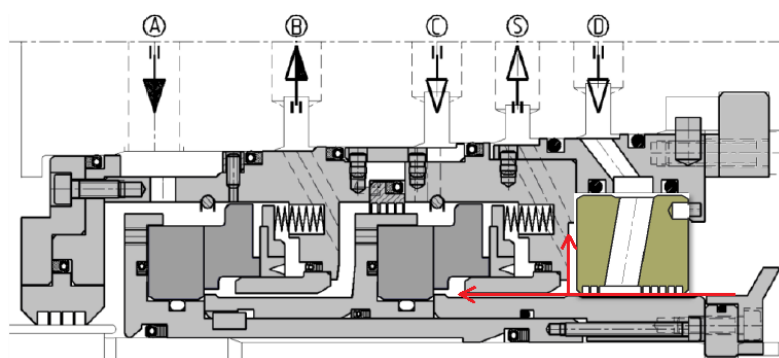
- Prosessgass (fra indre del eller høytrykksiden av tetningen)
- Smøreolje fra lager (fra ytre del eller lavtrykksiden av tetningen)
- Tettegassen selv (ved injisering i tetningene)

Kontaminering fra *prosessgass* kan oppstå dersom gasstrykket på tettegassen ikke har tilstrekkelig trykk til å overgå referansetrykket, og tilbakestrømning inntreffer. Dette gjør at gass kommer i direkte kontakt med tetningsringenes overflater (se Figur 8). Dersom denne gassen er forurenset vil dette gjøre skade på tetningene.



Figur 8: Kontaminering fra prosessgass

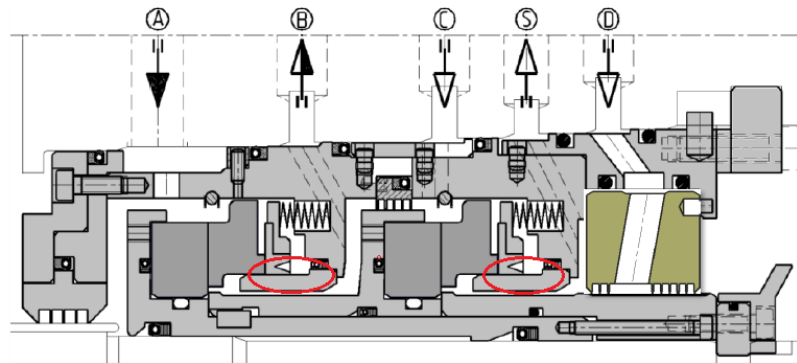
*Smøreolje* som benyttes for lager kan kontaminere systemet dersom smøreoljen trenger gjennom barrieretetningene. Typisk for barrieretetninger er å benytte luft eller nitrogen som buffergass for å holde tett mellom tetningssystemet og smøreoljen. Dersom trykket på buffergassen ikke er tilstrekkelig vil det kunne oppstå lekkasje av smøreolje i feil retning og inn i tetningssystemet (se Figur 9).



Figur 9: Kontaminering fra smøreolje

Kvaliteten på *tettegassen* må være tilstrekkelig for å unngå skade på tetningssystemet. Prosessgassen som trekkes ut fra uttaket å sendes inn i tetningssystemet må være tørr og filtrert i henhold til fastsatte krav. Filtreringsgraden bør ligge på 1-3 mikrometer. Den fine filtreringsgraden vil gjøre filteret sensitiv for skade under montering, samt lave temperaturer. Koalescerfilter, som skiller ut vannpartikler, eller dreneringsventiler bør også være en del av filtreringssystemet for å hindre at væske slipper gjennom [18].

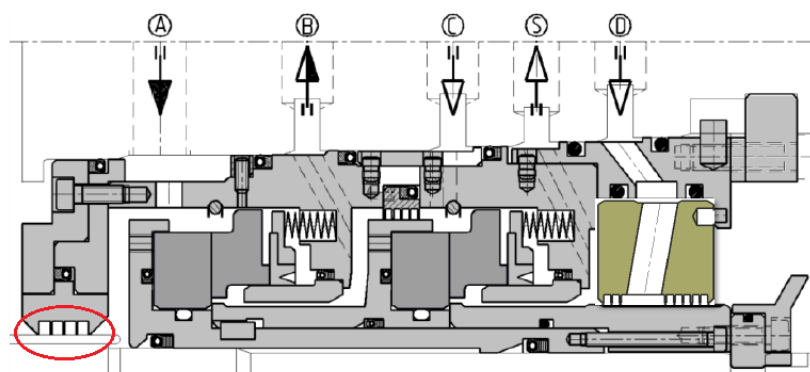
Fremmedpartikler kan også legge seg på flaten som den fjærbelastede tetningsringen glir på [19] (se Figur 10). Partiklene vil kunne hindre bevegelse og redusere mellomrommet mellom tetningsringene, og dermed også påvirke tetningsevnen.



Figur 10: Kontaminering fra tettegass

### **Slitasje på labyrinttetninger**

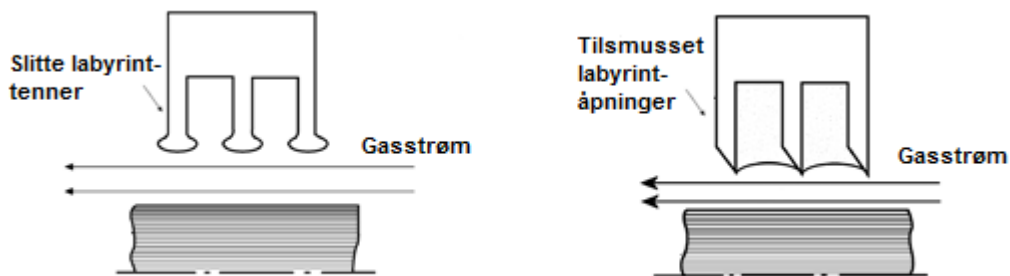
Labyrinttetninger er utsatt for slitasje og må skiftes ut med jevne mellomrom. Dersom prosessgassen er korrosiv, benyttes rustfritt stål. Ved bruk av dette materialet må klarering mellom tetningen og akslingen være stor nok for å unngå kontaktskade ved høye rotorvibrasjoner. Dersom det ikke stilles krav til materialet, kan mykere metall (aluminium eller bronse) benyttes for å redusere klareringen. Slitasje vil likevel kunne forekomme.



Figur 11: Slitasje på labyrinttetning

Når tetningene slites mot akslingen oppstår det en «mushrooming»-effekt (se Figur 12) som bidrar til økt klarering og gjennomstrømningen av gass. Når gjennomstrømningen øker over labyrinttetningene (se Figur 11) vil dette føre til at også mindre gass strømmer over tetningsflatene.

Økt gjennomstrømning av gass vil også kunne forekomme dersom labyrintåpningene tilsmusses (se Figur 12). Dette reduserer turbulensen som forårsaker en økning av gasstrøm mellom tetning og aksling. [15]



Figur 12: Slitasje og tilsmussing av labyrinttetninger

### ***Kontakt mellom tetningsflater***

Kontakt mellom den stasjonære og roterende tetningsringen oppstår dersom det ikke produseres tilstrekkelig løft som skaper selve separasjonen. Når flatene kommer i kontakt med hverandre vil det slipe ned de innrissede sporene i den roterende ringen, som er med på å skape det hydrodynamiske løftet (se Figur 13). Separasjonen av flatene skjer normalt når akslingen har en hastighet rundt 2 m/s [20]. Hastigheter lavere enn dette vil kunne føre til kontaktskade mellom tetningsflatene.



Figur 13: Roterende tetningsring [21]

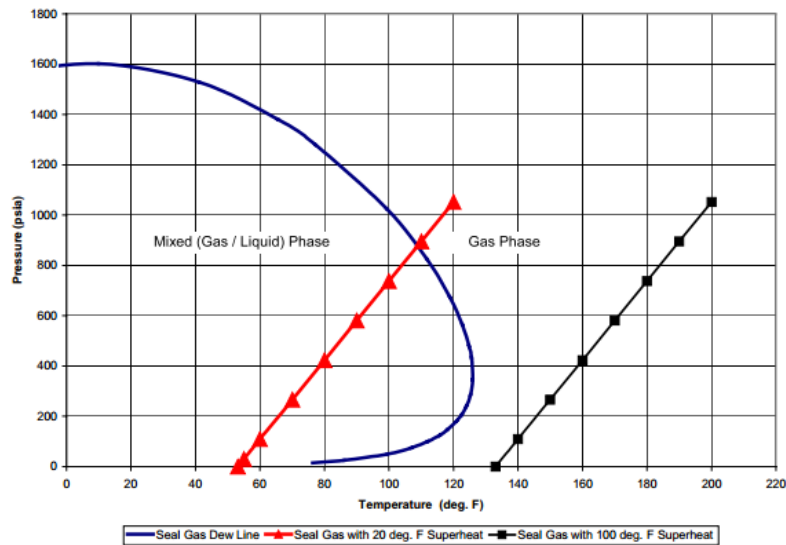
Ved filterfeil vil partikler kunne trenge inn i tetningssystemet og legge seg mellom tetningsflatene. Gnissninger og kontaktskade mellom flatene vil da kunne oppstå. Kontaktskader forekommer også ved installering av tetningskomponenter.

### ***Væskedannelse i systemet***

Risikoen for væskedannelse i systemet er gjeldende ved temperaturforandringer på prosessgassen. Avtagende temperatur skjer som en følge av trykkfallet som oppstår når gassen strømmer over ventiler, åpninger og andre hindringer. Denne effekten kalles Joule-Thomson-effekt, og et typisk fasediagram for dette er illustrert i Figur 14 [22].



Det fasediagrammet viser sammenhengen mellom trykk og temperatur, og hvordan gassen kan bevege seg inn i området hvor en får blanding mellom gass og væske.



Figur 14: Typisk fasediagram for tettegass [21]

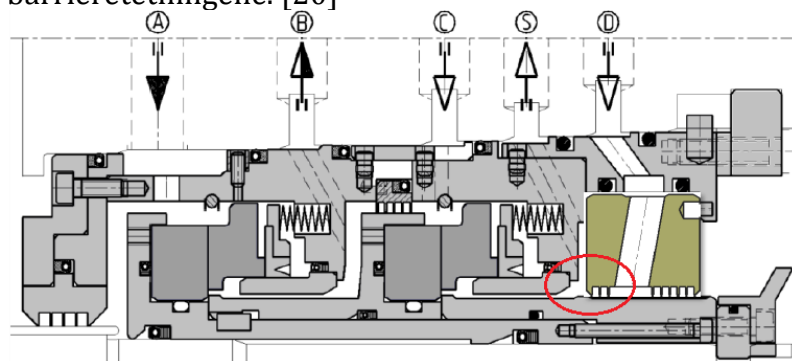
Væske i tørrgasssystemet vil kunne føre til korrosjon av tetningskomponenter. Faren med korrosjon er hovedsakelig at det kan skape stressansamlinger som videre kan resultere i brister i tetningskomponentene [16].

### ***Forskyvning av tetningsflater***

Med tiden vil fjærtrykket på den stasjonære tetningsringen kunne forandre seg [17]. Dette skal normalt ikke skje, men dersom fjæren er feildimensjonert for trykket den skal motstå, vil den med tiden kunne svekkes [12]. Ujevnt fjærtrykk vil forskyve tetningsringen slik at denne ikke lenger er parallell med den roterende tetningsringen. En konsekvens av dette vil være økt gjennomstrømming av gass over tetningsflatene.

### ***Separasjon av fluider***

Som tidligere nevnt i 2.2.2, vil barrieretetningene sørge for at smøreolje og gass ikke kommer i kontakt med hverandre. For noen tetningssystem vil det være oljeutskillerer montert for å fange og drenere overflødig smøreolje. Feil på disse oljeutskillerne vil kunne påvirke trykket i området rundt barrieretetningene og olje vil kunne trenge inn (se Figur 15). Dersom denne oljen forblir i dette området over lengre tid, vil det omsider føre til svikt av barrieretetningene. [20]



Figur 15: Separasjon av fluider



I tilfeller hvor segmentert karbonring benyttes i barrieretetningene vil duggpunktet på nitrogenet (buffergassen) kunne skape problemer for karbonringene [19]. Med duggpunkt menes det den temperaturen en gassmengde må avkjøles til (ved konstant trykk) for at vanddamp skal kondensere til vann [24]. Grunnen til problemene er at karbonringene er i kontakt med akslingen og har behov for den fuktigheten som er til stede i nitrogenet. Dersom duggpunktet på nitrogenet kommer under  $- 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ved atmosfærisk trykk, vil denne gassen bli for tørr til å kunne benyttes i kombinasjon med denne typen karbonringer [19].

#### **2.2.4. Når problemer oppstår**

Under dette punktet vil de identifiserte feilene settes i sammenheng med ulike operasjonstilstander.

##### ***Oppstart***

Utilstrekkelig trykk på prosessgassen er det største problemet ved oppstart av kompressoren. Dersom uttakstrykket ikke overgår referansetrykket til kompressoren vil dette føre til en reversering av gasstrømmen (se Figur 8). Ufiltrert gass vil lekke over labyrinttetningen og videre inn i tetningssystemet.

Ved oppstart vil det også være fare for vibrasjoner av akslingen. Vibrasjoner oppstår for enkelte turtallsområder, og kan føre til slitasje av labyrinttetningene som nevnt i kapittel 2.2.3.

##### ***Usammenhengende kjøring***

Usammenhengende kjøring og kjøring av kompressoren på redusert effekt er ingen optimal operasjonstilstand. Når utstyret ikke går får full effekt vil dette resultere for lav trykkstigning til å opprettholde tilstrekkelig trykk inn tetningene [21]. Det samme vil også gjelde for usammenhengende kjøring i forbindelse med stans og oppstart. I følge Health & Safety Executive [16] vil antall start og stopp øke sannsynligheten for tetningsproblemer betraktelig, både med tanke på kontaminering og generell slitasje av tetningskomponenter.

##### ***Stasjonær tilstand***

Når kompressoren stoppes og blir stående i stasjonær tilstand, vil temperaturen på gassen synke. Dette vil få en rekke følger for tetningssystemet. Risikoen for blant annet kondensering vil være større ved igangsetting etter en slik stans. Det vil også være fare for at det utskilles partikler i gassen som følge av temperatur- og trykkforandring.

Ved tap av trykk på buffergass inn på barrieretetningene under denne tilstanden, vil være risiko for å kontaminere tetningskomponenter med smøreolje [21]. Når kompressoren står i stasjonær tilstand er det viktig at tilførselen av smøreolje er kuttet, da smøreoljen ikke lenger møter noen motstand i barrieretetningene.

### ***Avbrutte operasjoner***

Kompressoren blir utsatt for store eksterne krefter når krafttilførselen kuttes. Ved kraftbortfall kreves umiddelbar nedstenging, som kan frembringe uønsket bevegelse og vibrasjoner [25]. Spesielt når utstyret går med høy last vil påkjenningene være store for komponentene. Kontaktskade mellom tetningsflater og slitasje av labyrinttenner vil være utsatte områder.

Ved uforutsette nedstenginger vil trykket som er nødvendig for å opprettholde en positiv strømningsinn på tetningene, forsvinne. Som nevnt under *oppstart*, vil ufiltrert gass kunne lekk inn i tetningssystemet (se Figur 8).

### ***Nedkjøring***

Ved overhalling må kompressoren tømmes helt for prosessgass. For å oppnå dette spyles kompressoren med nitrogen etter nedkjøring. Denne prosessen kan føre til at smuss og partikler fra kompressoren trenger inn i tetningssystemet [17]. Urenheter fra nitrogengassen som benyttes til spyling, kan også kontaminere tetningene.

På lik linje med oppkjøring vil utilstrekkelig trykk på prosessgassen og vibrasjoner være et problem også ved nedkjøring av kompressoren.

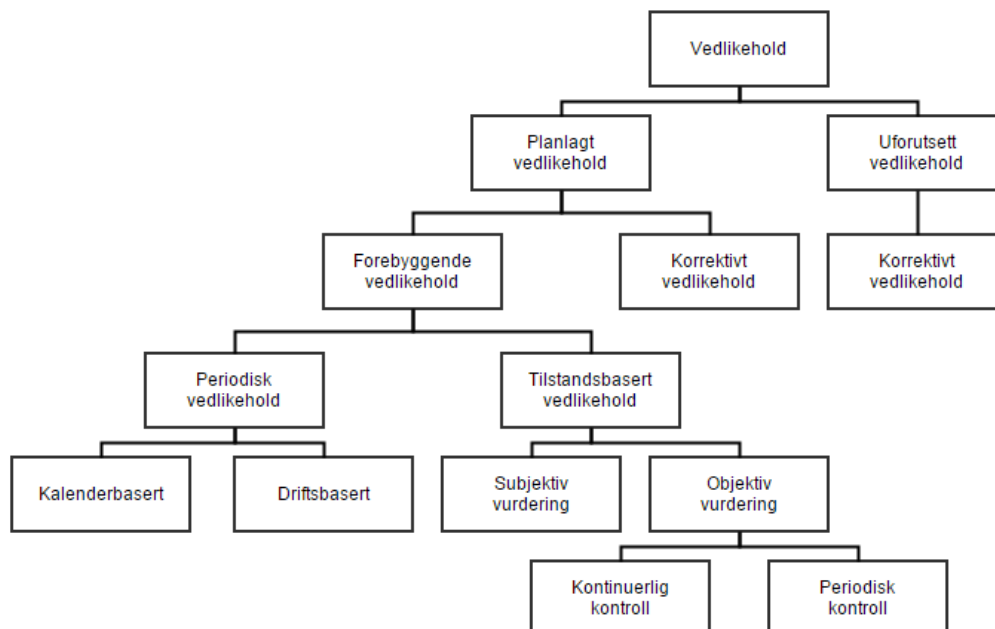
## 2.3. VEDLIKEHOLDSSTYRING

Utviklingen innenfor de fleste industrier i dag går i retning av stadig mer kapitalintensive og teknisk komplekse anlegg [26]. Driftsstans av denne typen anlegg kan resultere i store kostnadstap, noe som gjør det viktig med høy driftssikkerhet på utstyret som benyttes. Vedlikeholdet av utstyret spiller en viktig rolle i målet om å oppnå dette. Norsk Standard [5] definerer *vedlikehold* som kombinasjonen av alle tekniske og administrative aktiviteter som har til hensikt å opprettholde eller gjenvinne en tilstand som gjør en enhet i stand til å utføre en krevd funksjon. Generelt vil vedlikeholdet og hvordan dette styres, påvirke totaløkonomien for et anlegg. I de neste avsnittene vil derfor ulike vedlikeholdsteknikker og strategier presenteres.

