

Bendik Austad Dale
Benedicte Stiberg
William Leander Riveira Kvie

Analyse av lenseanlegg i vannkraftverk

Bacheloroppgave i Drift- og vedlikeholdsteknikk
Veileder: Viggo Gabriel Borg Pedersen
Mai 2022

Bendik Austad Dale
Benedicte Stiberg
William Leander Riveira Kvie

Analyse av lenseanlegg i vannkraftverk

Bacheloroppgave i Drift- og vedlikeholdsteknikk
Veileder: Viggo Gabriel Borg Pedersen
Mai 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for maskinteknikk og produksjon

RAPPORT BACHELOROPPGAVEN

Tittel: Analyse av lenseanlegg i vannkraftverk | Analysis of Drainage Water System in Hydropower Plants

Prosjektnr: MTP-D-2022-03

Forfattere: Bendik Austad Dale, Benedicte Stiberg, William Leander Riveira Kvie

Oppdragsgiver eksternt: TrønderEnergi Kraft v/ Oddvar Bjerkås

Veileder internt: Viggo Gabriel Borg Pedersen

Rapporten er: ÅPEN

Dato levert 20.05.2022

Kort sammendrag: I denne oppgaven er det undersøkt mulige oppgraderinger av lenseanlegg tilhørende TrønderEnergi's vannkraftverk. Bedriften melder om gjentagende uønsket svikt i komponenter tilhørende anlegget, i tillegg til lite bruk av tilstandsovervåking. Hensikten med oppgraderingene er å forenkle drift og vedlikehold av lenseanlegget, samtidig som tilgjengeligheten til anlegget opprettholdes.

In this thesis, possible upgrades of the drainage water systems belonging to TrønderEnergi's hydropower plants have been investigated. The company experiences repeated unwanted failures in components belonging to the plant, in addition to little use of condition monitoring. The purpose of the upgrades is to simplify operation and maintenance of the system, while maintaining the availability of the system.

Stikkord: Lenseanlegg, vannkraftverk, tilgjengelighet, HMS, pumpe, ejetor, vedlikehold, drift, analyse.

Keywords: Drainage water system, hydropower plant, availability, HSE, pump, ejector, maintenance, operations, analysis.

Forord

“Analyse av lenseanlegg i vannkraftverk” er et resultat av emnet MAST2900 - Bacheloroppgave Maskin. Prosjektgruppen består av 3 medlemmer som spesialiserer seg innenfor drift- og vedlikehold på maskiningeniørstudiet ved NTNU Trondheim. Oppgaven er gjennomført våren 2022 i samarbeid med TrønderEnergi AS.

Prosessen som har ledet frem til resultatet av oppgaven har vært krevende, men også lærerikt. På bakgrunn av problemstillingen presentert av TrønderEnergi har vi fått mulighet til å benytte oss av mye kunnskap vi har tilegnet oss i løpet av studiet. Prosjektgruppen har fått god innsikt i hvordan vedlikeholdsarbeid planlegges og gjennomføres i praksis, og dette har gitt oss gode forutsetninger for å tre inn i arbeidslivet.

Vi vil gjerne rette en stor takk til vår faglærer og veileder Viggo Gabriel Borg Pedersen. Pedersen har vært engasjert og bidratt med gode innspill, noe som har hjulpet på vår motivasjon til å gjennomføre oppgaven på best mulig vis. Vi vil også takke vår kontaktperson i TrønderEnergi, Oddvar Bjerkås. Oppgaven hadde ikke vært mulig å gjennomføre uten faglige innspill og gode forklaringer fra ham.

Trondheim, 20.05.2022

Bendik A. Dale

Bendik Austad Dale

Benedicte Stiberg

Benedicte Stiberg

William Kvie

William Leander Riveira Kvie

Sammendrag

I denne oppgaven er det undersøkt mulige oppgraderinger av lenseanlegg tilhørende TrønderEnergis vannkraftverk. Bedriften melder om gjentagende uønsket svikt i komponenter tilhørende anlegget, i tillegg til lite bruk av tilstandsovervåking. Hensikten med oppgraderingene er å forenkle drift og vedlikehold av lenseanlegget, samtidig som tilgjengeligheten til anlegget opprettholdes.

For å gjennomføre oppgaven på best mulig måte, er det tatt i bruk flere metoder for å analysere og vurdere nåværende tilstand til lenseanlegg knyttet til TrønderEnergis kraftverk i Orkla. Det er gjennomført en ståstedsanalyse for å få oversikt over hvordan anlegget driftes, og en risikovurdering for å kartlegge risikomomenter og tilhørende konsekvenser.

Fra ståstedsanalysen finner man at pumpesystemet er mest vedlikeholds- og kostnadskrevende i lenseanlegget. Ejektor- og signalsystemet hadde ikke like mange vedlikeholdsaksjoner, men alle aksjoner knyttet til signalsystemet var til gjengjeld korrektive. Oppgraderingene som har blitt vurdert i oppgaven er modernisering av signalsystem, modifisering av ejektorsystem og installasjon av en ekstra lensepumpe. Gjennom risikovurderingen kommer det fram at det er liten sannsynlighet for fullstendig svikt av lenseanlegget, som igjen medfører drukning av anlegget. Dersom dette skjer har det imidlertid store konsekvenser, hvilket understreker viktigheten av at eventuelle oppgraderinger bør ha minst like god tilgjengelighet som eksisterende komponenter.

Prosjektgruppen har funnet at den mest hensiktsmessige og kostnadseffektive oppgraderingen vil være å oppgradere signalsystemet, og samtidig modifisere aktuatoren som åpner til ejektor. Ved å ta i bruk en lasersensor til nivåmåling vil man kunne eliminere vedlikeholdsaksjoner knyttet til signalsystemet. Modifisering av aktuatoren muliggjør også fjernstyring av ejektor. Ved jevnlig testkjøring av ejektor reduserer man vedlikehold som skyldes stillstand over lengre perioder. Disse oppgraderingene vil bidra til at man unngår kostbare turer til vannkraftverkene, samtidig som lenseanlegget får økt tilstandsovervåking i form av kontinuerlig informasjon om vannhøyde i lensekummen. Om oppgraderingen opprettholder tilgjengeligheten til lenseanlegget, må dog vurderes ved fysisk testing.

Abstract

In this thesis, possible upgrades of the drainage water systems belonging to TrønderEnergi's hydropower plant have been investigated. The company experiences repeated unwanted failures in components belonging to the plant, in addition to little use of condition monitoring. The purpose of the upgrades is to simplify operations and maintenance of the drainage system, while maintaining the availability of the system.

In order to carry out the task in the best possible way, several methods have been used to analyze and assess the current condition of the drainage plant connected to TrønderEnergi's hydropower plants in Orkla. A point-of-view analysis has been carried out to get an overview of how the plant is operated, and a risk assessment to map risk factors and associated consequences.

From the point-of-view analysis, it is found that the pump system is most maintenance intensive and costly in the drainage system. The ejector and signaling system did not have as many maintenance operations, but all operations related to the signaling system were corrective. The upgrades that have been considered in the project are a modernization of the signaling system, modification of the ejector system and installation of an additional drainage pump. The risk assessment shows that there is little probability of complete failure of the drainage system, which in turn leads to flooding of the hydropower plant. If this happens, it has major consequences, which emphasizes the importance of any upgrades having at least as good availability as existing components.

The project group has found that the most appropriate and cost-effective upgrade will be to upgrade the signaling system, and at the same time modify the actuator which opens to the ejector. By using a laser sensor for level measurement, it will be possible to eliminate maintenance actions related to the signaling system. Modification of the actuator also enables remote control of the ejector. Regular testing of the ejector reduces maintenance caused by downtime over extended periods. These upgrades will help to avoid costly trips to the hydropower plants, at the same time as the drainage system receives increased condition monitoring in the form of continuous information about water level in the drainage basin. Whether the upgrade maintains the availability of the drainage system must be considered by testing the proposed modifications.

Forkortelser og formler

Tabellen presenterer og forklarer ulike forkortelser brukt i rapporten. Kapittel-kolonnen viser til første gang forkortelsen ble brukt i rapporten.

Forkortelse	Betydning	Kapittel
KVO	Kraftverkene i Orkla. I denne forkortelsen inngår TrønderEnergis vannkraftverk Svorkmo, Brattset, Grana, Litjfossen og Ulset.	1.1 Motivasjon
IFS	Industrial and Financial Systems, CMMS.	2.1 Datainnsamling
NTNU	Norges Teknisk-Naturvitenskaplige Universitet	2.1 Datainnsamling
IoT	Internet of Things.	3.1.2 Industri 4.0 og tilstandskontroll
KPI	Key Performance Indicator	3.1.3 Sensorteknologi
OEE	Overall Equipment Efficiency	3.1.3 Sensorteknologi
PLS	Programmerbar Logisk Styring	3.1.4 Programmerbar Logisk Styring
CMMS	Computerized Maintenance Management System. En database som inneholder informasjon om bedriften, vedlikeholdsoperasjoner, systembeskrivelser osv.	3.1.5 Vedlikeholdsledelse og driftssikkerhet
HMS	Helse, miljø og sikkerhet	3.1.5 Vedlikeholdsledelse og driftssikkerhet
SJA	Sikker jobbanalyse	3.2 Metoder

IP	Ingress Protection. Mål på resistans mot støv- (I) og vanninntrenging (P). Høyere tall indikerer større resistans. Eks. IP44.	5.2.1 Pumpsystem
NVE	Noregs vassdrags- og energidirektorat	6.2 Analyse

Formler brukt til beregninger av ulike parametere finnes i tabellen nedenfor, med en kort beskrivelse av formelen og dens bruksområde.

Forkortelse	Betydning	Formel	Kommentar
MTBM - Mean Time Between Maintenance	Gjennomsnittstid mellom vedlikehold, både forebyggende og korrektivt	$MTBM = \frac{1}{n} \sum T_i$	n = antall vedlikeholdsaksjoner, T_i = Total driftstid
MDT - Mean Down Time	Gjennomsnittlig nedetid, grunnet forebyggende og korrektivt vedlikehold, ventetid - All nedetid	$MDT = \frac{1}{n} \sum D_i$	D_i = nedetid
Operasjonell tilgjengelighet	Tilgjengelighet som inkluderer all nedetid	$A_{op.virk} = \frac{MTBM}{MTBM + MDT}$	
Nåverdi	En beregning som blant annet gir indikasjoner på om investeringer vil være økonomisk lønnsomme	$NNV = \sum_{t=1}^n \frac{x_n}{(1+r)^t} - I_0$	x_n = kontantstrøm i periode n, r = avkastningskrav, t = antall perioder, I_0 = investeringsbeløp
Internrente	Avkastningskravet r som gir $NNV = 0$	$\sum_{t=1}^n \frac{x_n}{(1+r)^t} - I_0 = 0$	