### 2.3.1. Vedlikehold før og nå

Det har de siste tiårene skjedd en stor utvikling innenfor vedlikehold. Ifølge Moubroy [27], kan utviklingen deles inn i tre generasjoner. Gjennom den første generasjonen var det lite fokus på systematisk vedlikehold. Utstyret på den tiden var enkelt og pålitelig, noe som gjorde det lett å reparere når det omsider feilet. Andre generasjons vedlikehold strakk seg fra andre verdenskrig til midten av 1970-årene. I denne perioden kom nedetid i fokus, og som en følge av dette ble forebyggende vedlikehold introdusert. Dette resulterte i økte vedlikeholdskostnader som videre førte til utvikling og bruk av vedlikeholdsplanlegging og kontrollsystemer. På midten av 70-tallet ble det et større behov for pålitelighet, tilgjengelighet, kostnadseffektivitet og økt levetid på utstyr. Tilstandsovervåkning, feilanalyser og risikostudier er teknikker preger den tredje generasjonen vedlikehold.

Tradisjonelt utføres vedlikehold i dag planlagt eller uforutsett. Uforutsett vedlikehold omtales gjerne som korrektiv vedlikehold, og genereres først når en feil inntreffer.



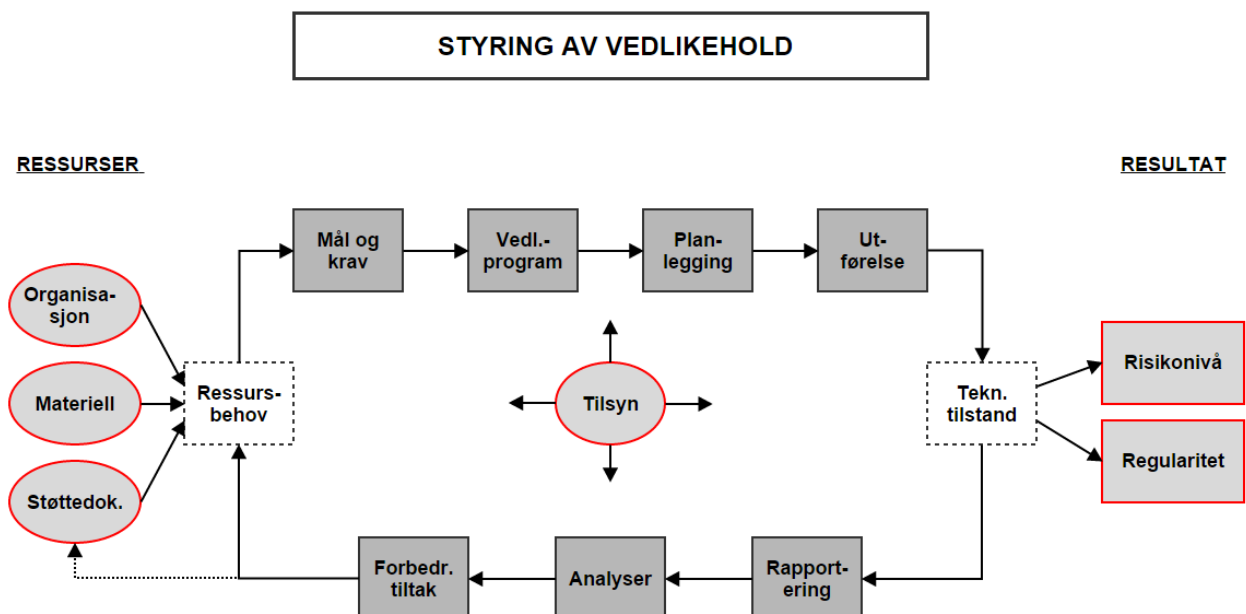
Figur 16: Vedlikeholdsmetoder

Planlagt vedlikehold kan utføres både korrektivt og forebyggende. Her er det da snakk om hvilken strategi en velger å benytte. I det planlagte tilfellet vil korrektivt vedlikehold gjøres som en konsekvent handling ved å la utstyret kjøres til det feiler.

Forebyggende vedlikehold utføres enten periodisk eller tilstandsbasert. Det periodiske vedlikeholdet har et fastsatt intervall som avgjør når vedlikeholdet skal utføres. Antall driftstimer eller tiden utstyret har vært i operasjon, er to måter å fastsette vedlikeholdsintervallet etter. Tilstandsbasert vedlikehold utføres basert på utstyrets tilstand, og vil bli forklart i mer detalj i kapittel 2.3.4. De ulike vedlikeholdsmetodene er illustrert i Figur 16.

### 2.3.2. Styringsmodeller

Som det er blitt sett på til nå er vedlikehold et område i kontinuerlig utvikling, som tilpasses behovene etter hvert som ny teknologi, metoder og konsepter dukker opp. Selve vedlikeholdsstyringen omfatter alle vedlikeholdsaktiviteter som fastsetter vedlikeholdsmålene, strategiene og ansvar, og implementerer dem gjennom tiltak som vedlikeholdsplanlegging, vedlikeholdskontroll og tilsyn, og forbedring av metoder i organisasjonen, inkludert økonomiske aspekter [7]. Det eksisterer en rekke styringsmodeller som sikrer at disse aktivitetene dekkes. Innenfor petroleumsvirksomheten er styringssløyfa (se Figur 17), utviklet av Oljedirektoratet, den mest kjente.



Figur 17: Styringssløyfa [28]

Styringssløyfa oppsto som et resultat av prosjektet «Basisstudie vedlikeholdsstyring» utført av Oljedirektoratet høsten 1996 [28]. Hensikten med prosjektet var å utvikle en metode for aktuelle selskaper for å gjøre en systematisk og helhetlig vurdering av eget vedlikeholdssystem. Oljedirektoratet så behovet for å heve kvaliteten på styring av sikkerhetsrelatert vedlikehold, og tydeliggjøre hvilke forventninger og krav en har innenfor dette området.

En forklaring av elementene i styringsmodellen finner vi i NORSOK-standard Z-008. NORSOK-standarder er utviklet av norsk petroleumsindustri for å sikre tilfredsstillende sikkerhet, verdiskapning og kostnadseffektivitet for utbygging og drift i petroleumsindustrien. Disse standardene er ment å erstatte oljeselskapenes spesifikasjoner og benyttes som referanser i myndighetenes regelverk [29].

I følge NORSOK [29] skal elementene i styringsløyfen dekke følgende:

Mål og krav: Mål og krav som er realiserbart for organisasjonen skal etableres. Vedlikeholdsstrategier bør være definert for verdifullt utstyr og eiendeler. Målene bør ha fokus på

- Risiko, produksjon og kostnader.
- Krav fra reguleringer og forskrifter.
- Anleggets tekniske tilstand med spesielt fokus på sikkerhetssystemer og kritiske prosesser.
- Forbedring av den generelle vedlikeholdsprosessen.

Vedlikeholdsprogram: For å etablere et vedlikeholdsprogram skal feil og feilårsaker som har betydning for sikkerhet og produksjon identifiseres og risikoen kartlegges. Vedlikeholdsprogrammet skal inkludere vedlikeholdsintervall og skriftlige prosedyrer for å opprettholde, teste og behandle de forskjellige komponentene innenfor anlegget.

Planlegging: En vedlikeholdsplan er et strukturert oppsett som inkluderer aktiviteter, prosedyrer, ressurser og tidspunktet for når vedlikeholdet skal utføres. Budsjettering, langtidsplanlegging, korttidsplanlegging og prioritering inkluderes under dette elementet.

Utførelse: Utførelse inkluderer forberedelser, arbeidstillatelser, utføring av arbeidet og rapportering av informasjon til arbeidsordren. Vedlikeholdsaktivitetene skal utføres sikkert og kostnadseffektivt. For å oppnå kontinuerlig forbedring bør systemet og utstyrets tilstand rapporteres både før og etter vedlikehold er utført. Prioritering av utstyr baserer seg på risikovurderinger.

Rapportering: Dette elementet inkluderer innsamling og kvalitetssikring av vedlikeholdsdata, samt fremstilling av dette til aktuelle vedlikeholdsavdelinger i form av definerte indikatorer.

Analyser og tiltak: Analyser av historiske vedlikeholdsdata og uønskede hendelser relatert til vedlikehold. Eksempler på dette kan være trendanalyser og rotårsaksanalyser. Informasjonen man får fra analysene bør evalueres og passende tiltak innføres.

For å dekke disse elementene er man avhengig av tilgang på ressurser. Organisasjon (mennesker), materiell (utstyr, reservedeler, etc) og dokumentasjon (vedlikeholdsdata, beskrivelser, etc.) utgjør disse ressursene.

Det er viktig at alle elementene i styringssløyfen er til stede for å få en lukket sløyfe, og dermed et velfungerende vedlikehold. Resultatet blir et akseptabelt risikonivå og økt tilgjengelighet for anlegget.

### **2.3.3. Valg av vedlikeholdsstrategi**

Som tidligere nevnt er vedlikehold aktivitetene som gjøres for å opprettholde eller gjenvinne en tilstand for at enheten skal utføre sin funksjon. Måten dette gjøres på vil være avhengig av hvilken vedlikeholdsstrategi som velges.

#### ***Pålitelighetsbasert vedlikehold***

Pålitelighetsbasert vedlikehold (eng. Reliability-centered Maintenance - RCM) er en metode som kan brukes for å fastslå hvilken vedlikeholdsstrategi som bør benyttes for det aktuelle utstyret. Metoden har fokus på å bevare funksjonen til det tekniske utstyret [27].

RCM baserer seg på en forholdsvis enkel metodikk, hvor syv spørsmål må besvares og dokumenteres for utstyret:

1. Hva er funksjonen til utstyret?
2. På hvilke måter kan dens funksjon slutte å fungere?
3. Hva er årsaken til funksjonsfeil?
4. Hva skjer ved hver funksjonsfeil?
5. Hva er konsekvensen ved hver funksjonsfeil?
6. Hva kan gjøres for å forutsi eller forhindre hver funksjonsfeil?
7. Hva kan gjøres dersom det ikke eksisterer passende preventive tiltak?

Ved å besvare disse spørsmålene vil en få oversikt over hvordan utstyret feiler og konsekvensene ved slike feil. Basert på dette kan vedlikehold for å forhindre og forebygge feil velges, og optimal vedlikeholdsstrategi utarbeides.

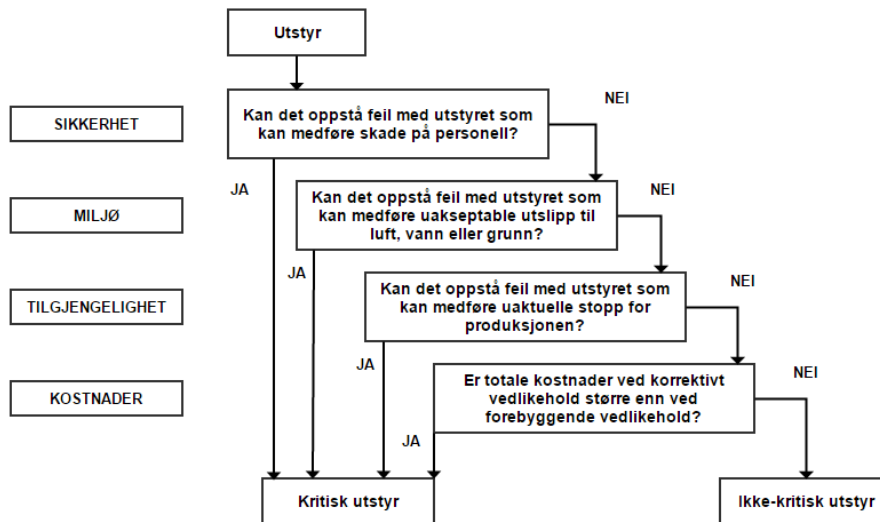
Bye [6] deler RCM-konseptet inn i fire separate aktiviteter for å besvare de syv spørsmålene. En kort innføring i disse aktivitetene vil videre presenteres.

#### ***Funksjonsanalyse***

I denne analysen kartlegges alle funksjonene til utstyret/systemet i et funksjonshierarki. Nedbrytingen av funksjoner skjer etter hovedfunksjon med tilhørende underfunksjoner. Dette gir en oversikt over hvilke funksjoner som forsvinner når en enhet feiler.

### **Feil- og kritikalitetsanalyse (FMECA)**

Feilmoder og feilkonsekvenser for utstyret kartlegges ved å utføre denne analysen. Formålet er å se sammenhengen mellom feil og årsak/konsekvens for å skille mellom kritiske og mindre kritiske utstyrsfeil. Et enkelt konsekvensdiagram kan benyttes i kritikalitetsvurdering av det aktuelle utstyret (se Figur 18).



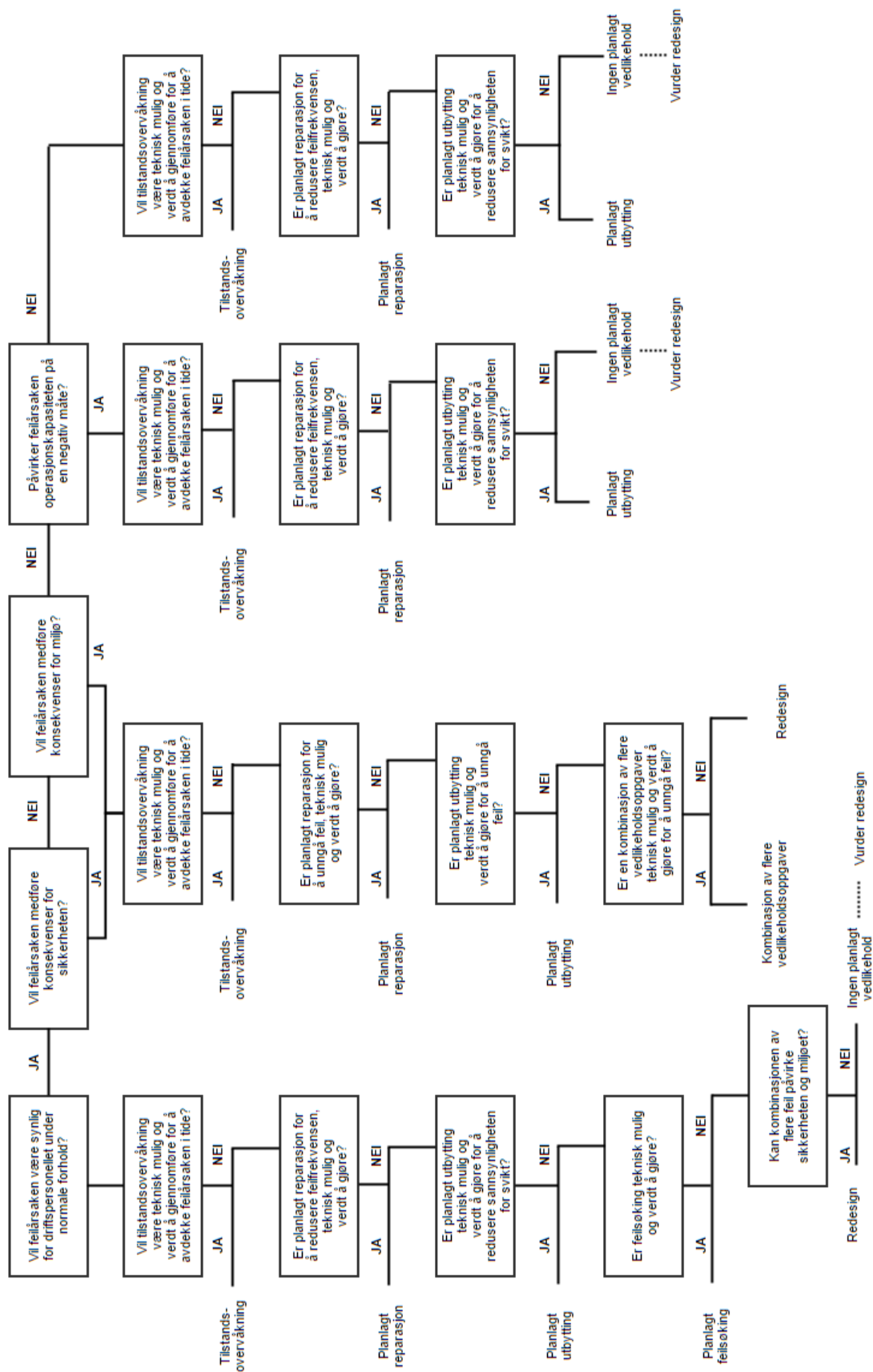
Figur 18: Kritikalitetsvurdering av vedlikeholdsenhet [6]

### **Identifikasjon av vedlikeholdsaktiviteter**

Valg av vedlikeholdsstrategi kan man, i følge Moubray [27], komme fram til ved å benytte et beslutningstre (se Figur 19). Som vist i figuren på neste side, vil man ved å svare på spørsmål knyttet til feilårsaker, kunne komme fram til hvordan vedlikeholdet skal drives.