Tabelliste

Tabell 1 - Resultatmål	2
Tabell 2 - Kapitteloversikt	3
Tabell 3 - Informasjonskilder.....	6
Tabell 4 - Symboler feiltre	24
Tabell 5 - Fargenivåer risikomatrixe	26
Tabell 6 - Symbolbeskrivelse nåverdi.....	26
Tabell 7 - Skade- og feilmekanismer (Daleng, 1994).....	34
Tabell 8 - Oversikt vannkraftverk (TrønderEnergi, u.å.).....	35
Tabell 9 - Pumpetyper Svorkmo	36
Tabell 10 - Pumpetyper KVO	36
Tabell 11 - Funksjon flottørbrytere.....	38
Tabell 12 - Vedlikeholdsaksjoner Svorkmo	42
Tabell 13 - Feilklassifisering pumpesystem	45
Tabell 14 - Feilklassifisering ejektorsystem	47
Tabell 15 - Beregninger Svorkmo.....	47
Tabell 16 - Uønskede hendelser lenseanlegg	51
Tabell 17 - Minimale kuttmengder, orignalt feiltre	52
Tabell 18 - Nøkkelegenskaper LLT100	59
Tabell 19 - Minimale kuttmengder ved modernisering av signalsystem.....	62
Tabell 20 - Implementeringskostnader LLT100	63
Tabell 21 - Driftsbesparelser LLT100, per anlegg.....	64
Tabell 22 - Nåverdiberegninger LLT100, oppgradering i et lenseanlegg	65
Tabell 23 - Implementeringskostnader modifisering av ejektorsystem.....	68
Tabell 24 - Vedlikeholdsreduksjon modifisering av ejektorsystem, alle anlegg.....	69
Tabell 25 - Kuttmengder modifisering av signal- og ejektorsystem.....	71
Tabell 26 - Originale kuttmengder.....	76
Tabell 27 - Kuttmengder, oppgradering av signalsystem	82
Tabell 28 - Kuttmengder, oppgradert signal- og ejektorsystem	83
Tabell 29 - Implementeringskostnad signalsystem.....	83
Tabell 30 - Nåverdiberegninger signalsystem, ved oppgradering av ett anlegg.....	84
Tabell 31 - Implementeringskostnad ejektorsystem, per lenseanlegg	84
Tabell 32 - Feilkilder	95
Tabell 33 - Vurderingsaspekter ved oppgradering.....	99

Figurliste

Figur 1 - Skueglass (Binder GmbH, u.å.)	13
Figur 2 - Nøyaktighet og presisjon (Pedersen, 2021)	14
Figur 3 - Digitalt signal (Digital signal, u.å.).....	14
Figur 4 - Analogt signal (Analogue signal, u.å.).....	15
Figur 5 - Oversiktsbilde PLS	16
Figur 6 - Magnetventil (Solenoid Valve Working Principle, u.å.)	17
Figur 7 - Vedlikeholdssløyfen (Øien et. al., 2018)	18
Figur 8 - Driftssikkerhet.....	19
Figur 9 - Passiv redundans	22
Figur 10 - Aktiv redundans	23
Figur 11 - Eksempel feiltre	24
Figur 12 - Eksempel risikomatrise	26
Figur 13 - Oversikt vannkraftverk (Mjønerud, 2019).....	28
Figur 14 - Tilløpsrør (Gustafsson, u.å.)	29
Figur 15 - Pumpekraftverk (DOE, 2016).....	29
Figur 16 - Flottørbrytere (Disibeint Electronic, u.å.).....	32
Figur 17 - Ejektor (Daleng, 1994).....	32
Figur 18 - Vannstyrt aktuator (Garlock, u.å.)	33
Figur 19 - Lensepumpe (Xylem Vue, u.å.)	36
Figur 20 - Funksjonstegning flottørbrytere.....	37
Figur 21 - PLS originalsystem	39
Figur 22 - Ejektorflottør lensekum	39
Figur 23 - Flytskjema, original flottørløsning.....	40
Figur 24 - Driftstid lensepumper.....	42
Figur 25 - Totalt antall vedlikeholdsaksjoner	43
Figur 26 – MTBM - Alle anlegg.....	43
Figur 27 - Feilårsak pumpesystem	44
Figur 28 - VH-fordeling pumpesystem.....	44
Figur 29 - Svikt i signalsystem	45
Figur 30 - Feilårsaker ejektorsystem.....	46
Figur 31 - VH-fordeling ejektorsystem.....	46
Figur 32 - Total operasjonell tilgjengelighet	48
Figur 33 - Kostnader ved hvert anlegg	49
Figur 34 - Total kostnadsfordeling	49
Figur 35 - Originalt feiltre.....	52
Figur 36 - Risikomatrise lenseanlegg	54
Figur 37 - Traverskran Svorkmo.....	57
Figur 38 - Lensekum Svorkmo	57
Figur 39 - Måleprinsipp laser (ABB, 2022).....	58
Figur 40 - LLT100 (ABB, u.å.).....	59

Figur 41 - Feilmontering (ABB, 2020).....	59
Figur 42 - PLS modernisering av signalsystem.....	60
Figur 43 - Feiltre ved modernisering av signalsystem.....	62
Figur 44 - Flytskjema modifisering av ejektorsystem.....	66
Figur 45 - PLS oppgradering av signal- og ejektorsystem.....	68
Figur 46 – Tilgjengelighet, modifisering av ejektor.....	70
Figur 47 – Feiltre, modifisering av signal- og ejektorsystem.....	71
Figur 48 - Tilgjengelighet ved bruk av 3 lensepumper.....	72
Figur 49 - Feiltre, bruk av 3 lensepumper.....	73
Figur 50 - Vedlikeholdsfordeling.....	74
Figur 51 - Sammenligning vedlikehold.....	74
Figur 52 - Gjennomsnittlig operasjonell tilgjengelighet.....	75
Figur 53 - Originalt feiltre.....	76
Figur 54 - Kostnadsfordeling, prosent.....	77
Figur 55 - Kostnadsfordeling, kroner.....	77
Figur 56 - Vedlikeholdsfordeling ved oppgradering av signalsystem.....	78
Figur 57 - Vedlikeholdsfordeling på ejektorsystem.....	78
Figur 58 - Endring i vedlikehold ved modifisering av signal- og ejektorsystem.....	79
Figur 59 - Vedlikeholdsfordeling ved oppgradering av signal- og ejektorsystem.....	79
Figur 60 – Totale vedlikeholdsaksjoner ved bruk av 3 lensepumper.....	80
Figur 61 - Tilgjengelighet ved oppgradering av signalsystem.....	80
Figur 62 - Tilgjengelighet ved oppgradering av ejektor- og signalsystem.....	81
Figur 63 - Tilgjengelighet ved bruk av 3 lensepumper.....	81
Figur 64 - Originalt feiltre, høyre side.....	82
Figur 65 - Feiltre høyre side, oppgradering av signalsystem.....	82
Figur 66 – Feiltre høyre side, kun oppgradert signalsystem.....	83
Figur 67 - Feiltre høyre side, oppgradert signal- og ejektorsystem.....	83
Figur 68 - Alternative risikomatriser.....	92
Figur 69 - Validasjonsprosess.....	95

Innhold

Forord	I
Sammendrag.....	II
Abstract.....	III
1.0 Introduksjon.....	1
1.1 Motivasjon	1
1.2 Oppgavens mål.....	2
1.3 Oppbygning.....	3
1.4 Avgrensninger.....	4
2.0 Metode.....	5
2.1 Datainnsamling	5
Dokumentundersøkelse	5
Åpne individuelle intervju	5
2.2 Gyldighet og pålitelighet.....	7
2.3 Analysemetoder	8
2.3.1 Ståstedsanalyse	8
2.3.2 Risikovurdering.....	8
2.3.3 Feiltreanalyse	9
3.0 Teori	10
3.1 Vedlikehold.....	10
3.1.1 Typer vedlikehold	10
3.1.2 Industri 4.0 og tilstandskontroll	11
3.1.3 Sensorteknologi.....	12
3.1.4 Programmerbar Logisk Styring.....	15
3.1.5 Vedlikeholdsledelse og driftssikkerhet	17
3.1.6 Vedlikeholdsbegrep	20
3.2 Metoder	23
3.3 Økonomiske begrep	26
3.4 HMS	27
4.0 Generell systembeskrivelse	28
4.1 Overordnet forklaring av vannkraftverk	28
4.1.1 Magasin og innløp.....	29

4.1.2 Kraftstasjon	30
4.1.3 Utløp	30
4.2 Beskrivelse av lenseanlegg	30
4.2.1 Lensepumper.....	31
4.2.2 Nivåovervåkning.....	31
4.2.3 Ejektor.....	32
4.2.4 Vanlige skade- og feilmekanismer.....	33
5.0 Ståstedsanalyse.....	35
5.1 Vedlikeholdsstrategi	35
5.2 Funksjonsbeskrivelse - Lenseanlegg.....	36
5.2.1 Pumpesystem	36
5.2.2 Signalsystem	37
5.2.3 Ejektorsystem.....	39
5.3 Vedlikeholdshistorikk	41
5.3.1 Driftstid.....	41
5.3.2 Vedlikeholdsaksjoner og MTBM	42
5.3.3 Pumpesystem	44
5.3.4 Signalsystem	45
5.3.5 Ejektorsystem.....	46
5.3.6 Operasjonell tilgjengelighet.....	47
5.4 Økonomisk betraktning.....	48
6.0 Risikovurdering.....	50
6.1 Identifikasjon og konsekvens.....	50
6.1.1 Tidligere konsekvenser ved drukning.....	51
6.2 Analyse	52
6.3 Risikoreduserende tiltak.....	54
6.3.1 Reduksjon av sannsynlighet for svikt	54
6.3.2 Reduksjon av konsekvenser ved drukning.....	55
6.4 HMS risiko.....	56
6.5 Vurdering av risiko	57
7.0 Potensielle forbedringer	58
7.1 Forbedring 1 - Modernisering av signalsystem	58

7.1.1 Måleprinsipp	58
7.1.2 Implementering og kostnader	59
7.1.3 Vedlikehold.....	61
7.1.4 Feiltre	61
7.1.5 Nåverdiberegninger.....	63
7.2 Forbedring 2 - Modifisering av ejektorsystem.....	65
7.2.1 Forbedret løsning	65
7.2.2 Implementering og kostnader	67
7.2.3 Vedlikehold.....	69
7.2.4 Feiltre	70
7.3 Forbedring 3 - 3 Pumper	72
7.3.1 Sammenligning mellom bruk av 2 og 3 lensepumper	72
7.3.2 Implementering og kostnader	72
7.3.3 Vedlikehold.....	73
7.3.4 Feiltre	73
8.0 Resultat	74
8.1 Ståstedsanalyse	74
8.1.1 Vedlikehold.....	74
8.1.2 Tilgjengelighet	75
8.1.3 Feiltre	76
8.1.4 Kostnader	77
8.2 Sammenligning av forbedringer	77
8.2.1 Vedlikehold.....	77
8.2.2 Tilgjengelighet	80
8.2.3 Feiltre	82
8.2.4 Kostnader ved oppgradering av signalsystem.....	83
8.2.5 Kostnader ved oppgradering av ejektorsystem	84
8.2.6 Kostnader ved implementering av 3 lensepumper.....	85
9.0 Diskusjon	86
9.1 Resultatmål 1: Ståstedsanalyse	86
9.2 Resultatmål 2: Forbedringsforslag	88
9.2.1 Oppgradering av signalsystem.....	88

9.2.2 Oppgradering av ejektorsystem	89
9.2.3 Oppgradering av pumpesystem.....	90
9.3 Resultatmål 3: Risikovurdering	92
9.4 Resultatmål 4: Valg av forbedring	93
9.5 Feilkilder	94
10.0 Konklusjon.....	96
10.1 Resultatmål 1: Ståstedsanalyse	96
10.2 Resultatmål 2: Forbedringsforslag	96
10.3 Resultatmål 3: Risikovurdering	96
10.4 Resultatmål 4: Valg av forbedring	97
11.0 Videre arbeid	98
12.0 Referanseliste.....	100
13.0 Vedlegg.....	102