### **Kontinuerlig forbedring av vedlikeholdet**

Behov for endringer identifiseres gjennom nevnte analyser og tilbakerapportering av utført vedlikehold.



Figur 19: RCM besluttingslogikk [27]



#### **2.3.4. Tilstandsbasert vedlikehold**

Tilstandsbasert vedlikehold er en metode som brukes for å redusere usikkerheten ved vedlikeholdsaktiviteter, og utføres basert på utstyrets tilstand [30]. Hensikten med metoden er ifølge Mobley [31]:

- å avgjøre om det er problemer med utstyret, hvor alvorlig det er og hvor lenge utstyret kan kjøres før det feiler
- å oppdage og identifisere problemer hos spesifikke komponenter i utstyret som svekkes og sette en diagnose på problemet

En slik måte å drive vedlikehold på gir en rekke fordeler. Dersom man baserer seg på planlagt vedlikehold, vil det være fare for at en velfungerende komponent skiftes ut. Ved tilstandsbasert vedlikehold unngår en dette, antall korrektive vedlikeholdsaksjoner reduseres og komponentens levetid vil kunne forlenges ved å utføre riktig vedlikehold til riktig tid [32].

En annen fordel med tilstandsbasert vedlikehold vil være muligheten til å planlegge vedlikeholdet med tanke på personell, reservedeler og optimalt vedlikeholdstidspunkt med hensyn på driften [32]. På denne måten kan en unngå unødig nedetid og produksjonstap.

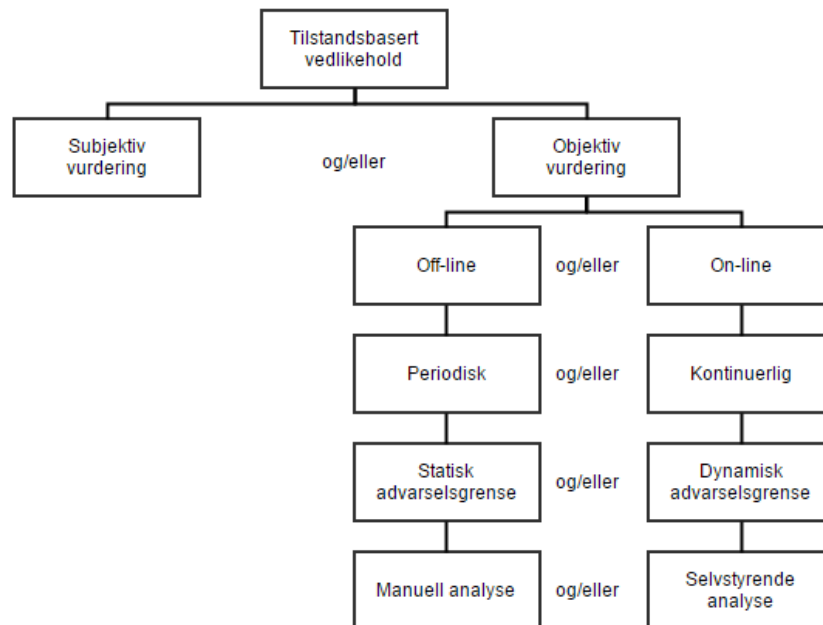
Sannsynligheten for havari reduseres, da kritiske feil tidlig kan oppdages og utbedres. For mange komponenter vil planlagt vedlikehold være utfordrende, da de ikke har et klart slitasjemønster. Generelt kan man si at tilstandsbasert vedlikehold er en vedlikeholdsstrategi som egner seg uansett sviktmønster så fremt det eksisterer en metode som kan oppdage potensielle feil tidsnok til at en vedlikeholdsaksjon kan utføres før svikt inntreffer [26].

En utfordring med tilstandsbasert vedlikehold kan være kostnadene knyttet til det å innføre vedlikeholdsstrategien. Forholdet mellom initiale kostnader til nødvendig måleutstyr, instrumentering og eventuelle endringer av utstyret, må veies mot den totale lønnsomheten med å innføre tilstandsbasert vedlikehold.

Overgangen til tilstandsbasert vedlikehold vil også kreve organisatoriske endringer, med tanke på hvordan vedlikeholdet utføres. Bearbeiding av observasjoner og måledata til kunnskap om utstyrets tilstand, krever god ekspertise og erfaring hos vedlikeholds-personellet.

### **Tilstandsbasert overvåkning**

Overvåkning vil være sentralt ved tilstandsbasert vedlikehold. Overvåkning defineres som aktiviteten som utføres manuelt eller automatisk, med den hensikt å observere den faktiske tilstanden til en enhet [33]. Tilstandsovervåkning kan utføres på ulike teknologiske nivå og ulike tilnærminger. Dette er illustrert i Figur 20. Felles for disse er at overvåkningen utføres i operasjonstilstand.



Figur 20: Tilstandsbasert overvåkning [33]

Overvåkningsteknikkene kategoriseres etter symptomene de er designet for å oppdage [27]:

- Dynamiske vurderinger (vibrasjon, forflytning, o.l.)
- Fysiske vurderinger (brudd, slitasje, deformasjon, o.l.)
- Partikkelutslipp
- Kjemisk utslipp
- Temperaturforandring
- Elektrisk forandring (resistans, konduktivitet, o.l.)

### **Tilstandsbasert feildiagnostikk**

Tilstandsbasert feildiagnostikk er en prosess som trigges når tilstanden på utstyret avviker fra sin forventede tilstand. Feildiagnostikk baserer seg på analyser av symptomatisk informasjon som avdekkes ved tilstandsbasert overvåkning og målinger [30].

Yam et.al [30] presenterer prediktive intelligente støttesystemer som kan benyttes i diagnostiseringen. Prinsippet bak et slikt system er å fungere som verktøy for beslutningstakeren, slik at avgjørelser knyttet til vedlikeholdsaksjoner blir mer effektive og virkningsfulle.

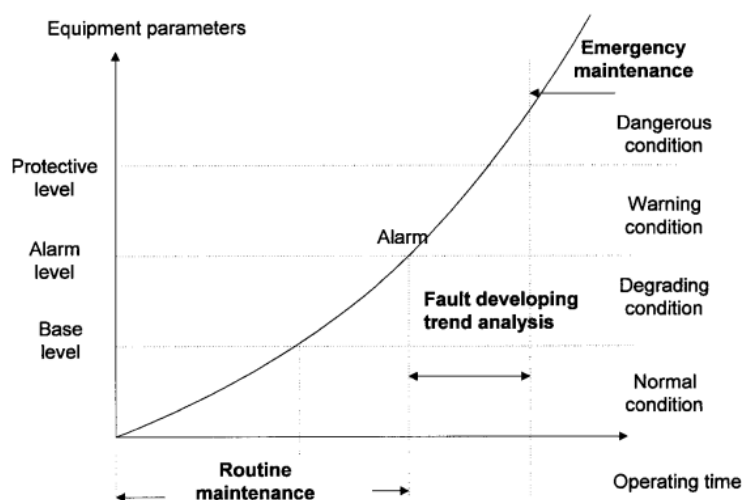
Det intelligente støttesystemet baserer seg på databehandling, og kan formes fra det helt enkle til et mer kompliserte og avansert datasystem. I feildiagnostikk kan systemene deles inn i tre kategorier [30]:

1. Regelbasert diagnosesystem
2. Situasjonsbasert diagnosesystem
3. Modellbasert diagnosesystem

Det regelbaserte diagnosesystemet er todelt, bestående av en database og en beslutningsmotor. Databasen består av regler som er lagret basert på kunnskapen om det aktuelle utstyret. Reglene er formet slik at en beslutning kan tas basert på den logiske setningen "HVIS en tilstand, SÅ en handling". Systemet oppdager og identifiserer begynnende feil som samsvarer med de reglene som er representert i databasen.

Situasjonsbasert diagnosesystem benytter tidligere vedlikeholdssituasjoner til å sammenligne og tolke tilstanden til utstyret. Historiske vedlikeholdsdata består av tidligere hendelser, feil og funksjonssvikt på utstyret som automatisk vil dukke opp dersom lignende hendelser inntreffer.

Et modellbasert diagnosesystem sammenligner utstyrets faktiske tilstand med en utstyrmodell for å forutsi feiltilstanden. Matematiske modeller, nevrale nettverk og logiske metoder er eksempler på teknikker som kan benyttes for å forme en slik utstyrmodell.



Figur 21: Vedlikeholdsanbefalinger basert på utstyrets tilstand [30]

Figur 21 illustrerer hvordan et slikt diagnosesystem kan brukes til å gi vedlikeholdsanbefalinger knyttet til utstyrets tilstand. Under normale forhold vil behovet for vedlikehold være lavt. Når utstyret svekkes og degradert tilstand avdekkes, vil det bli behov for å utføre trendanalyser som kan avdekke feilene og problemområder. Økt tilstandsovervåking eller svekkereduserende tiltak bør iverksettes for å unngå uønskede situasjoner. Alarmnivåer vil varsle operatører og vedlikeholdspersonell når utstyrparameterne avviker fra sin normalt tilstand. Resultater fra feildiagnostikken vil brukes for å planlegge og å iverksette passende vedlikeholdsaktiviteter.

## 3. METODE

Hensikten med dette kapitlet er å beskrive metoden som er benyttet for å analysere tetningsutstyret, hvordan analysen er utført og hvordan informasjonen er samlet inn.

### 3.1. FEILMODE SYMPTOMANALYSE

For å kunne drive tilstandsbasert vedlikehold på et utstyr er det viktig å ha kunnskap om hvordan utstyret feiler og de underliggende årsakene til dette. For å finne svar på dette vil analysemetoden FMSA (eng. Failure Mode Symptom Analysis) benyttes. Hensikten med denne metoden er å danne et grunnlag for valg av strategi og overvåkningsteknologi som maksimerer sikkerhetsgraden i diagnostiseringen for enhver feilårsak [34].

Ved hjelp av denne metoden er det mulig å identifisere symptomer som kan benyttes i vurderingen av tilstanden på utstyret, og som videre danner et grunnlag for valg av vedlikeholdsteknikk. Med symptom menes det oppfatningen som gjøres ved observasjoner eller målinger, som kan indikere én eller flere feil på det aktuelle utstyret. En diagnose på utstyret stilles på bakgrunn av identifiserte symptomer.

Sammenlignet med andre kjente analysemetoder som bl.a. FMECA (se kapittel 2.3.3), er FMSA-metodikken en mindre etablert metode. Så langt det er kjent for forfatteren, er ikke metoden benyttet i lignende sammenhenger tidligere.

#### 3.1.1. Behov ved gjennomføring av analyse

ISO 13379-1 [34] omfatter de generelle prosedyrene i FMSA-metodikken. De sentrale stegene i diagnosestudiet er som følger:

1. Analysere utstyrets tilgjengelighet, vedlikeholdsvennlighet og kritikalitet med hensyn på hele prosessen.
2. Liste opp de største komponentene og deres funksjoner.
3. Analysere feilmoder og årsaker til komponentfeil.
4. Uttrykke kritikaliteten der det tas hensyn til betydningen (sikkerhet, tilgjengelighet, vedlikeholdskostnader, produksjonskvalitet) og forekomsten.
5. I samsvar med dette skal det bestemmes hvilke feil som skal dekkes av diagnostikk («diagnostiserbare»).
6. Analysere under hvilke operasjonstilstander de forskjellige feilene best kan observeres, og definer referansetilstander.
7. Uttrykke hvilke symptomer som kan benyttes i vurderingen av tilstanden på utstyret, og dermed kan brukes i diagnostiseringen.
8. Liste opp faktorene som brukes for å evaluere (gjenkjenne) de forskjellige symptomene.
9. Identifisere nødvendige målinger og målverdiformer for disse faktorene.

FMSA kan betraktes som en forlengelse av FMECA-metoden ved at symptomer for ulike feilmoder inkluderes. Metoden er også anvendelig når en skal se på muligheten for å drive proaktivt vedlikehold av tetningene. Metodikken er derfor å anse som det beste alternativet for å svare på problemstillingen i denne oppgaven.

Stegene i metoden strekker seg fra litteraturdelen til diskusjonsdelen. Komponentene som betraktes og deres funksjoner ble presentert i kapittel 1. I dette kapittelet ble også operasjonstilstanden de forskjellige feilene best kan observeres (steg 6), introdusert. Steg 3-5 og 7 dekkes i kapittel 1, mens de resterende stegene 8-9 besvares i kapittel 1.

### 3.1.2. Tilnæringsmåter

To tilnæringsmåter kan benyttes for å diagnostisere tilstanden til et utstyr.

1. Datastyrt tilnærming (enkel trending, nevrale nettverk, mønstergjenkjenning, statistisk, historisk Pareto-tilnærming eller andre numeriske tilnærminger).
2. Kunnskapsbasert tilnærming (feil/symptom diagnosetilnærming eller diagnostisering ved hjelp av årsakstrær).

For en *datastyrt tilnærming* kreves det tilgang på en stor mengde observerte feildata. Inngående kunnskap om hvordan feil oppstår og utvikler seg er ikke nødvendig. Dette vil derimot være avgjørende i en *kunnskapsbasert tilnærming*, hvor ekspertise og erfaring er sentralt.

For diagnostisering av roterende maskineri er den kunnskapsbaserte tilnærmingen godt egnet. Denne tilnærmingen vil benyttes videre i analysen av tetningene. Fordelene med denne metoden er at den kan håndtere flere uavhengige feil og gir en god visuell oversikt over feilforbindelsene. Et årsakstre benyttes i denne forbindelse.

Ulempen med metoden er kravet til kunnskap om mulige feiltilstander og årsaker til disse. En utfordring kan være å legge seg på et passende detaljnivå. For liten dybde vil gi en lite beskrivende og anvendelig modell. For mange detaljer vil gjøre modellen kompleks, både med tanke på validering og anvendelse.

En ulempe ved å benytte årsakstre for visuell oversikt over feilforbindelsene er at den aldri vil bli fullstendig fullkommen. Alle feilene som identifiseres vil ikke nødvendigvis være knyttet til et symptom, og rotårsaken vil ikke alltid være kjent.

### 3.1.3. Diagnostisering

Basert på de identifiserte symptomene, vil det være mulig å si noe om tilstanden til de ulike tetningsdelene. I noen tilfeller kan ett symptom være nok til å si noe om tilstanden til tetningen, i andre tilfeller er det kombinasjonen av påviste og ikke påviste symptomer som gjør det mulig å stille en diagnose. For å se på sammenhengen mellom symptom og årsaker, kan det etableres et enkelt ekspertsystem. Et ekspertsystem baserer seg på det Yam et.al [30] presenterer som regelbasert diagnosesystem, hvor beslutning kan tas basert på noen forhåndsdefinerte regler. Dersom symptomene passer reglene vil man, basert på den logiske setningen «HVIS en tilstand, SÅ en handling», kunne utløse en gitt vedlikeholdsaksjon.

Som det understrekes av Yam et.al [30] og ISO [34], er kravet til kunnskap om utstyret og feiltilstander høyt. Det kan være en utfordring å samle nok informasjon for å etablere et pålitelig ekspertsystem.

Da denne oppgaven ikke tar sikte på å utvikle et spesifikt diagnosesystem, er det valgt å presentere et forholdsvis enkelt ekspertsystem for å vise hvordan informasjonen som

avdekkes kan settes sammen for å vurdere tilstanden til systemet. Boole'sk algebra kan benyttes for å sette opp et enkelt ekspertsystem. Dette er algebra hvor det opereres med binære variabler med to mulige tilstander, ofte referert til som SANT eller USANT [35]. I dette tilfellet vil det være om symptomet er tilstede eller ikke. Videre kan logiske operasjoner benyttes for å kombinere flere symptomer. De logiske operasjonene vil være OG ( $\cap$ ), ELLER ( $\cup$ ) og IKKE ( $\neg$ ). Resultatet med å sette sammen symptomer med logiske operasjoner er feilårsaken(ene) for den aktuelle tetningskomponenten.

### 3.1.4. Informasjonsgrunnlag

Analysen krever tilgang på gode utstyrdata. Viktige elementer som benyttes i diagnostikk vil være data fra tilstandsovervåkning, utstyrdata og utstyrshistorikk. En kombinasjon av samtaler med teknisk personell, utstyrseiere, leverandører og et omfattende litteratursøk har det vært mulig å danne et godt informasjonsgrunnlag for å gjennomføre analysen.

Personer som er vært involvert i denne prosessen er listet opp i tabellen under.

**Tabell 3: Personer involvert i innhenting av informasjon til analysen**

Firma	Navn	Stilling
A/S Norske Shell	Terje Finseth	Senior ingeniør, ansvarlig for roterende utstyr på Draugen og Ormen Lange
MainTech AS	Jan Erik Salomonsen	Overingeniør, Drift og Vedlikehold - Material og inspeksjon
A/S Norske Shell	Roger Nilsen	Vedlikeholdsingeniør
Eagle Burgmann	Kristian Malnes	Direktør for Eagle Burgmann Norge, leverandør av tetningsutstyr til A/S Norske Shell
A/S Norske Shell	Michael Kongshaug	Vedlikeholdsingeniør

Personer fra A/S Norske Shell har vært med på å belyse tetningsproblematikken og vedlikeholdsstyringen knyttet til deres kompressorer på anlegget på Nyhamna. Analysen som er gjort er gjennomført av forfatteren selv. Personene nevnt i Tabell 3 har bidratt med viktige input, i tillegg til en verifisering av resultatene av analysen. Innhentet litteratur innenfor det spesifikke fagområdet er også diskutert med de involverte.

Fordelen med å hente inn informasjon på denne måten er at man får innsikt både fra leverandørens ståsted og de som til daglig drifter utstyret. På denne måten kan man få en bedre forståelse for de feilene som er forutsett i teorien, og se disse i sammenheng med de faktiske feilene. Analysens pålitelighet styrkes ytterligere når fagpersoner får muligheten til å komme med sine innspill underveis i prosessen.

Som nevnt i kapittel 3.1.3 vil en utfordring være samle nok informasjon. Muligheten for å overse årsaker, symptomer og sammenhenger er tilstede og vil være en mulig feilkilde som påvirke resultatene i oppgaven.

## 4. RESULTAT

### 4.1. UTSTYRETS KRITIKALITET

Tørrgassetningene anses som et kritisk utstyr. Dette er basert på en enkel kritikalitetsvurdering presentert av Bye [6] i kapittel 2.3.3. Påstanden er videre bekreftet av utstyrseier.

Kritikalitetsvurdering av utstyret gjøres ved å vurdere de fire parameterne sikkerhet, miljø, tilgjengelighet og kostnader opp mot et konsekvensdiagram (se Figur 18). For tørrgassetningene vil svaret være ja på spørsmålene som går på tilgjengelighet og kostnader. En totalsvikt i tetningssystemet kan medføre uakseptable stopp for produksjonen og redusere tilgjengeligheten. Detaljer knyttet til kostnadsbildet er ikke vurdert i denne oppgaven, men som det vil fremgå av oppgaven, vil forebyggende vedlikehold trolig ha en lavere total kostnad enn korrektivt vedlikehold. Miljøaspektet ved lekkasje er ikke medregnet som en kritisk faktor. Potensiell lekkasje til omgivelsene vil fanges opp av gassensorer som vil fremtvinge nedstegning av systemet umiddelbart, og på den måten sikre mot at store mengder gass lekker ut til omgivelsene.

### 4.2. IDENTIFISERING AV FUNKSJON, FEILMODE OG FEILÅRSAKER

Komponentene som betraktes i analysen hører til tetningssystemet. Inndelingene er gjort ved å skille mellom primær-, sekundær- og barrieretetningene, med tilhørende støttesystemer.

Tetninger har som *funksjon* å hindre gass fra å lekke til omgivelsene og mellom stegene i kompressoren. Som tidligere nevnt, skal primærtetningene hindre at prosessgass lekker ut til omgivelsene. For ytterligere beskyttelse mot lekkasje og for tilfeller hvor primærtetningen svikter, vil sekundærtetningen overta. Barrieretetningen sørger for å hindre smøreolje i å trenge inn i primær- og sekundærtetningen.

Dersom gass lekker ut av systemet, vil funksjonen ikke lenger være opprettholdt. Lekkasje blir derfor utstyrets *feilmode*.

Det er identifisert fire hovedårsaker til at tetningene feiler, og følgelig gass lekker ut til omgivelsene. Det skilles mellom feil på henholdsvis primær-, sekundær- og barrieretetningene. Disse er videre brutt ned til underliggende *feilårsaker*.

Tabell 4, Tabell 5 og Tabell 6 viser resultater fra analysen og hvordan feilårsakene er brutt ned til ulike nivåer. Antall nivå som inkluderes avhenger av hva som er mulig å oppdage og iverksette tiltak mot med aktuell vedlikeholdsstrategi. Begrensinger er også satt til hva forfatteren mener er plausible årsaker.

#### **4.2.1. Feilårsaker for primær- og sekundærtetning**

Det er mange fellestrekk i feilårsakene for primær- og sekundærtetningen. Tilsmusset tetninger, kontaktskade og forskyvning mellom tetningsflater er alle tre mulige feilårsaker for den aktuelle feilmoden. Som nevnt i kapittel 2.2.3 vil 80 % av tetningene svikte før tiden på grunn av kontaminering av tettegassen. Tilsmusset tetning og kontaktskader anses derfor som de hyppigste feilårsakene for primær- og sekundærtetningen.

Primærtetningen er tilknyttet en labyrinttetning som grenser mot kompressorhuset, som vist i Figur 7. Slitasje av labyrinttetning er derfor inkludert som en mulig årsak til feil på primærtetning. Labyrinttetningen som er plassert mellom primær- og sekundærtetningen er ikke regnet med, da denne ikke er i direkte kontakt med akslingen og utsettes hovedsakelig for nitrogengass.

For ytterligere feilårsaker, refereres det til Tabell 4 og Tabell 5.

#### **4.2.2. Feilårsaker for barrieretetning**

Barrieretetningen er et langt mindre avansert tettesystem enn tørrgastetningene, og vil derfor ha færre feilårsaker. For en fullstendig oversikt refereres det til Tabell 6.

Kontaminering av tettegass kan forekomme ved svikt av barrieretetningen. Tilsmusset labyrinttetning og utilstrekkelig trykk på buffergassen er to mulige årsaker til at dette skjer. For begge tilfellene vil feil på oljeutskilleren være en mulig feilårsak.



Tabell 4: Feilårsaker for primærtetning ved feilmoden «Gass lekker ut av systemet»

Feilårsak 1	Feilårsak 2	Feilårsak 3	Feilårsak 4	Feilårsak 5	Feilårsak 6	
Feil på primærtetning	Tilsmusset tetning	Skitten prosessgass	Filterfeil	Tilsmusset		
				Feilmontert		
				Skade ved montering		
				Utilstrekkelig trykk på prosessgass	Uttakstrykk har ikke rukket å bli høyt nok	
					Høy motstand over filter	Tilsmusset filter
					Høy motstand i systemet	Feil dimensjonert
				Hindringer og overganger		
				Feiljusterte ventiler	Manglende tuning av anlegget	
				Bortfall av prosessgasstrykk	Feil på anti-surge ventil	
			Korrosjon	Feil filter		
				Væskedannelse i systemet	Temperatur- og trykkfall	Høy motstand over filter
						Feiljusterte ventiler
		Fremmedpartikler i syst. fra tidligere vedlikehold	Filterfeil	Feilmontert		
				Skade ved montering		
	Slitasje på labyrint-tetninger	Vibrasjon	Ugunstig turtall	Egenfrekvens i driftsområdet		
		Korrosjon	Feil filter			
			Væskedannelse i systemet	Temperatur- og trykkfall	Høy motstand over filter	
					Feiljusterte ventiler	

Kontaktsskade mellom tetningsflater	Variabelt gasstrykk inn på tetningene	Utilstrekkelig trykk på prosessgass	Uttakstrykk har ikke rukket å bli høyt nok	
			Høy motstand over filter	Tilsmusset filter
			Høy motstand i systemet	Feil dimensjonert
				Hindringer og overganger
			Feiljusterte ventiler	Manglende tuning av anlegget
			Feil på anti-surge ventil	
Ved installering				
	Partikler mellom tetningsflater	Filterfeil	Feilmontert	
				Skade ved montering
			Uttakstrykk har ikke rukket å bli høyt nok	
			Høy motstand over filter	Tilsmusset filter
			Høy motstand i systemet	Feil dimensjonert
			Hindringer og overganger	
			Feiljusterte ventiler	
Forskyvning av tetningsflater	Forandring i fjærtrykk	Høye påkjenning og siging i fjær	Feil dimensjonert	
	Slitasje av O-ringer	Material kompatibilitet (elding)	Feil materialvalg	

Tabell 5: Feilårsaker for sekundærtetning ved feilmoden «Gass lekker ut av systemet»

Feilårsak 1	Feilårsak 2	Feilårsak 3	Feilårsak 4	Feilårsak 5	Feilårsak 6	
Feil på sekundærtetning	Tilsmusset tetning	Skitten prosessgass	Filterfeil	Tilsmusset		
				Feilmontert		
				Skade ved montering		
			Utilstrekkelig trykk på prosessgass	Uttakstrykk har ikke rukket å bli høyt nok		
				Høy motstand over filter	Tilsmusset filter	
				Høy motstand i systemet	Feil dimensjonert	
	Kontaktskade mellom tetningsflater	Variabelt gasstrykk inn på tetningene	Utilstrekkelig trykk på prosessgass	Bortfall av prosessgasstrykk	Feiljusterte ventiler	Hindringer og overganger
					Feil på anti-surge ventil	Manglende tuning av anlegget
					Feil på O-ringer/karbonringer på barrieretetning	
				Utilstrekkelig trykk på buffergass	Feil på PCV	
					Feil på oljeutskiller ved barrieretetning	
					Uttakstrykk har ikke rukket å bli høyt nok	
Ved installering				Høy motstand over filter	Tilsmusset filter	
				Høy motstand i systemet	Feil dimensjonert	
				Feiljusterte ventiler	Hindringer og overganger	
				Feil på anti-surge ventil	Manglende tuning av anlegget	

	Partikler mellom tetningsflater	Filterfeil	Feilmontert	
			Skade ved montering	
		Utilstrekkelig trykk på prosessgass	Uttakstrykk har ikke rukket å bli høyt nok	
			Høy motstand over filter	Tilsmusset filter
			Høy motstand i systemet	Feil dimensjonert
			Feiljusterte ventiler	Hindringer og overganger
				Manglende tuning av anlegget
	Smøreolje lekker inn i tetningssystemet	Utilstrekkelig trykk på buffergass	Feil på O-ringer/karbonringer på barrieretetning	Skade ved installering
			Feil på PCV	
			Feil på oljeutskiller ved barrieretetning	
Forskyvning av tetningsflater	Forandring i fjærtrykk	Høye påkjenning og siging i fjær	Feil dimensjonert	
	Slitasje av O-ringer	Material kompatibilitet (elding)	Feil materialvalg	

Tabell 6: Feilårsaker for barrieretetning ved feilmoden «Gass lekker ut av systemet»

Feilårsak 1	Feilårsak 2	Feilårsak 3	Feilårsak 4	Feilårsak 5	Feilårsak 6
Feil på barrieretetning	Tilsmusset labyrinttetninger	Feil på oljeutskiller			
	Utilstrekkelig trykk på buffergass	Feil på O-ringer/ karbonringer	Skade ved installering		
			For tørr buffergass (nitrogen)		
		Feil på PCV			
		Feil på oljeutskiller			

### **4.3. FEILÅRSAKER OG SYMPTOMER**

Som en del av problemstillingen er årsaker til tetningsfeil og symptomer på dette, spørsmål som skal besvares. Årsakene er allerede vist i Tabell 4, Tabell 5 og Tabell 6. Videre vil Figur 22, Figur 23 og Figur 24 illustrerer de ulike årsaksforbindelsene med tilhørende symptomer for de tre tetningstypene. Øverste skillelinje markerer rotårsakene, videre følger feilårsaker etter nivåer, mens nederste skillelinje markerer symptomene. Symptomene er merket med tall for å markere forbindelse til riktig feilårsak.

Av de identifiserte feilårsakene er det ikke alle som er tilknyttet et symptom og rotårsaken vil ikke alltid være kjent. Som det nevnes i kapittel 3.1.2 er dette en av ulempene ved å benytte årsakstre for visuell oversikt over feilforbindelsene. De påviste symptomene må være mulig å registrere og måle, og er ment å brukes i vurderingen av tilstanden til utstyret. Med dette i tankene har det vært mulig å identifisere ti ulike symptomer for den aktuelle feilmoden for de ulike tetningskomponentene. En kort oppsummering av det som illustreres i Figur 22, Figur 23 og Figur 24 vil videre bli presentert.

#### **4.3.1. Feil på primærtetninger**

Forandring i differensialtrykk over filter er et symptom på at gassen har vanskeligheter med å slippe gjennom filteret.

Dersom strømmingen og trykket på tettegassen inn på primærtetningen er lav kan dette skyldes at uttakstrykket på kompressoren ikke har rukket å bli høyt nok, før gassen sendes inn på tetningene. Feiljusterte ventiler, høy motstand over filter eller generelt i systemet kan også medføre lavt tetningstrykk.

Økt strømning og trykk i primæruttaket på tetningssystemet er et symptom som forteller at mye tettegass slipper gjennom tetningsflatene i primærdelen. Årsakene til dette kan være mange. Felles for disse er at kontaminert gass har redusert tetteflatenes funksjon.

Temperatur- og trykkfall kan medføre væskedannelse i systemet. Lav temperatur på gassen vil kunne si noe om det er fare for at dette har inntruffet.

#### **4.3.2. Feil på sekundærtetninger**

På lik linje med primærtetningene, vil forandring i differensialtrykk over filter være et symptom som kan si noe om hvor vidt skitten prosessgass slipper gjennom tetningssystemet eller ikke. Partikler vil kunne forplante seg til sekundærdelen via primærtetningene, og med tiden redusere tetningsevnen.

Kontaminering kan også komme fra barrieretetningen og smøreolje som benyttes. Økende mengde smøreolje til stede i sekundærventilasjon tyder på en svekkelse av barrieretetningen.

Smøreolje vil også kunne lekke inn i tetningssystemet dersom trykket på buffergassen inn på barrieretetningene er for lavt. Tiltakende kontaminering av smøreolje vil medføre en degradering av sekundærtetningen.

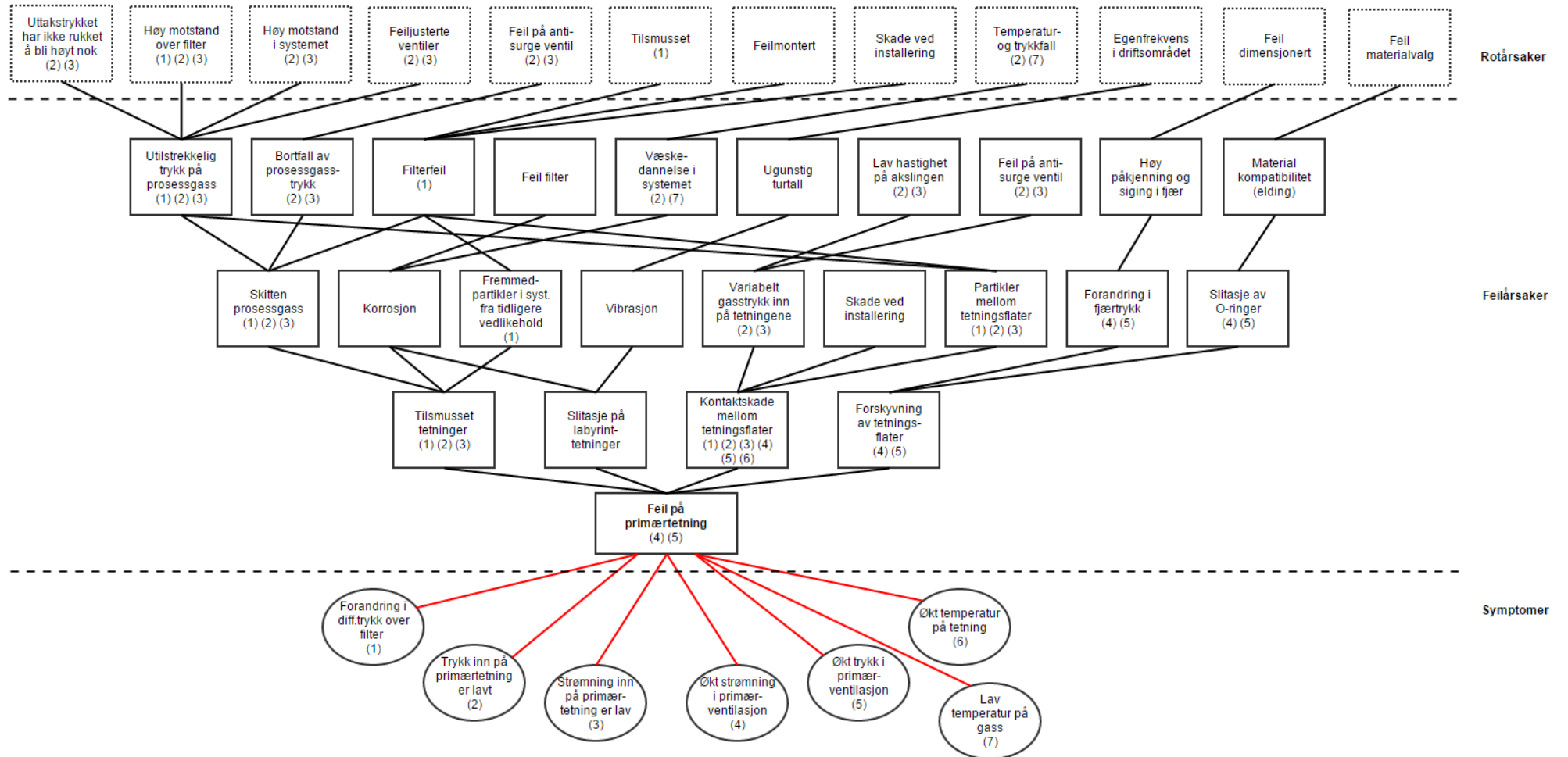
Kontaktskade på grunn av temperaturøkning over tetningsflatene er også et mulig symptom som kan registreres for sekundærtetningene.