1.0 Introduksjon

Vannkraft er en miljøvennlig og fornybar energikilde, som står for omtrent 86% av all kraftproduksjon i Norge. Totalt finnes det 1739 vannkraftverk i landet, og 188 av disse befinner seg i Trøndelag (NVE, 2022). Felles for mange av kraftverkene er at de inneholder et lenseanlegg. Lenseanlegg har som mål å holde kraftverket tørt, og ta unna lekkasjevann. Det er kritisk at lenseanlegget er operativt til enhver tid, og gjennom god vedlikeholdsstyring kan man sikre den operative tilgjengeligheten til anlegget. I større kraftverk består lenseanlegget av inntil flere pumper, sensorer og andre vedlikeholdsobjekter, som samhandler for å ta bort vann i stasjonen. Skulle man oppleve havari på enkelte deler av anlegget, kan man risikere vannskader på utstyr, og i verste fall drukning av kraftverket. Slike ulykker kan føre til produksjonsstans i flere dager, og man risikerer tap av inntekter på opptil flere millioner kroner.

1.1 Motivasjon

TrønderEnergi er et energiselskap som eier og drifter 18 vannkraftverk i Midt-Norge. Til sammen produserer anleggene omtrent 2,6 TWh i året, og selskapet står dermed ansvarlig for store deler av kraftproduksjonen i Trøndelag. Vannkraftverkene til TrønderEnergi er relativt gamle, da de fleste ble ferdigstilt før 1985 (TrønderEnergi, u.å.). Anleggene har ikke opplevd noen betydelige oppgraderinger siden oppstart, og prosjektgruppen ser stort potensiale til forbedringer, da spesielt med tanke på lenseanleggene.

Den nyligste teknologiske revolusjonen, Industri 4.0, har ført med en enorm teknologisk utvikling, blant annet innenfor sensorteknologi. TrønderEnergi har nylig fått installert Wi-Fi i sine kraftverk, som åpner opp for nye muligheter innenfor moderne tilstandskontroll. Aktører kan oppnå et langt mer effektivt vedlikehold, og spare mye penger ved å oppgradere gamle systemer. I denne oppgaven utforskes nye muligheter for effektiv tilstandskontroll av lenseanleggene ved kraftverkene i Orkla (KVO). Vannkraftverkene som inngår i KVO er Svorkmo, Litjfossen, Brattset, Ulset og Grana vannkraftverk. På bakgrunn av dette er det formulert en problemstilling som retter seg inn mot å sikre tilgjengeligheten på lenseanleggene i disse kraftverkene.

1.2 Oppgavens mål

Lenseanleggene i vannkraftverkene til TrønderEnergi er kritiske deler av vannkraftverkene, og det oppleves gjentagende uønsket svikt i komponenter tilhørende dette systemet. Denne oppgaven har som hensikt å vurdere tiltak som øker drift- og vedlikeholdsvennligheten i lenseanleggene til TrønderEnergi, ved å ta utgangspunkt i tilgjengeligheten til anleggene. For å gjennomføre dette på best mulig måte, er det satt opp fire resultatmål som beskriver oppgavens hovedfokus.

1.	Ståstedsanalyse av tilgjengelighet og kostnader i eksisterende lenseanlegg.
2.	Identifisere 2-4 forbedringsforslag for å sikre tilgjengeligheten på utvalgte lenseanlegg.
3.	Gjennomføre risikovurdering av utvalgte lenseanlegg
4.	Utdypning av hvorfor og hvordan ett av forbedringstiltakene bør gjennomføres i eksisterende anlegg

Tabell 1 – Resultatmål

1.3 Oppbygning

Kapittel 1	Introduksjon Inneholder oppgavens motivasjon, mål, informasjonskilder og avgrensinger.
Kapittel 2	Metode Inneholder informasjon om metoder brukt for informasjonsinnhenting og illustrering i oppgaven.
Kapittel 3	Teori Inneholder relevant teori, som er grunnlaget for å forstå hvordan resten av oppgaven er bygget opp
Kapittel 4	Generell systembeskrivelse Inneholder beskrivelse av hvordan et vannkraftanlegg fungerer, og de ulike komponentene i et lenseanlegg.
Kapittel 5	Ståstedsanalyse Inneholder tekniske og økonomiske vurderinger av vannkraftverkene KVO.
Kapittel 6	Risikovurdering Inneholder en risikovurdering av lenseanleggene i KVO.
Kapittel 7	Potensielle forbedringer Inneholder tre konkrete forbedringstiltak som kan implementeres for å øke tilgjengeligheten og sikkerheten til anlegget.
Kapittel 8	Resultat Inneholder oppgavens resultater og funn.
Kapittel 9	Diskusjon Inneholder drøfting av resultater, validitet og feilkilder
Kapittel 10	Konklusjon Inneholder oppgavens konklusjon
Kapittel 11	Videre arbeid Inneholder informasjon rundt avsluttende arbeid som må gjøres før implementasjon av forbedring
Kapittel 12	Referanseliste Inneholder oppgavens referanser
Kapittel 13	Vedlegg

Tabell 2 – Kapitteloversikt

1.4 Avgrensninger

Som nevnt har TrønderEnergi 18 vannkraftverk i Midt-Norge. Skulle man undersøkt alle disse, ville oppgaven blitt veldig omfattende og tidkrevende. Prosjektgruppen valgte derfor å fokusere på vannkraftverkene i Orkla. Avgrensningen er gjort for å få et overordnet blikk over forbedringstiltak som kan implementeres generelt på alle anleggene. Alle anleggene har relativt lik teknologi og driftstid, noe som gjør bruk av data fra disse anleggene gunstig. Prosjektgruppen har vært på befaring på Svorkmo Kraftverk, og man har derfor valgt å beskrive et lenseanlegg med utgangspunkt i oppsettet på Svorkmo. Data er imidlertid hentet fra alle fem vannkraftverk, da dette gir større datagrunnlag for å kunne ta beslutninger om forbedringer. Dette er gjort for å begrense risikoen for dårlig formidling og uoversiktlig datagrunnlag i rapporten.