#### **4.3.3. Feil på barrieretetninger**

De fleste symptomene for sekundærtetningsfeil kommer som en konsekvens av feil på barrieretetningene. Økende mengde smøreolje i avløpsrør i sekundærventilasjon er et tydelig tegn på at barrieretetningens funksjon svekkes. Her kan feil på oljeutskiller eller O-ringer/karbonringer være en av årsakene.

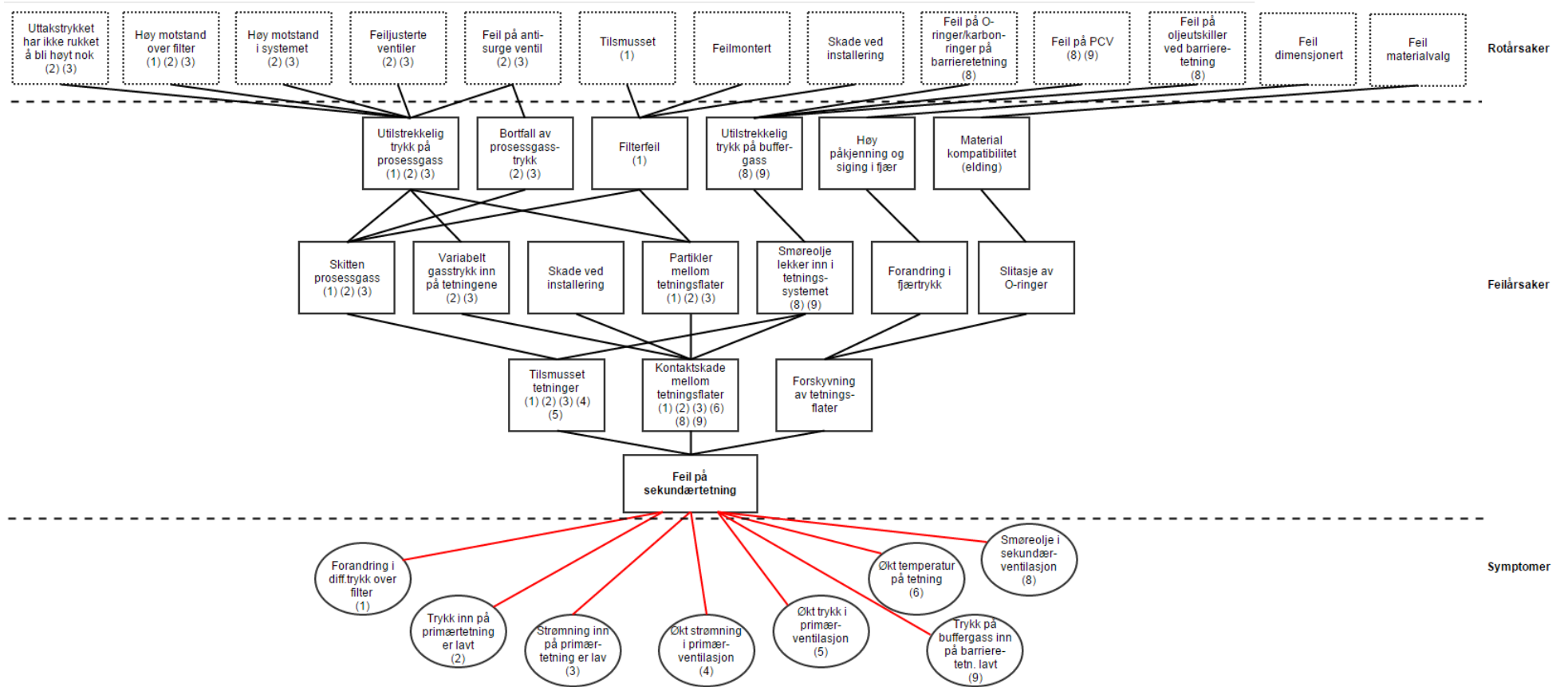
Feil på oljeutskilleren vil også kunne endre trykket på buffergassen. Dersom trykket inn på barrieretetningen ikke blir opprettholdt kan det skyldes feil på oljeutskilleren.

Figur 22: Årsakstre - feil på primærtetning

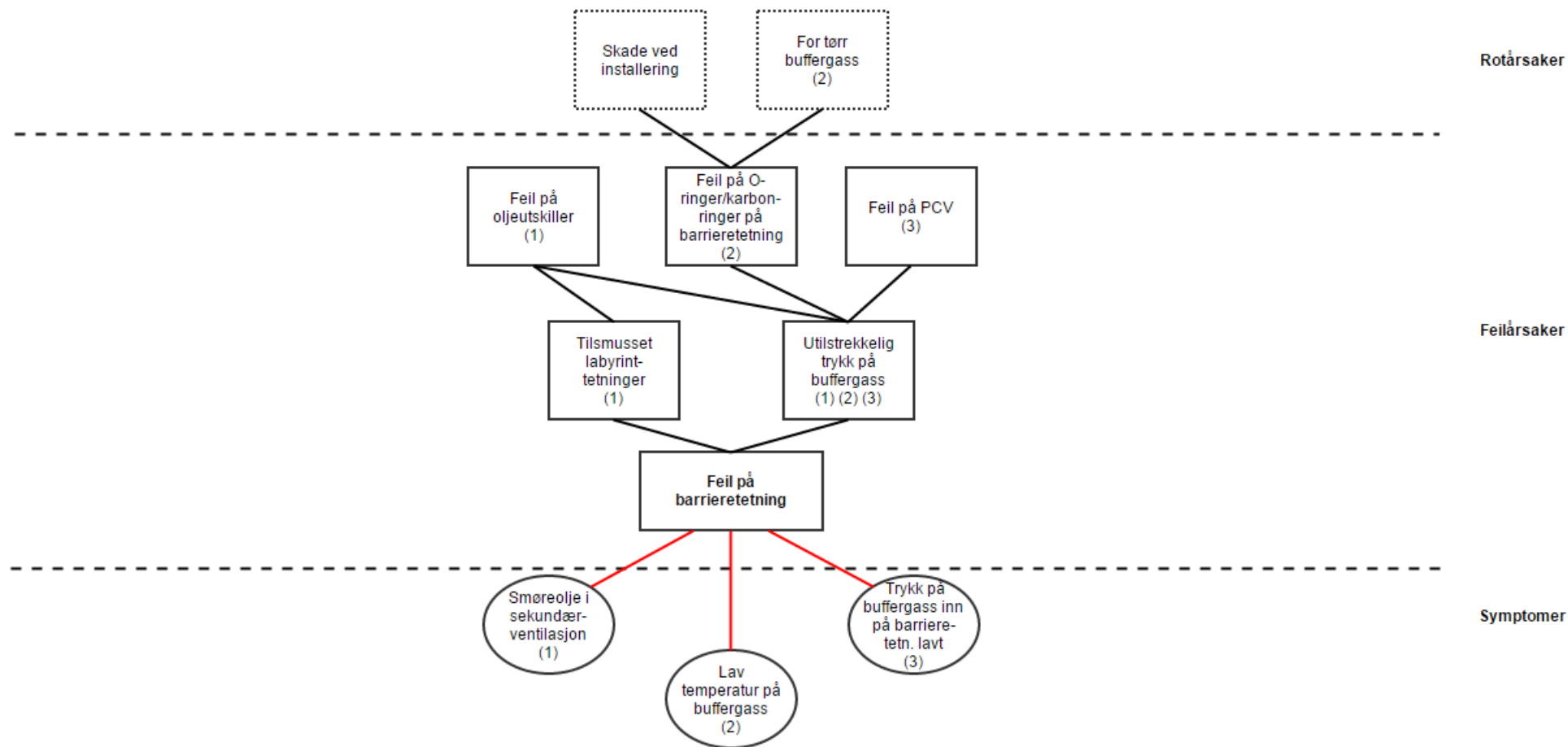




Figur 23: Årsakstre - feil på sekundærtetning



Figur 24: Årsakstre - feil på barrieretetning



#### 4.4. OPPSUMMERING AV RESULTATENE

Videre følger en oppsummering av resultatene fra analysen. Sammenhengen mellom symptom og årsaker er presentert som nevnt i kapittel 3.1.3. En mer grundig diskusjon rundt symptomene og vurdering av tetningenes tilstand vil bli gitt i kapittel 5.1.

##### 4.4.1. Feilårsaker og primærtetningens tilstand

Tabell 7: Symptomer primærtetning

Symptom	Beskrivelse
(1)	Forandring i differensialtrykk over filter
(2)	Trykk inn på primærtetning er lavt
(3)	Strømning inn på primærtetning er lavt
(4)	Økt strømning i primærventilasjon
(5)	Økt trykk i primærventilasjon
(6)	Økt temperatur på tetning
(7)	Lav temperatur på gass

$$(1) \cap (2) \cap (3) = \{\text{Høy motstand over filter}\}$$

$$(2) \cap (3) = \left\{ \begin{array}{l} \text{Uttakstrykket ikke høyt nok} \\ \text{Høy motstand i systemet} \\ \text{Feiljusterte ventiler} \\ \text{Feil på antisurge ventil} \end{array} \right\}$$

$$(2) \cap (7) = \{\text{Væskedannelse i systemet}\}$$

$$(4) \cap (5) = \{\text{Feil på primærtetning}\}$$

$$(4) \cap (5) \cap (6) = \left\{ \begin{array}{l} \text{Kontaktskade mellom tetningsflater} \\ \text{Feil på primærtetning} \end{array} \right\}$$

Lavt trykk (2) og strømning (3) inn på primærtetningen kan skyldes ulike årsaker. Problemet kan ligge både før og etter filtersystemet. Dersom det i tillegg til nevnte symptomer også er forandring i differensialtrykk over filter (1), er det rimelig å anta at det er motstanden i filteret som reduserer trykket og strømmingen inn på tetningene.

For å anta væskedannelse i systemet må det være både trykk- og temperaturfall (2)(7).

Økt strømning (4) og trykk (5) i primærventilasjonen sier noe om tilstanden på primærtetningen. Årsaken til feil kan være flere. Ved økt temperatur (6) på tetningsflatene har tetningsflatene vært i kontakt med hverandre, og dermed redusert tetningsevnen.

#### 4.4.2. Feilårsaker og sekundærtetningens tilstand

Tabell 8: Symptomer sekundærtetning

Symptom	Beskrivelse
(1)	Forandring i differensialtrykk over filter
(2)	Trykk inn på primærtetning er lavt
(3)	Strømning inn på primærtetning er lavt
(4)	Økt strømning i primærventilasjon
(5)	Økt trykk i primærventilasjon
(6)	Økt temperatur på tetning
(8)	Smøreolje i sekundærventilasjon
(9)	Lavt trykk på buffergass inn på barrieretetning

$$(1) \cap (2) \cap (3) = \{\text{Høy motstand over filter}\}$$

$$(2) \cap (3) = \left\{ \begin{array}{l} \text{Uttakstrykket ikke høyt nok} \\ \text{Høy motstand i systemet} \\ \text{Feiljusterte ventiler} \\ \text{Feil på antisurge ventil} \end{array} \right\}$$

$$(4) \cap (5) \cap (8) = \{\text{Feil på sekundærtetning}\}$$

$$(6) = \{\text{Kontakt mellom tetningsflater}\}$$

Tilstanden på primærtetningen kan være vanskelig å vurdere. Dersom det er smøreolje i sekundærventilasjon (8) kombinert med økt trykk (5) og strømning (4) i primærventilasjonen, er dette symptomer som bør trigge videre undersøkelser av sekundærtetningen.

Økt temperatur over tetningsflatene (6) antyder kontakt mellom disse.

### 4.4.3. Feilårsaker og barrieretetningens tilstand

Tabell 9: Symptomer barrieretetning

Symptom	Beskrivelse
(8)	Smøreolje i sekundærventilasjon
(9)	Lavt trykk på buffergass inn på barrieretetning
(10)	Lav temperatur på buffergass

(8) = {Feil på barrieretetning}

Tiltakende smøreolje i sekundærventilasjonen (8) er et sikkert tegn på at barrieretetningens funksjon er svekket.

## 5. DISKUSJON

### 5.1. HVORDAN MÅLE OG REGISTRERE SYMPTOMER

For de to siste stegene i FMSA-metodikken skal det listes opp hvilke faktorer som kan benyttes for å gjenkjenne de forskjellige symptomene, samt identifisere nødvendige målinger for disse faktorene.

#### 5.1.1. Symptomer for primærtetning

Primærtetningens oppgave er å sikre at prosessgass ikke lekker ut av systemet. Dersom denne tetningen skulle svikte, vil sekundærtetningen ta over oppgaven. I følge Stahley [21] anbefales det likevel ikke å la sekundærtetningen stå for denne jobben over en lengre periode. Dersom svikt i primærtetningen oppdages tidlig, vil tiltak kunne iverksette og total tetningssvikt være mulig å forhindre.

Fra analysen ble følgende symptomer identifisert for primærtetningen:

- Forandring av differensialtrykk over filter
- Trykk inn på primærtetning er lavt
- Strømning inn på primærtetning er lav
- Temperaturøkning over tetningsflater
- Økt strømning i primærventilasjon
- Økt trykk i primærventilasjon
- Lav temperatur på gass

Lavt trykk og strømning inn på primærtetningen, samt forandring av differensialtrykk over filter, vil ikke direkte si noe om primærtetningens tilstand. Det disse symptomene forteller er hvorvidt skitten prosessgass slipper inn i tetningssystemet. Når en feil først har utviklet seg i en av komponentene, bør tilstanden overvåkes regelmessig for å unngå total tetningssvikt [30]. For lavt trykk på prosessgassen vil i verste fall resultere i tilbakestrømning hvor ufiltrert prosessgass lekker over labyrinttetningene og videre inn i tetningssystemet.

Høy motstand over filteret kan overvåkes med et måleinstrument som registrer differensialtrykket. Alarmer kan monteres for å varsle når trykkdifferansen blir for høy, og filteret må inspiseres. Trykktransmittere og gjennomstrømningsmåler montert oppstrøms for primærtetningen kan registrere og varsle når trykket og strømmingen blir for lav.

I følge Sivapuram [36] vil enhver temperaturstigning over tetningsflatene som er høyere enn 15 °C over temperaturen på prosessgassen, indikere fysisk kontakt mellom flatene. Symptomet er mulig å registrere ved hjelp av temperatursensorer på tetningene.

Tilstanden på primærtetningen vurderes best ved å overvåke trykket og strømmingen i primærventilasjon. Dette gjøres i dag med en måleblende (eng. restriction orifice) i primærventilasjonen. En økning av trykket og strømmingen tyder på økt lekkasje gjennom primærtetningen og et tegn på svekkelse av tetningens funksjon. Utslag på

temperatursensorer på tetteflatene er et eksempel på når en bør være oppmerksom på disse symptomene.

Dersom tetningssystemet er utstyrt med sprengblekk (eng. rupture disc), er dette noe å være oppmerksom på i vurderingen av primærtetningens tilstand. Et sprengblekk er montert i primærventilasjonen for å avlaste trykket i situasjoner hvor total svikt av primærtetningen inntreffer. I et slikt tilfelle vil det høye trykket som oppstår i primærventilasjonen skape et mottrykk i rørsystemet. Sprengblekket brytes og avlaster mottrykket ved å føre gassen ut av systemet. Det er fullt mulig å kjøre kompressoren med et åpent sprengblekk [21]. Dette vil resultere i unøyaktige målinger av trykk og strømning i primærventilasjonen. For å unngå feiltolkninger av tilstanden på utstyret er det viktig å være oppmerksom på dette tilfellet.

### **5.1.2. Symptomer for sekundærtetning**

Sekundærtetningens tilstand er vanskelig å bedømme. Men med å kombinere de åtte identifiserte symptomene fra Feilmode Symptomanalysen, vil det være mulig å danne et grunnlag for en diagnose på sekundærtetningen.

Fra analysen ble følgende symptomer identifisert for sekundærtetningen:

- Forandring i differensialtrykk over filteret
- Trykk inn på primærtetning er lavt
- Strømning inn på primærtetning er lav
- Smøreolje i sekundærventilasjon
- Lavt trykk på buffergass inn på barrieretetningen
- Temperaturøkning over tetningsflater
- Økt strømning i primærventilasjon
- Økt trykk i primærventilasjon

På lik linje med primærtetningen, vil ikke de tre første symptomene si noe om sekundærtetningens tilstand. Symptomene vil gjøre størst utslag for primærdelen, men er likevel viktig å inkludere da feilene kan forplante seg utover i systemet.

Strømning og trykket i sekundærventilasjonen kunne vært symptomer å inkludere i analysen av sekundærtetningen. For tetningssystemet på Nyhamna er andelen gass som slipper gjennom sekundærtetningen så liten at gode målinger er vanskelig å oppnå [21]. Usikkerheten i disse målingene vil derfor være for stor til å benyttes som et symptom.

Smøreolje, som presentert i kapittel 2.2.3 som én av de tre hovedkildene til kontaminering av tetningene, vil være den største trusselen for sekundærtetningen. En overvåkningsteknikk som registrerer dette vil derfor best kunne si noe om tilstanden til tetningen. Inspeksjon av oljeutskiller i sekundærventilasjonen er en måte å gjøre dette på. Her vil økende mengde smøreolje signalisere at barrieretetningens ytelse er svekket.

For å kunne si noe om tilstanden til sekundærtetningene er symptomene økt trykk og strømning i primærventilasjonen inkludert i årsakstreet (se Figur 23). Årsaken til dette er at dersom trykket og strømningen i primærventilasjonen er normalt og sekundærventilasjonen er fri for olje, er det trygt å konkludere med at tilstanden på sekundærtetningen er god [21].

### **5.1.3. Symptomer for barrieretetning**

Barrieretetningen hindrer at smøreolje fra lager lekker inn i tetningssystemet. Som en av de større bidragsyterne til tetningsvikt, vil barrieretetningens tilstand være viktig å ha kontroll på.

Fra analysen ble følgende symptomer identifisert for barrieretetningen:

- Smøreolje i sekundærventilasjon
- Lav temperatur på buffergass
- Lavt trykk på buffergass inn på barrieretetningen

Som nevnt i seksjonen over, vil opphopning av smøreolje i sekundærventilasjonen avsløre om barrieretetningens ytelse er svekket.

For kompressorer som benytter segmenterte karbonringer i barrieretetningene, vil temperaturen på buffergassen være av betydning. Det understrekes at dette gjelder dersom man benytter nitrogen som buffergass. Temperaturmålere vil kunne registrere når temperaturen på gassen blir for lav.

Dersom trykket på buffergassen er for lavt vil man risikere at smøreolje trenger inn i tetningssystemet eller at prosessgass kontaminerer barrieretetningene. Sistnevnte er mindre sannsynlig, da det er lite prosessgass som lekker over sekundærtetningen og videre over barrieretetningen. Trykket på buffergassen er normalt innstilt på en verdi som ligger over trykket i sekundærventilasjonen [21]. Differensialtrykket mellom buffergasstilførselen og sekundærventilasjonen kan måles, og alarmer kan indikere når denne verdien er for lav. Dersom dette symptomet registreres vil det være en naturlig oppfølging å kontrollere sekundærventilasjonen for smøreolje for å vurdere tilstanden til barrieretetningen.

Nitrogen eller luft er vanlig å benytte som buffergass i barrieretetningene. Filtrering skjer gjerne før gassen sendes inn på tetningene. Forandring av differensialtrykk over filteret kunne vært et symptom og en bidragsyter til tetningsvikt. Årsaken til at det ikke inkluderes er at behovet for filtrering er lavere for nitrogen og luft, sammenlignet med prosessgass. I tillegg er barrieretetningene mindre følsom for kontaminering enn tørrgastetningene [21].



## 5.2. VEDLIKEHOLDSSTYRING

Ved å besvare spørsmålene i beslutningstreet presentert i kapittel 2.3.3, ender man opp med tilstandsbasert overvåkning som optimal vedlikeholdsaktivitet. Feil på tetningssystemet vil medføre konsekvenser for produksjonen, og svaret er ja på spørsmålet om tilstandsovervåkning er teknisk mulig og verdt å gjennomføre for å avdekke feilårsaken i tide. Symptomene som er avdekket kan overvåkes og feil på tetningene er mulig å forutsi ved hjelp av diagnostisering. Med tanke på de overvåkningssystemene man har tilgang på i dag på Nyhamna (se vedlegg E), vil det neppe medføre vesentlige kostnader å drive tilstandsbasert vedlikehold som diskutert i kapittel 5.1.

For å lykkes med tilstandsbasert vedlikehold, må det som med andre vedlikeholdsmetoder, forankres i en styringsmodell. Vedlikeholdsstyringsløyfa, introdusert i kapittel 2.3.2, er en måte å sikre en helhetlig vedlikeholdsstyring. Videre vil de ulike elementene i styringsløyfen belyses på bakgrunn av det som er avdekket i oppgaven.

### 5.2.1. Mål og krav

Mål og krav bør etableres for utstyret. For eksportkompressorene på Nyhamna, er målet å ha en oppetid på 98 % [17]. Det vil si at man forventer at kompressorene ikke skal ha uforutsett nedetid, ettersom 2 % av tiden er viet driftsstans/overhaling. Nedetid på en kompressor kan resultere i store økonomiske tap på grunn av redusert leveranse. Som det også er kommet fram av oppgaven, vil det heller ikke være gunstig for komponentene i kompressoren å la maskinen stå stille eller kjøres på redusert effekt.

### 5.2.2. Vedlikeholdsprogram

For et vedlikeholdsprogram vil oppgaven være å definere hva som skal gjøres for at man skal nå de målene og kravene man har satt til systemet. Basert på feilene som er blitt avdekket i analysen og sammenhengen mellom disse og symptomer, vil det være mulig å komme med forslag og innspill til et vedlikeholdsprogram for utstyret. Forslagene som legges frem er en kombinasjon av løsninger som er kommet fram gjennom samtaler med fagpersoner, forfatterens egne vurderinger og eksisterende løsninger som er avdekket gjennom litteratursøket. Forslagene rettes hovedsakelig mot tetningene og er ment å imøtekomme de problemene som først ble introdusert i kapittel 2.2.3 og utdypet videre i analysen.

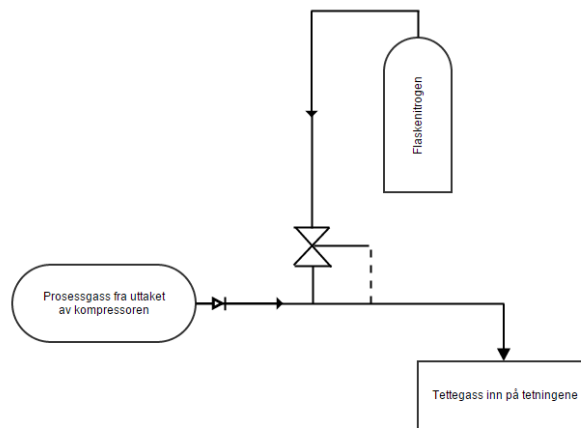
#### ***Kontamineringskontroll***

- Unngå start og stopp
- Unngå å kjøre på redusert effekt
- Sekundær kilde til tettegass
- Trykkutligningsvolum
- Filter

Kontaminering av tettegassen skjer som regel i forbindelse med utilstrekkelig trykk på tettegassen eller bortfall av tettegass. I følge Health & Safety Executive [16] vil antall *start og stopp* øke sannsynligheten for tetningsproblemer betraktelig, og bør derfor holdes til et minimum. Kjøring av kompressoren på *redusert effekt* bør også unngås, da dette fører til redusert uttakstrykk på prosessgassen. Eksportkompressorene på Nyhamna har vært utsatt for en del uforutsette driftstanser den siste tiden. Plutselig

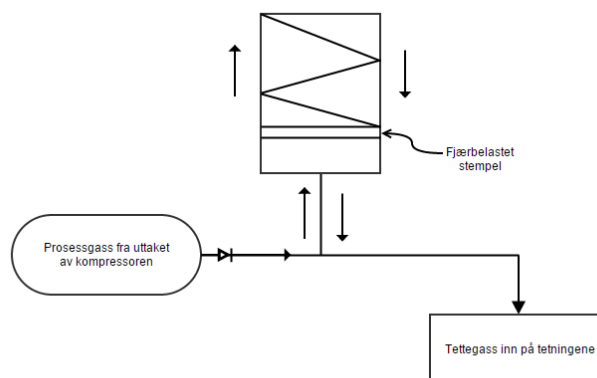
strømbrudd har resultert i uønskede nedstenginger av kompressoren. Slike tilfeller er vanskelige å forutsi, videre undersøkelser av årsakene til dette ligger utenfor denne oppgavens formål. Det vil imidlertid være noe A/S Norske Shell bør undersøke nærmere for å forhindre i fremtiden.

I tilfeller hvor man ikke kan unngå kompressorstans eller redusert trykk, bør man ha et *sekundært alternativ til tettegass*. En løsning på dette kan være å benytte en ekstern kilde med trykksatt gass. Når sensorer registrerer at trykket og strømmingen reduseres, vil en ventil åpnes og den eksterne kilden vil sørge for å opprettholde en jevn tilførsel av tettegass (se Figur 25). Flaskenitrogen kan benyttes i et slikt tilfelle. Med flaskenitrogen menes det ren og filtrert nitrogen. Denne gassen har gjerne en høyere kostnad sammenlignet med membran-generert nitrogen. Men slik løsningen er foreslått vil det bare være behov for å benytte den sekundære kilden i spesielle tilfeller, som for eksempel ved oppstart og nedkjøring av kompressoren. Ved å ha et alternativ til tettegass vil man ha en ekstra sikkerhet ved for eksempel svikt av anti-surge ventilen, og redusert risiko for kontaminering av tettegassen på grunn av manglende trykk.



Figur 25: Sekundær kilde til tettegass

En annen løsning som vil kunne løse problemet med trykkvariasjoner på tettegassen, kan være å installere et *trykkutligningsvolum* [23]. Trykkutligningsvolumet skal fungere som en buffer i tilfeller hvor gasstrykket fra kompressoren ikke er tilstrekkelig høyt. Løsningen er illustrert i Figur 26.



Figur 26: Trykkutligningsvolum

Volumet fylles med prosessgass og reguleres av et fjærbelastet stempel. Fjæra sørger for å regulere når volumet skal fylles. Ved lavt trykk fra kompressoren vil ikke stempelet presses opp, og på den måten sikrer en at hele gassmengden går til tetningene. Når trykket blir høyere vil volumet fylles opp, og et utjevningstrykk vil kunne benyttes under drift og nedkjøring av kompressoren. Løsningen er begrenset ved at man ikke kan benytte seg av den under oppkjøring av kompressoren. En sekundær kilde til tettegass vil derfor være aktuelt dersom systemet innføres.

*Filteret* er det viktigste elementet for å opprettholde ren tettegass. Doble filter for redundans og instrument for å måle differensialtrykket er i dag det vanligste oppsettet [37]. For å ha best mulig kontroll på filterets tilstand, bør alarmer for høyt differensialtrykk være installert. Dette er ikke en standard løsning, og i slike tilfeller er jevnlig overvåkning og manuell kontroll viktig. Hvor ofte dette skal gjøres vil avhenge av kvaliteten på prosessgassen. Skitten prosessgass krever hyppigere utskiftninger av filter. Gassen som prosesseres på Nyhamna i dag er svært ren. Etter hvert som reservoaret utvinnes, vil dette kunne endre seg, og behovet for utskifting av filter øke.

### ***Kontaktskade mellom tetningsflater***

Temperaturen på tetningene bør overvåkes for å ha kontroll på om tetningsflatene kommer i kontakt med hverandre. Dette kan gjøres med temperatursensorer plassert i nærheten av tetningsflatene. Økt temperatur alene vil ikke være nok til å konkludere med tetningsfeil, men dersom det i tillegg er økt trykk og strømning i primærventilasjonen, vil det høyst sannsynlig være behov for utskiftning av tetningskomponenter.

### ***Væskedannelse i systemet***

- Simulere trykk- og temperaturfall
- Riktig filtertype
- Overvåke ved hjelp av temperatursensorer

For å unngå væskedannelse må det tas hensyn til trykk- og temperaturforholdene gassen gjennomgår på sin vei gjennom systemet. Ved å *simulere trykk- og temperaturfallene* man forventer å få over de forskjellige komponentene, vil dette kunne gi tilstrekkelig data til å sette opp et fasediagram, som vist i kapittel 2.2.3 [1]. Dersom man ut i fra diagrammet kan se at gassen vil være innom væskefasen, bør tiltak for å unngå dette implementeres. Som Malnes [18] foreslår, bør koalescerfilter og dreneringsventiler inngå som en del av *filtreringssystemet*. I enkelte tilfeller vil det også være behov for oppvarming av gassen. Temperaturen kan også kontinuerlig overvåkes ved hjelp av *temperatursensorer*.

### ***Separasjon av fluider***

- Overvåke trykk på buffergass
- Installere alarmer
- Installering og lagring av O-ringer
- Periodisk sjekk av oljeutskiller

*Trykket inn på barrieretetningene* bør overvåkes kontinuerlig for å sikre en jevn tilførsel av buffergass. *Alarmer* kan installeres for å varsle når trykket blir for lavt. Trykket på buffergassen påvirkes også dersom O-ringene er skadet. Ekstra forsiktighet bør utøves

ved *installering* av barrieretetningene for å unngå skade på disse [20]. Hvordan og hvor lenge O-ringene *lagres* er også viktig for å bevare tetningsringenes materialkompatibilitet [37].

*Periodisk sjekk av oljeutskilleren* vil gi en indikasjon på barrieretetningens ytelse, og bør derfor inkluderes i de manuelle vedlikeholdsrunderne.

### **5.2.3. Planlegging og gjennomføring**

Vedlikeholdet må planlegges og gjennomføres i henhold til det fastsatte vedlikeholdsprogrammet. Hensikten med elementene «planlegging» og «gjennomføring» vil være å kartlegge hvem som gjør hva til hvilken tid.

Ved utskifting av tetningskomponenter må hele kompressorsystemet stanses. Jobben med nedstenging og utskifting krever involvering fra flere fagdisipliner innenfor anlegget. God planlegging vil være avgjørende for å få gjennomført dette på en effektiv og sikker måte. For en planlagt nedstenging vil man normalt bruke 3-5 dager for å få kompressoren gassfri. Ytterligere 12-14 dager benyttes for total utskifting av tetningssystemet, samt lager, rotor og stator [17]. Med tanke på tiden som settes av, kan det derfor være gunstig å kombinere flere vedlikeholdsjobber ved en slik nedstenging.

Ved uforutsett driftsstans vil prosedyrer for håndtering av kompressorsystemet være viktig for å unngå ytterligere skader på utstyret. Kunnskap om effektene ved plutselig kraftbortgang, som presentert i 2.2.4, bør være kjent for personellet som til daglig har ansvaret for driften av utstyret. Som Shell selv nylig har erfart, vil det i slike situasjoner være viktig at det foreligger klare retningslinjer spesielt for igangsetting av utstyret etter en uforutsett driftsstans, for å unngå havari. Tidsrommet for planlegging av vedlikeholdet i en slik situasjon er svært begrenset, noe som understreker viktigheten med å ha kjennskap til tilstanden i forkant.

For tetningene vil det være få manuelle vedlikeholdsaktiviteter som utføres på kort sikt. Som det vil bli utdypet nærmere i neste punkt, vil overvåking av tilstanden stort sett skje automatisk, og vedlikeholdsaktivitetene som gjennomføres vil være av den analyserende typen. Planlegging og gjennomføring av vedlikehold baserer seg på det som kommer ut av disse aktivitetene.

### **5.2.4. Rapportering og analyser**

Innsamling av data over tid er viktig for å ha kontroll med utstyrets utvikling, og for bruk i analyser. For tetningene er det nå avdekket at trykk og strømming vil være viktige parametere som bør overvåkes. Lagring av informasjon skjer automatisk, slik at behovet for manuell kontroll blir mindre. Viktigheten med manuell kontroll og «hands-on» vedlikeholdsarbeid bør likevel ikke undervurderes. Rapportering av ulyder, lukt eller andre unormale observasjoner vil også være viktig for totalbildet av utstyret. I tillegg vil manuell sjekk av alarmer og kontrollsystemer være viktig for å verifisere informasjonen man benytter til å avgjøre tilstanden på utstyret.

For driftspersonell blir hovedoppgaven å overvåke systemet, normalt via et kontrollrom med oversikt over hele systemet og alle målepunktene som er lagt inn (se vedlegg E). En analyseingeniør (AI) vil hente ut informasjonen til bruk i analyser av utstyrets tilstand. Hyppigheten på disse analysene vil avhenge av bl.a. antall driftsstans, utløste alarmer og rapportering fra driftspersonellet. For primær- og sekundærtetningen vil alarmer som

trigges av økt trykk og strømning i primærventilasjonen være eksempler på viktige tilfeller hvor ytterlig informasjon bør hentes ut og analyser utføres. For utslag på temperatursensorer på tetningene vil det være nok å holde et ekstra øye med systemet for å registrere om andre symptomer inntreffer. Retningslinjer for hvilke tilfeller slike analyser skal iverksettes, bør foreligge. Prediktive intelligente støttesystem, som presentert i kapittel 2.3.4, er eksempel på system som kan benyttes for å trigge analyser og brukes som støtte i diagnostiseringen av utstyret.

Det er viktig at driftspersonellet i kontrollrommet er opplyst om hva en skal være oppmerksom på og hva som er viktig å rapportere videre for analyse. Ved å skape en slik involvering vil driftspersonellet se nytteverdien av det som rapporteres inn, noe som blant annet kan bidra til at de blir mer oppmerksom på forandringer som oppstår.