2.0 Metode

Dette kapittelet tar for seg hvilke metoder som er brukt for datainnsamling, og presenterer de viktigste kildene som er anvendt. Oppgavens gyldighet og pålitelighet drøftes, samt analysemetoder.

2.1 Datainnsamling

Det finnes ifølge samfunnsvitenskapelig metode to måter å innsamle og analysere data på, kvalitativ og kvantitativ metode. Kvalitativ metode tar utgangspunkt i innsamling av data i form av ord. Slike metoder har ofte få undersøkelsesobjekter, og informasjonsinnsamling er i mindre grad styrt på forhånd. Ved kvantitativ metode samler man kvantitative data, det vil si tall eller andre mengdetermer. Metoden tar ofte for seg flere undersøkelsesobjekter, og innsamlet informasjon er ofte predefinert (Jacobsen, 2018).

I denne oppgaven er det brukt både kvalitativ og kvantitativ data, men analysemetodene er hovedsakelig kvalitative. Data i oppgaven er hentet ved hjelp av de kvalitative metodene dokumentundersøkelse og intervju, men det er også hentet kvantitativ data gjennom TrønderEnergi sitt vedlikeholdsstyringssystem.

Dokumentundersøkelse

Mye informasjon brukt i oppgaven er hentet ved hjelp av dokumentundersøkelse. Dokumentundersøkelse er en kvalitativ måte å innhente sekundærdata, med den hensikt å bringe oppgaven mer faglig tyngde (Jacobsen, 2018). Det er tatt i bruk lærebøker, forskningsartikler, artikler fra nett og interne bedriftsdokumenter for å legge et teoretisk grunnlag. Det er lagt fokus på å bruke kvalitetssikrede kilder, og derfor er hoveddelen av artiklene hentet fra anerkjente databaser som NTNUs Universitetsbiblioteket.

Åpne individuelle intervju

For å kunne være fleksible med datainnhenting er det også brukt samtaleintervjuer. Gjennom prosjektperioden har gruppen hatt kontakt med senioringeniør Oddvar Bjerkås, for å få dybde og detaljforståelse av vannkraftverkene i Orkla. Bjerkås har jobbet i TrønderEnergi i 15 år, og har en helhetlig forståelse av vedlikeholdsfunksjonen til

vannkraftverkene. Intervjuene som har skjedd ansikt-til-ansikt har vært åpne og med en viss grad av pre-strukturering. Det vil si at de har foregått som helt vanlige samtaler, men at det på forhånd er bestemt hvilke temaer som skal tas opp. Gruppen har sørget for å ha en referent til alle intervjuer, slik at forklaringer og data blir tatt hånd om. Når det har vært dårlig med tid, er det også blitt gjennomført e-post intervju. Kontakt med ABB og andre vedrørende ulike oppgraderinger er også gjennomført via e-post.

Tabell 3 viser en oversikt over informasjonskilder brukt i oppgaven.

Informasjonskilde	Beskrivelse	Kommentar
1. IFS Enterprise	Informasjons- og styringssystem for vedlikehold	Gir informasjon om tekniske aspekter ved vannkraftverkene
2. Intervjuer	Åpne, uformelle intervjuer med personell fra TrønderEnergi og ABB	Gir innsikt og tolkning til innhentet data.
3. Norske Standarder	Tekniske spesifikasjoner som blant annet beskriver arbeidsmetoder og krav til tekniske systemer	Dokumenter som blir brukt til å definere fagbegreper eller god praksis.
4. Lærebøker	Lærebøker fra ulike emner	Pålitelige kilder som er hentet fra universitetsbiblioteket.
5. Artikler på nett	Hovedsakelig vitenskapelige artikler funnet gjennom NTNU Oria.	Relevante artikler for å underbygge uttalelser.
6. Møter med veileder/faglærer	Møter for oppgaveveiledning og tips	Gir oppgaveveiledning og praktisk informasjon

Tabell 3 - Informasjonskilder

2.2 Gyldighet og pålitelighet

Undersøkelser som blir gjort må være til å stole på. Derfor er det viktig at man vurderer innsamlet data. Innhentet data må tilfredsstillende to krav:

1. Dataen må være gyldig og relevant
2. Dataen må være pålitelig og troverdig

Med gyldighet og relevans menes det at den dataen som er innhentet faktisk gir svar på det man lurer på. Intern gyldighet går ut på om det er grunnlag for konklusjoner som blir trukket. Dette blir diskutert i 9.5 Feilkilder. Ekstern gyldighet handler om hvorvidt resultater fra et avgrenset område er gyldige i andre sammenhenger (Jacobsen, 2018). Oppgaven har fokus på Svorkmo vannkraftverk, men det er hentet data fra alle vannkraftverkene i Orkla. Dette er fordi anleggene ble bygget omtrent samtidig, og lenseanleggene er svært like. Man kan derfor si at oppgaven har god overførbarhet til disse anleggene, men hvor godt konklusjonene stemmer for andre vannkraftverk er vanskelig å si. Møter man samme problematikk som beskrevet i 1.2 Oppgavens mål, vil det være en viss grad av ekstern gyldighet. Dette er dog lite trolig, da gjentakende svikt i en spesifikk del av et vannkraftverk kan avhenge av mange forskjellige faktorer.

Pålitelighet og troverdighet går ut på om undersøkelsene i oppgaven er til å stole på. En enkel måte å vurdere påliteligheten til en oppgave, er ved et tankeeksperiment: vil man få tilnærmet likt resultat om man utfører akkurat samme undersøkelse to ganger? Dokumentundersøkelsen som er blitt gjort vurderes som pålitelig, da denne baserer seg på kvalitetssikrede kilder fra anerkjente databaser. Når det er brukt andre artikler fra internett, er disse blitt undersøkt nøye, og funnet troverdig nok til å kunne inkluderes i oppgaven.

Informasjonen som ble hentet fra de åpne intervjuene vurderes til å være pålitelig.

Prosjektgruppen anser kontaktperson i TrønderEnergi som faglig sterk, og tror at om intervjuene ble gjennomført på nytt, ville man oppnådd samme resultat. Det er imidlertid en svakhet at kontaktperson alene har vært hovedkilde til informasjon, med få andre intervjuobjekter. Kontaktperson er kilde til mye informasjon, men har ikke spisskompetanse på alle deler av lenseanlegget. Resultater har videre ikke blitt utfordret av andre enn faglig veileder for oppgaven.

IFS Enterprise er en av hovedkildene som er brukt i oppgaven, og programmet inneholder mye nyttig informasjon om kraftverkene til TrønderEnergi. Blant annet finner man

informasjon om vedlikeholdshistorikk og arbeidsordre, samt teknisk informasjon om utstyr og kostnader. Prosjektgruppen fikk innføring i bruk av IFS av personell i TrønderEnergi for å sikre at informasjon ble hentet fra riktig sted. Informasjonen i IFS var dog til tider mangelfull, og dette førte til at prosjektgruppen så seg nødt til å validere tall og beregninger med kontaktperson. Informasjonen hentet fra IFS er nøyaktig, men lider av manglende loggføring. Blant annet er kostnadsføring og detaljgraden av loggført vedlikehold varierende. Manglene er vesentlige, men grunnet drøfting med kontaktperson anses informasjon herfra som pålitelig. Problemstillingen diskuteres nærmere i 9.5 Feilkilder.

2.3 Analysemetoder

Oppgaven tar i bruk flere analysemetoder for å svare på problemstillingen og resultatmålene. Metodene kan vinkles kvalitativt eller kvantitativt.

2.3.1 Ståstedsanalyse

Hensikten med ståstedsanalysen er å få et objektivt bilde av hvordan lenseanlegget driftes i dag, og hvilke utfordringer anlegget har. Metoden skal synliggjøre mangelfullt vedlikehold eller andre svake punkt, slik at man enklere kan konkludere med mulige forbedringstiltak. Analysen bruker mye kvantitative data hentet fra IFS for å utføre beregninger på eksempelvis vedlikeholdsfrekvens eller tilgjengeligheten til systemet. Det er også tatt i bruk kvalitative data i analysen. Prosjektgruppen har vært på befaring på anlegget, og informasjon ble innhentet her og gjennom intervjuer.

2.3.2 Risikovurdering

Risikovurderingen tar utgangspunkt i teknisk risiko. Målet med vurderingen er å identifisere mulige feil som kan resultere i drukning av anlegget, og undersøke sannsynligheten for at disse inntreffer. Basert på data som blir funnet, blir det foreslått tiltak for å redusere både sannsynlighet og konsekvens av svikt. Analysen er kvalitativ, og tar i bruk feiltre og risikomatrise for å illustrere risikoen.

2.3.3 Feiltreanalyse

Feiltreanalyse (FTA) er brukt flere steder i oppgaven. Hensikten med feiltreanalyse er å illustrere sammenhengen mellom en uønsket hendelse i et system, og årsakene til hendelsen. Feiltreet kan tolkes både kvalitativt og kvantitativt, men grunnet manglende data blir det gjort kvalitativt.

3.0 Teori

Teorikapittelet har som hensikt å gi leseren en grunnleggende forståelse for vedlikeholdsterminologier, samt teknisk innsikt til å kunne forstå innholdet i rapporten.

3.1 Vedlikehold

Vedlikehold defineres i vedlikeholdsstandarden NS-EN 13306 som “en kombinasjon av alle tekniske, administrative og ledelsesrelaterte tiltak gjennom en enhets livssyklus som har som hensikt å opprettholde den i eller gjenopprette den til en tilstand der den kan oppfylle den krevde funksjonen” (Norsk standard, 2018, s. 7). Denne funksjonen pleier som regel å tilføre en bedrift verdi, i form av kvalitet, profitt, tid eller service. Det er derfor viktig for produksjonsselskap at vedlikeholdsfunksjonen fungerer optimalt, for å øke sin konkurransedyktighet. Maskiner i drift vil alltid være utsatt for slitasje, og dermed ha et behov for vedlikehold. Hvordan dette behovet har blitt oppfylt har endret seg gjennom tidene, og utviklet seg i takt med teknologien. Tidligere fokuserte industribedrifter på å reparere maskiner etter feil har oppstått, men nå er fokuset på å hindre feil fra å oppstå, slik at man har minst mulig nedetid av maskinen (Bye, 2009).

3.1.1 Typer vedlikehold

Korrektivt vedlikehold, også kalt reparasjoner, er vedlikehold som utføres med den hensikt å reparere eller erstatte komponenter etter svikt. Hovedsakelig deler man korrektivt vedlikehold inn i 2 deler. *Forutsett korrektivt vedlikehold* innebærer aktiviteter man gjennomfører for å utbedre svikt som en har tillatt å inntreffe. Eksempelvis ved inspeksjon av tilstanden til en maskin, kan man tillate å kjøre komponenter til svikt. Dette gjøres ofte for ikke-kritisk utstyr. *Uforutsett korrektivt vedlikehold* er aktiviteter som gjennomføres etter en uforutsett og akutt svikt som kan true sikkerhet eller funksjon. Denne kategorien vedlikehold er kanskje den mest uønskede, da den kan ha større økonomiske og sikkerhetsmessige konsekvenser enn om feilen er forutsett (Bye, 2009).