### **5.2.5. Tiltak**

Tiltak utarbeides på bakgrunn av de resultatene man får av gjennomførte analyser. Tiltakene skal bidra til at man når de målene man har satt, i dette tilfellet, ved at sannsynligheten for feil på utstyret, og dermed også nedetiden, reduseres. Resultatet av dette kan i noen tilfeller gjøre det nødvendig å justere måltall og krav.

Eksempel på tiltak som kan innføres er allerede diskutert for tidligere elementer i styringssløyfa. Som en oppsummering av dette kan man skille mellom tiltak som går på utforming og tilpasning av selve systemet, hvordan systemet opereres, og hvordan selve vedlikeholdet utføres.

#### Utforming og tilpasning av tetningssystemet

- Sekundær kilde til tettegass for å unngå kontaminering
- Trykkutligningsvolum for bedre kontroll på trykkvariasjoner
- Koalescerfilter og dreneringsventiler ved fare for væskedannelse
- Installere aktuelle alarmer for overvåking av utstyrets tilstand

#### Drift av kompressorsystemet

- Unngå start og stopp, i størst mulig grad, for å redusere sannsynligheten for kontaminering
- Unngå å kjøre på redusert effekt for å redusere sannsynligheten for kontaminering
- Fastsatte prosedyrer for håndtering av kompressorsystemet ved uforutsett driftsstans

#### Vedlikehold av tetningssystemet

- Overvåke filter
- Manuell kontroll av filter
- Overvåke temperatur på tetningskomponenter
- Overvåke trykk og strømning i primærventilasjon
- Overvåke trykk på buffergass

Kommunikasjon mellom utstyrteier, leverandør og de som til daglig drifter systemet er avgjørende for implementering av de foreslåtte tiltakene. For utstyrseier vil involvering av flere disipliner (mekanisk, elektro, etc.) i disse avgjørelsene sikre en helhetlig forståelse av systemet man vedlikeholder.

## 6. KONKLUSJON

### 6.1. OPPSUMMERING OG KONKLUSJONER

Denne oppgaven har avdekket årsaker til tetningsfeil og sett på mulighetene for å forutsi når disse feilene inntreffer. Til dette er FMSA-metodikken benyttet. En inndeling av komponentene i tetningssystemet ble gjort ved å skille mellom primær-, sekundær- og barrieretetninger med tilhørende støttesystemer.

De identifiserte feilårsakene for feilmoden «Gass lekker ut av systemet» for de ulike tetningskomponentene er oppsummert i Tabell 10 under. For ytterligere årsaksnivå refereres det til tabeller i resultatkapittelet 4.2.

Tabell 10: Resultater fra årsaksanalysen

Feilårsaker (nivå 1-2)	Primærtetning	Sekundærtetning	Barrieretetning
Tilsmusset tetninger	X	X	
Slitasje på labyrinttetning	X		
Kontaktskader mellom tetningsflater	X	X	
Forskyvning av tetningsflater	X	X	
Tilsmusset labyrinttetning			X
Utilstrekkelig trykk på buffergass			X

Symptomer for de definerte feilårsakene ble videre identifisert og presentert i form av et årsakstre. En oppsummering av dette følger, hvor de ulike symptomene skilles med tall.

For primærtetningen ble følgende symptomer for tetningsfeil identifisert:

- Forandring av differensialtrykk over filter (1)
- Trykk inn på primærtetning er lavt (2)
- Strømning inn på primærtetning er lav (3)
- Økt strømning i primærventilasjon (4)
- Økt trykk i primærventilasjon (5)
- Temperaturøkning over tetningsflater (6)
- Lav temperatur på tettegass (7)

For sekundærtetningen ble følgende symptomer for tetningsfeil identifisert:

- Forandring i differensialtrykk over filteret (1)
- Trykk inn på primærtetning er lavt (2)
- Strømning inn på primærtetning er lav (3)
- Økt strømning i primærventilasjon (4)
- Økt trykk i primærventilasjon (5)
- Temperaturøkning over tetningsflater (6)

- Smøreolje i sekundærventilasjon (8)
- Lavt trykk på buffergass inn på barrieretetningen (9)

For barrieretetningen ble følgende symptomer for tetningsfeil identifisert:

- Smøreolje i sekundærventilasjon (8)
- Lavt trykk på buffergass inn på barrieretetningen (9)
- Lav temperatur på buffergass (10)

For å drive tilstandsbasert vedlikehold på tetningssystemet er man avhengig av å kunne måle og registrere de identifiserte symptomene, og se sammenhengen mellom disse for å si noe om tilstanden til utstyret. Samtlige av de identifiserte symptomene lar seg overvåke og registrere. Utfordringen ligger i å tolke signalene man får og iverksette vedlikeholdsaksjoner.

Resultater fra analysen viser følgende sammenhenger mellom symptomer og feilårsaker:

$$(1) \cap (2) \cap (3) = \{\text{Høy motstand over filter}\}$$

$$(2) \cap (3) = \left\{ \begin{array}{l} \text{Uttakstrykket ikke høyt nok} \\ \text{Høy motstand i systemet} \\ \text{Feiljusterte ventiler} \\ \text{Feil på antisurge ventil} \end{array} \right\}$$

$$(2) \cap (7) = \{\text{Væskedannelse i systemet}\}$$

$$(4) \cap (5) = \{\text{Feil på primærtetning}\}$$

$$(4) \cap (5) \cap (6) = \left\{ \begin{array}{l} \text{Kontaktskade mellom tetningsflater} \\ \text{Feil på primærtetning} \end{array} \right\}$$

$$(6) = \{\text{Kontakt mellom tetningsflater}\}$$

$$(4) \cap (5) \cap (8) = \{\text{Feil på sekundærtetning}\}$$

$$(8) = \{\text{Feil på barrieretetning}\}$$

## 6.2. ANBEFALINGER OG VIDERE ARBEID

Basert på det som ble avdekket i analysen var det mulig å komme med konkrete tiltak for hvordan vedlikeholdet kan styres for å ha kontroll med tetningenes tilstand og redusere sannsynligheten for uforutsett tetningssvikt. Informasjonsgrunnlaget bak resultatene og anbefalingene baserer seg på erfaringer fra utstyrseier, leverandør og den nyeste forskningen som er gjort innenfor dette området. Det bør understrekes at mulighetene for å ha oversett årsaker, symptomer og sammenhenger, er tilstede.

Anbefalingene rettes hovedsakelig til utstyrseier A/S Norske Shell, men vil også være anvendelig for de fleste kompressorer med denne typen tørrgasssystem. Spesifikke verdier og grenser for målinger for de ulike symptomene er ikke gitt, og vil være opp til den enkelte utstyrseier å fastsette.

De foreslåtte tiltakene skal redusere sannsynligheten for tetningssvikt og gjøre det mulig å drive proaktivt vedlikehold av tetningssystemet. Anbefalingene er kategorisert etter design, drift og vedlikehold av tetningssystemet.

### Utforming og tilpasning av tetningssystemet

- Sekundær kilde til tettegass for å unngå kontaminering
- Trykkutligningsvolum for bedre kontroll på trykkvariasjoner
- Koalescerfilter og dreneringsventiler ved fare for væskedannelse
- Installere aktuelle alarmer for overvåking av utstyrets tilstand

### Drift av kompressorsystemet

- Unngå start og stopp, i størst mulig grad, for å redusere sannsynligheten for kontaminering
- Unngå å kjøre på redusert effekt for å redusere sannsynligheten for kontaminering
- Fastsatte prosedyrer for håndtering av kompressorsystemet ved uforutsett driftsstans

### Vedlikehold av tetningssystemet

- Overvåke filter
- Manuell kontroll av filter
- Overvåke temperatur på tetningskomponenter
- Overvåke trykk og strømning i primærventilasjon
- Overvåke trykk på buffergass

Som det ble presisert i diskusjonen vil kommunikasjon mellom utstyrteier, leverandør og de som til daglig drifter systemet være avgjørende for implementering av de foreslåtte tiltakene.

For A/S Norske Shell vil første steg være å utføre en gapanalyse, som vil si noe om dagens ståsted i forhold til hva som er analysert i denne oppgaven. Dette vil danne grunnlaget for å fatte en beslutning om hvilke tiltak som er mulig og ønskelig å innføre.



Kostnadsberegninger knyttet til de ulike tiltakene bør utføres før en beslutning tas. Spesielt gjelder dette anbefalingene som går på utforming og tilpasninger av systemet. For de resterende tiltakene er kostnadene mindre vesentlig.

## REFERANSER

- [1] J. S. Stahley, 2001. [Internett]. Available: <http://www.dresser-rand.com/techpapers/tp134.pdf>. [Funnet 15 September 2014].
- [2] Natural Gas STAR Partners, «<http://www.epa.gov/>,» United States Environmental Protection Agency, 2006. [Internett]. Available: [http://www.epa.gov/gasstar/documents/ll\\_wetseals.pdf](http://www.epa.gov/gasstar/documents/ll_wetseals.pdf). [Funnet 30 September 2014].
- [3] *Mechanical Seal Fundamentals*. [Film]. <https://www.youtube.com/watch?v=GioZjBOcgWU>, 2014.
- [4] G. Lilledahl og A. W. Hegnes, «Kvalitativ metode,» 2000. [Internett]. Available: <http://www.giaever.com/sosiologi/KM.htm>.
- [5] Norsk Standard, *NS-EN 13306:2010 Vedlikehold - Vedlikeholdsterminologi*, Standard Norge, 2010.
- [6] P. I. Bye, *Vedlikehold og driftssikkerhet*, Høgskolen i Sør-Trøndelag (HiST), 2009.
- [7] K. Øien og P. Schjølberg, «Vedlikehold som virkemiddel for å forebygge storulykker - Vedlikeholdsstatus og utfordringer,» SINTEF, 2008.
- [8] J. S. Gudmundsson, «Kompresjon og Kompressor,» 2010.
- [9] J. Rashid, «FFBL Technical World,» 2010. [Internett]. Available: <http://ffbltechworld.blogspot.no/2010/12/centrifugal-compressor-description.html>.
- [10] Shell Norge, «[www.shell.no](http://www.shell.no/),» 2014. [Internett]. Available: <http://www.shell.no/products-services/ep/ormenlange/no.html>. [Funnet 16 September 2014].
- [11] *Centrifugal Compressors Principles Part 1*. [Film]. 2014.
- [12] J. E. Salomonsen, *Introduksjon gasskompressor, MainTech*, 2014.
- [13] Ø. Eidsmoen, «[www.ntnu.no/ipt](http://www.ntnu.no/ipt),» Dresser-Rand AS, 2005. [Internett]. Available: <http://www.ipt.ntnu.no/~jsg/undervisning/naturgass/lysark/LysarkEidsmoen2005.pdf>. [Funnet 27 August 2014].

- [14] T. Qiliang, Regissør, *Compressor Surge and Prevention*. [Film]. 2014.
- [15] S. L. Ross og R. F. Beckinger, «[www.turbolab.tamu.edu/](http://www.turbolab.tamu.edu/),» 2003. [Internett]. Available: <http://turbolab.tamu.edu/proc/turboproc/T32/t32-18.pdf>. [Funnet 1 September 2014].
- [16] Health & Safety Executive, «Hydrocarbon release - dry gas seal integrity survey report,» HSE, 2000.
- [17] T. Finseth, *Arbeidsmøte Råket 28.10.2014*. [Intervju]. 2014.
- [18] K. Malnes, *Arbeidsmøte Shell/MainTech om tetningssystemet (Draugen)*, 2014.
- [19] K. Malnes, *Direktør i Eagle Burgmann*, 2014.
- [20] R. Majhi og R. Schiappacasse, «Trouble shooting the problems of Dry Gas Seals and Systems in Centrifugal Compressors,» 2011.
- [21] J. S. Stahley, «TEES,» 2003. [Internett]. Available: <http://turbolab.tamu.edu/proc/turboproc/T31/t31pg145.pdf>.
- [22] H. Ormestad, «Store Norske Leksikon,» 2009. [Internett]. Available: <https://snl.no/Joule%E2%80%93Thomson-effekt>.
- [23] J. E. Salomonsen, *Veiledningsmøte 12.12.14*, MainTech, 2014.
- [24] K. E. Harstveit, «Store Norske Leksikon,» 2009. [Internett]. Available: <https://snl.no/duggpunkt>.
- [25] T. Finseth, «Havari 2.trinns kompressor, tog 1. Root Cause,» A/S Norske Shell, 2014.
- [26] M. Rasmussen, TMR4260 Driftsteknikk grunnkurs, Institutt for Marin Teknikk, 2003.
- [27] J. Moubray, *Reliability-Centered Maintenance – RCM II (2.utgave)*, Butterworth-Heinemann, 1997.
- [28] Oljedirektoratet, «Basisstudie vedlikeholdsstyring - Metode for egevaluering av vedlikeholdsstyring,» 1998.

- [29] NORSOK Standard, *Utvikling av NORSOK-standarder*, Standard Norge, 2008.
- [30] R. C. M. Yam, P. W. Tse, L. Li og P. Tu, «Intelligent Predictive Decision Support System for Condition-Based Maintenance,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2001.
- [31] R. Mobley, *An Introduction to Predictive Maintenance*, Butterworth Heinemann/Elsevier Science, 2002.
- [32] B. Syre, «Muligheter og utfordringer i forbindelse med videre utvikling av Tilstandsbasert Vedlikehold,» Universitetet i Stavanger (UiS), 2009.
- [33] M. Bengtsson, «On Condition Based Maintenance and its Implementation in Industrial Settings,» Mälardalen University Press Dissertations, 2007.
- [34] ISO, «Condition monitoring and diagnostics of machines - ISO 13379-1,» International Organization for Standardization (ISO), 2012.
- [35] UiO , «Boolsk Algebra og kombinatorisk logikk - Institutt for informatikk,» 2014. [Internett]. Available: <http://www.uio.no/studier/emner/matnat/ifi/INF2270/v14/foiler/02b---boolsk-algebra---utfylt.pdf>.
- [36] C. Sivapuram, «Dry Gas Sealing Systems for Oil Sands Pumping Applications,» 2005.
- [37] J. E. Salomonsen, *Veiledningsmøte 28.11.14*, MainTech , 2014.
- [38] A/S Norske Shell, *Diverse illustrasjoner*, A/S Norske Shell, 2014.
- [39] Ptil, «Vedlikeholdsstyring,» November 2014. [Internett]. Available: <http://www.ptil.no/vedlikeholdsutfordringer/category1021.html>.

# VEDLEGG A: OPPGAVETEKSTEN



**MASTEROPPGAVE FOR: Stud. Techn. Camilla Erstad**

**Tittel: Tilstandsbasert vedlikehold av tørrgassstetninger**

**Bakgrunn:**

MainTech AS er en ledende aktør innen tilrettelegging av drift, vedlikehold og inspeksjon.

MainTech AS har en langsiktig kontrakt for tilstandskontroll, vedlikehold og inspeksjon ved Ormen Lange landanlegg på Nyhamna i Møre og Romsdal. Anlegget drives av A/S Norske Shell som har til målsetning at vedlikeholdet skal drives til "World Class" standard.

Hovedkontor: Granåsvegen 15  
7048 Trondheim  
Tel: 73 95 67 50

[www.maintech.no](http://www.maintech.no)

Kontaktperson Vedlikehold: Sverre Wattum / Jan Erik Salomonsen

**Hensikt, Oppgavebeskrivelse:**

Eksportgass kompressorene på Nyhamna leverer 20 % av Storbritannias gassbehov. Det kreves en oppetid for kompressorene på mer enn 98 % for å sikre leveransen. For å unngå gass lekkasje til omgivelsene er eksport kompressorene utstyrt med tettegass systemer. Dette er tørrgass tetningssystemer med avansert fluiddynamikk, som opererer under svært fine toleranser. Tettegass systemenes funksjon er helt avgjørende for at eksportgass kompressorene kan drives.

A/S Norske Shell ser det som kritisk viktig å sikre seg god kontroll for å unngå at feil oppstår og for best mulig å kunne forutsi feilutvikling på tettegass systemene. Det er også viktig å oppnå en oversikt over hvilke symptomer og diagnosemuligheter som kan implementeres for å oppnå en slik kontroll. A/S Norske Shell har i dag ikke tilstrekkelig kontroll på tørrgass tetningene og har opplevd at disse har sviktet uten at slik svikt kunne forutses. Shell anser det derfor som meget viktig å utarbeide en oversikt over problematikken og iverksette tiltak for å oppnå god tilstandskontroll med tetningene. Kandidaten skal derfor:

- Generelt sette seg inn i og forklare funksjon og virkemåte for tettegasssystemer for gass eksport kompressorer.
- Forklare i detalj funksjon av tettegasssystemet, i forhold til driftssikkerhet og vedlikeholdsstyring på A/S Norske Shells Nyhamna anlegg. Definere mulige feilmoder og kompensierende tiltak i forhold til disse.
- Definere mulige symptomer på feil og kombinasjoner av symptomer for tilstandsbasert diagnostikk av tettegass systemene.
- Det forventes at kandidaten tar i bruk nødvendige analyseverktøy til sin oppgave, eks. FMEA, RCA, Årsak/effekt diagrammer etc.

NB! Omfang for aktivitetene tilpasses oppgavens vektall

**Industritilknytning:**

Industritilknytningen for denne oppgaven er MainTech AS og A/S Norske Shell.

## VEDLEGG B: A/S NORSCHE SHELL OG ORMEN LANGE [10]

### SHELL I NORGE

Shell har vært aktiv i Norge i mer enn 100 år med oppstart i 1912. Våre aktiviteter inkluderer leting og produksjon av olje og gass (oppstrøm), og raffinering, salg og markedsføring av petroleumsprodukter (nedstrøm). Vårt hovedkontor ligger i Sola kommune utenfor Stavanger. Oppstrømsvirksomheten har i tillegg kontorer i Kristiansund og på Aukra, mens nedstrømsvirksomheten blir ledet fra Oslo.

A/S Norske Shell er en betydelig aktør i Norge, og er det internasjonale olje- og gasselskapet på norsk sokkel med størst operert produksjon. Shell er operatør for oljefeltet Draugen og gassfeltet Ormen Lange i Norskehavet. Shell er totalt operatør for åtte utvinningstillatelser og partner/deleier i ytterligere 17 lisenser på norsk sokkel.

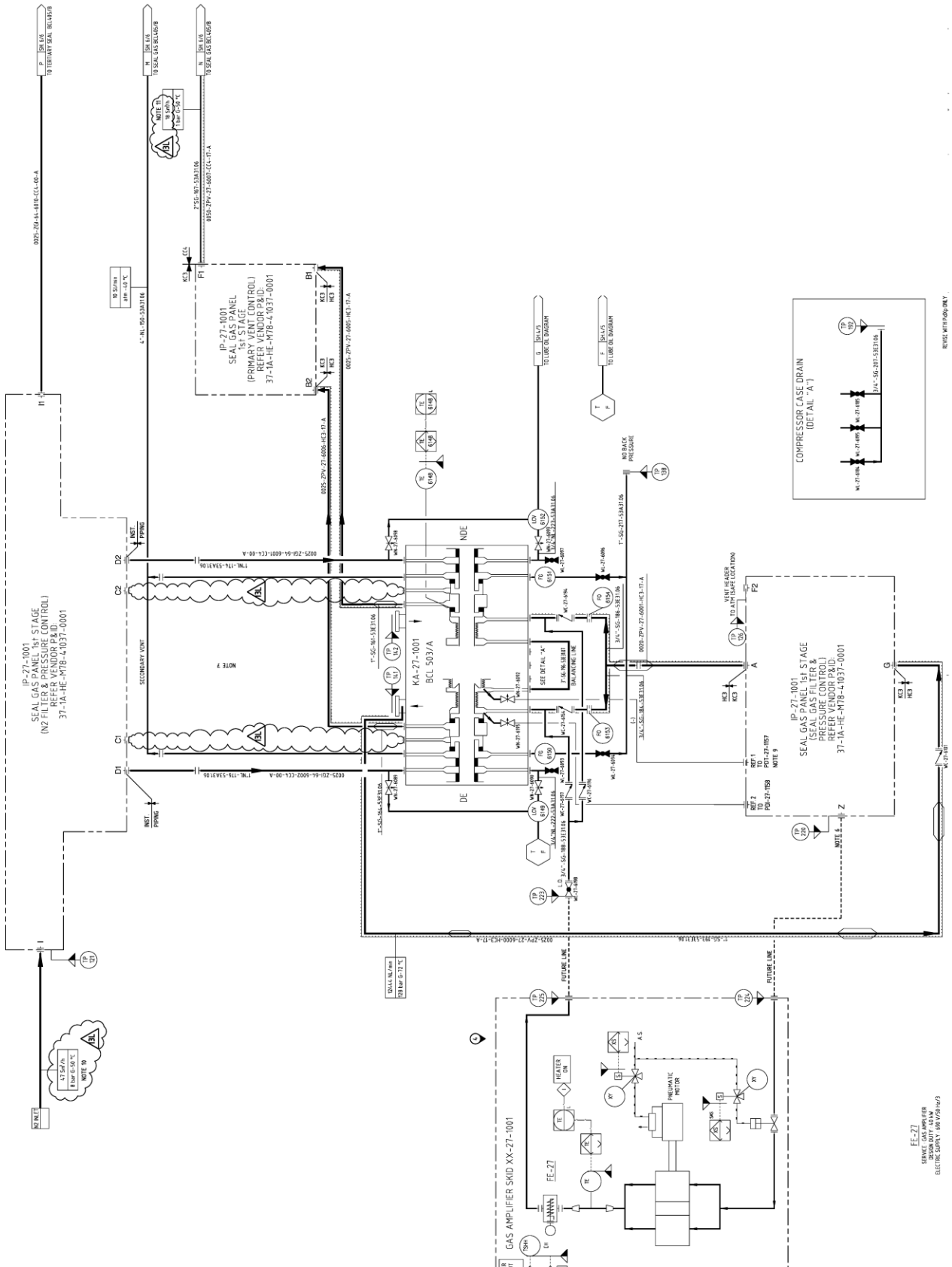


### ORMEN LANGE – RASKE FAKTA

- Ormen Lange er Norges nest største gassfelt og befinner seg på 850 til 1 100 meters havdyp.
- Reservoaret ligger 120 kilometer nordvest for Kristiansund i Norskehavet, nesten 3 000 meter under havoverflaten. Ormen Lange-reservoaret dekker et område på ca 350 km<sup>2</sup> – nesten like stort som hele Molde kommune.
- Ormen Lange-brønnene, som bores i et område med ekstreme værforhold og minusgrader på havbunnen, er verdens største i diameter.
- Konseptløsningen for Ormen Lange inkluderer 24 brønner fordelt på fire brønnrammer. Den fjerde brønnrammen ble installert i 2011/2012.
- Brønnstrømmen blir prosessert på landanlegget på Nyhamna, hvor den tilbringer knappe 10 minutter, før den eksporteres 1200 kilometer gjennom verdens nest lengste rørledning, Langeled, til Easington sør i England.
- Ormen Lange har etablert Norge som verdens andre største gasseksportør etter Russland. Ormen Lange forsyner opptil 20 prosent av Storbritannias gassforbruk.
- Ormen Lange produserer også en betydelig mengde lettolje, faktisk like mye som et middels stort oljefelt.
- Både utbyggingen og den videre utviklingen av Ormen Lange består av store delprosjekter som krever ny teknologi og innovasjon.
- Lisenspartnerne i Ormen Lange er Shell (operatør), Statoil, Petoro, Dong og ExxonMobil.



# VEDLEGG D: P&ID FOR EKSPORT GASSKOMPR. - TETNINGSSYSTEM [38]



D

FE-27  
 0101  
 0102  
 0103  
 0104  
 0105  
 0106  
 0107  
 0108  
 0109  
 0110  
 0111  
 0112  
 0113  
 0114  
 0115  
 0116  
 0117  
 0118  
 0119  
 0120  
 0121  
 0122  
 0123  
 0124  
 0125  
 0126  
 0127  
 0128  
 0129  
 0130  
 0131  
 0132  
 0133  
 0134  
 0135  
 0136  
 0137  
 0138  
 0139  
 0140  
 0141  
 0142  
 0143  
 0144  
 0145  
 0146  
 0147  
 0148  
 0149  
 0150  
 0151  
 0152  
 0153  
 0154  
 0155  
 0156  
 0157  
 0158  
 0159  
 0160  
 0161  
 0162  
 0163  
 0164  
 0165  
 0166  
 0167  
 0168  
 0169  
 0170  
 0171  
 0172  
 0173  
 0174  
 0175  
 0176  
 0177  
 0178  
 0179  
 0180  
 0181  
 0182  
 0183  
 0184  
 0185  
 0186  
 0187  
 0188  
 0189  
 0190  
 0191  
 0192  
 0193  
 0194  
 0195  
 0196  
 0197  
 0198  
 0199  
 0200  
 0201  
 0202  
 0203  
 0204  
 0205  
 0206  
 0207  
 0208  
 0209  
 0210  
 0211  
 0212  
 0213  
 0214  
 0215  
 0216  
 0217  
 0218  
 0219  
 0220  
 0221  
 0222  
 0223  
 0224  
 0225  
 0226  
 0227  
 0228  
 0229  
 0230  
 0231  
 0232  
 0233  
 0234  
 0235  
 0236  
 0237  
 0238  
 0239  
 0240  
 0241  
 0242  
 0243  
 0244  
 0245  
 0246  
 0247  
 0248  
 0249  
 0250  
 0251  
 0252  
 0253  
 0254  
 0255  
 0256  
 0257  
 0258  
 0259  
 0260  
 0261  
 0262  
 0263  
 0264  
 0265  
 0266  
 0267  
 0268  
 0269  
 0270  
 0271  
 0272  
 0273  
 0274  
 0275  
 0276  
 0277  
 0278  
 0279  
 0280  
 0281  
 0282  
 0283  
 0284  
 0285  
 0286  
 0287  
 0288  
 0289  
 0290  
 0291  
 0292  
 0293  
 0294  
 0295  
 0296  
 0297  
 0298  
 0299  
 0300  
 0301  
 0302  
 0303  
 0304  
 0305  
 0306  
 0307  
 0308  
 0309  
 0310  
 0311  
 0312  
 0313  
 0314  
 0315  
 0316  
 0317  
 0318  
 0319  
 0320  
 0321  
 0322  
 0323  
 0324  
 0325  
 0326  
 0327  
 0328  
 0329  
 0330  
 0331  
 0332  
 0333  
 0334  
 0335  
 0336  
 0337  
 0338  
 0339  
 0340  
 0341  
 0342  
 0343  
 0344  
 0345  
 0346  
 0347  
 0348  
 0349  
 0350  
 0351  
 0352  
 0353  
 0354  
 0355  
 0356  
 0357  
 0358  
 0359  
 0360  
 0361  
 0362  
 0363  
 0364  
 0365  
 0366  
 0367  
 0368  
 0369  
 0370  
 0371  
 0372  
 0373  
 0374  
 0375  
 0376  
 0377  
 0378  
 0379  
 0380  
 0381  
 0382  
 0383  
 0384  
 0385  
 0386  
 0387  
 0388  
 0389  
 0390  
 0391  
 0392  
 0393  
 0394  
 0395  
 0396  
 0397  
 0398  
 0399  
 0400  
 0401  
 0402  
 0403  
 0404  
 0405  
 0406  
 0407  
 0408  
 0409  
 0410  
 0411  
 0412  
 0413  
 0414  
 0415  
 0416  
 0417  
 0418  
 0419  
 0420  
 0421  
 0422  
 0423  
 0424  
 0425  
 0426  
 0427  
 0428  
 0429  
 0430  
 0431  
 0432  
 0433  
 0434  
 0435  
 0436  
 0437  
 0438  
 0439  
 0440  
 0441  
 0442  
 0443  
 0444  
 0445  
 0446  
 0447  
 0448  
 0449  
 0450  
 0451  
 0452  
 0453  
 0454  
 0455  
 0456  
 0457  
 0458  
 0459  
 0460  
 0461  
 0462  
 0463  
 0464  
 0465  
 0466  
 0467  
 0468  
 0469  
 0470  
 0471  
 0472  
 0473  
 0474  
 0475  
 0476  
 0477  
 0478  
 0479  
 0480  
 0481  
 0482  
 0483  
 0484  
 0485  
 0486  
 0487  
 0488  
 0489  
 0490  
 0491  
 0492  
 0493  
 0494  
 0495  
 0496  
 0497  
 0498  
 0499  
 0500  
 0501  
 0502  
 0503  
 0504  
 0505  
 0506  
 0507  
 0508  
 0509  
 0510  
 0511  
 0512  
 0513  
 0514  
 0515  
 0516  
 0517  
 0518  
 0519  
 0520  
 0521  
 0522  
 0523  
 0524  
 0525  
 0526  
 0527  
 0528  
 0529  
 0530  
 0531  
 0532  
 0533  
 0534  
 0535  
 0536  
 0537  
 0538  
 0539  
 0540  
 0541  
 0542  
 0543  
 0544  
 0545  
 0546  
 0547  
 0548  
 0549  
 0550  
 0551  
 0552  
 0553  
 0554  
 0555  
 0556  
 0557  
 0558  
 0559  
 0560  
 0561  
 0562  
 0563  
 0564  
 0565  
 0566  
 0567  
 0568  
 0569  
 0570  
 0571  
 0572  
 0573  
 0574  
 0575  
 0576  
 0577  
 0578  
 0579  
 0580  
 0581  
 0582  
 0583  
 0584  
 0585  
 0586  
 0587  
 0588  
 0589  
 0590  
 0591  
 0592  
 0593  
 0594  
 0595  
 0596  
 0597  
 0598  
 0599  
 0600  
 0601  
 0602  
 0603  
 0604  
 0605  
 0606  
 0607  
 0608  
 0609  
 0610  
 0611  
 0612  
 0613  
 0614  
 0615  
 0616  
 0617  
 0618  
 0619  
 0620  
 0621  
 0622  
 0623  
 0624  
 0625  
 0626  
 0627  
 0628  
 0629  
 0630  
 0631  
 0632  
 0633  
 0634  
 0635  
 0636  
 0637  
 0638  
 0639  
 0640  
 0641  
 0642  
 0643  
 0644  
 0645  
 0646  
 0647  
 0648  
 0649  
 0650  
 0651  
 0652  
 0653  
 0654  
 0655  
 0656  
 0657  
 0658  
 0659  
 0660  
 0661  
 0662  
 0663  
 0664  
 0665  
 0666  
 0667  
 0668  
 0669  
 0670  
 0671  
 0672  
 0673  
 0674  
 0675  
 0676  
 0677  
 0678  
 0679  
 0680  
 0681  
 0682  
 0683  
 0684  
 0685  
 0686  
 0687  
 0688  
 0689  
 0690  
 0691  
 0692  
 0693  
 0694  
 0695  
 0696  
 0697  
 0698  
 0699  
 0700  
 0701  
 0702  
 0703  
 0704  
 0705  
 0706  
 0707  
 0708  
 0709  
 0710  
 0711  
 0712  
 0713  
 0714  
 0715  
 0716  
 0717  
 0718  
 0719  
 0720  
 0721  
 0722  
 0723  
 0724  
 0725  
 0726  
 0727  
 0728  
 0729  
 0730  
 0731  
 0732  
 0733  
 0734  
 0735  
 0736  
 0737  
 0738  
 0739  
 0740  
 0741  
 0742  
 0743  
 0744  
 0745  
 0746  
 0747  
 0748  
 0749  
 0750  
 0751  
 0752  
 0753  
 0754  
 0755  
 0756  
 0757  
 0758  
 0759  
 0760  
 0761  
 0762  
 0763  
 0764  
 0765  
 0766  
 0767  
 0768  
 0769  
 0770  
 0771  
 0772  
 0773  
 0774  
 0775  
 0776  
 0777  
 0778  
 0779  
 0780  
 0781  
 0782  
 0783  
 0784  
 0785  
 0786  
 0787  
 0788  
 0789  
 0790  
 0791  
 0792  
 0793  
 0794  
 0795  
 0796  
 0797  
 0798  
 0799  
 0800  
 0801  
 0802  
 0803  
 0804  
 0805  
 0806  
 0807  
 0808  
 0809  
 0810  
 0811  
 0812  
 0813  
 0814  
 0815  
 0816  
 0817  
 0818  
 0819  
 0820  
 0821  
 0822  
 0823  
 0824  
 0825  
 0826  
 0827  
 0828  
 0829  
 0830  
 0831  
 0832  
 0833  
 0834  
 0835  
 0836  
 0837  
 0838  
 0839  
 0840  
 0841  
 0842  
 0843  
 0844  
 0845  
 0846  
 0847  
 0848  
 0849  
 0850  
 0851  
 0852  
 0853  
 0854  
 0855  
 0856  
 0857  
 0858  
 0859  
 0860  
 0861  
 0862  
 0863  
 0864  
 0865  
 0866  
 0867  
 0868  
 0869  
 0870  
 0871  
 0872  
 0873  
 0874  
 0875  
 0876  
 0877  
 0878  
 0879  
 0880  
 0881  
 0882  
 0883  
 0884  
 0885  
 0886  
 0887  
 0888  
 0889  
 0890  
 0891  
 0892  
 0893  
 0894  
 0895  
 0896  
 0897  
 0898  
 0899  
 0900  
 0901  
 0902  
 0903  
 0904  
 0905  
 0906  
 0907  
 0908  
 0909  
 0910  
 0911  
 0912  
 0913  
 0914  
 0915  
 0916  
 0917  
 0918  
 0919  
 0920  
 0921  
 0922  
 0923  
 0924  
 0925  
 0926  
 0927  
 0928  
 0929  
 0930  
 0931  
 0932  
 0933  
 0934  
 0935  
 0936  
 0937  
 0938  
 0939  
 0940  
 0941  
 0942  
 0943  
 0944  
 0945  
 0946  
 0947  
 0948  
 0949  
 0950  
 0951  
 0952  
 0953  
 0954  
 0955  
 0956  
 0957  
 0958  
 0959  
 0960  
 0961  
 0962  
 0963  
 0964  
 0965  
 0966  
 0967  
 0968  
 0969  
 0970  
 0971  
 0972  
 0973  
 0974  
 0975  
 0976  
 0977  
 0978  
 0979  
 0980  
 0981  
 0982  
 0983  
 0984  
 0985  
 0986  
 0987  
 0988  
 0989  
 0990  
 0991  
 0992  
 0993  
 0994  
 0995  
 0996  
 0997  
 0998  
 0999  
 1000