Forebyggende vedlikehold er arbeid som utføres for å vurdere og/eller minske degradering og redusere sannsynligheten for svikt i en enhet (Norsk standard, 2018). Denne formen for vedlikehold reduserer også behovet for korrigerende vedlikehold, samt at den har en stor betydning for sikkerheten til utstyr og anlegg. Man kan dele forebyggende vedlikehold i to

kategorier. *Tilstandsbasert forebyggende vedlikehold* er når man kontinuerlig eller periodisk overvåker tilstanden til en enhet gjennom målinger, funksjonstester, inspeksjon eller ved behov. Denne formen for vedlikehold blir gjerne brukt der skadeutviklingen er vanskelig å forutse basert på driftstid, eller der konsekvensen av havari er stor. Skulle kontrollen vise substansiell degradering, må det vurderes forebyggende aktiviteter, og skulle enheten ikke utføre krevd funksjon, vil man vurdere korrigerende aktiviteter på enheten.

Periodisk vedlikehold er en form for forebyggende vedlikehold som legger til grunn at det er mulig å forutsi skader basert på driftstiden til enheten. For å unngå skader, ønsker man å komme i forkant av problemet, slik at man overhaler komponenter eller skifter ut deler før beregnet levetid for utstyret er gått ut. Dette er ikke alltid tilstrekkelig, da eksempelvis kulelagre har en stor spredning i levetid, som fører til at man gjør endringer for tidlig eller for sent. Metoden var tidligere enerådende for forebyggende vedlikehold, men har i nyere tid mistet sin popularitet til tilstandsbasert vedlikehold (Bye, 2009).

3.1.2 Industri 4.0 og tilstandskontroll

Industri 4.0 er en betegnelse for den fjerde industrielle revolusjonen. Denne teknologiske revolusjonen, som de tidligere teknologiske revolusjoner, kjennetegnes ved rask endring av teknologi, industri og samfunnsmønstre. Denne gangen på grunn av økende digitalisering, automatisering og integrert kommunikasjonen mellom digitale systemer (Ravnå og Schjøberg, 2016). Teknologier som er sentrale i industri 4.0 inkluderer blant annet simulering, Internet of Things (IoT), «skyen» og stordata. For produksjonsbedrifter innebærer disse teknologiene store muligheter når det kommer til effektivisering og kostnadsreduksjon.

IoT er en viktig del av Industri 4.0, og omhandler gjenstander som er utstyrt med elektronikk, sensorer, nettverk, programvare og aktuatorer, slik at de kan kobles sammen og utveksle data (Gillis, 2022). Dette er veldig praktisk sett i vedlikeholdssammenheng. Ved bruk av sensorer koblet til internett, kan man kontinuerlig overvåke tilstanden til et anlegg, og ta beslutninger uten å være fysisk til stede. Denne typen vedlikehold kalles for tilstandskontroll.

Tilstandskontroll er en form for tilstandsbasert forebyggende vedlikehold, som legger vekt på at man skal utføre vedlikehold etter det reelle behovet. Vedlikeholdet kan benytte seg av flere metoder, blant annet temperaturovervåking, vibrasjonsovervåking og oljeanalyser. Ved å overvåke slike parametere der det er hensiktsmessig, vil en kunne oppdage skadeutvikling på et tidlig tidspunkt, noe som gjør at potensielt store utgifter ved kostbare vedlikeholdsprogram kan reduseres. Dette uten at det går ut over driftssikkerheten til anlegget. Ved suksessfull implementasjon vil metoden også kunne gi andre fordeler, som:

- Økt tilgjengelighet
- Økt sikkerhet for mennesker og miljø
- Mer effektiv drift
- Redusert behov for standby utstyr og reservedeler
- Reduserte drift- og vedlikeholdskostnader

Tilstandskontroll kan foregå fysisk, ved at en operatør tar med utstyr for å sjekke tilstanden til enheten, eller det kan foregå vha. IoT og sensorteknologi. Det forutsettes ved planlegging og gjennomføring av slikt arbeid at man har kvalifiserte arbeidere som behersker og forstår metodene som brukes, og som kan identifisere mulige feil (Bye, 2009).

Fjernstyrt vedlikehold er vedlikehold av en enhet uten at personell har direkte fysisk tilgang til enheten (Norsk standard, 2018). Man kan si at tilstandskontroll er en form for fjernstyrt vedlikehold. Moderne fjernstyrt vedlikehold fungerer slik at sensorer samler inn data og sender data videre til kyndig personell som bruker denne informasjonen til å utforme en vedlikeholdsplan.

3.1.3 Sensorteknologi

En sensor er en komponent som mottar stimuli og reagerer på stimulansen i form av et elektrisk utsignal, som f.eks. strøm eller spenning. Det finnes flere typer sensorer som kan motta forskjellige typer stimuli. Sensorer kan ta imot fysiske, kjemiske eller biologiske signaler, som deretter blir konvertert til elektriske signal og tolket gjennom andre elektriske komponenter. Typisk måler man trykk, temperatur, lengde eller bevegelse, og slik teknologi er en essensiell del av moderne tilstandsbasert vedlikehold.

En god sensor må ha følgende egenskaper:

1. Må være følsom for det fysiske fenomen som skal måles
2. Må være ufølsom for andre fysiske fenomen
3. Må ikke påvirke fenomenet som skal måles (Dincer m. fl., 2019)

Nivåmålere

Nivåmålere er en type sensor eller verktøy som registrerer nivået av medier i tanker eller kummer. Den enkleste og eldste industrielle nivåmåleren er skueglasset, som er en manuell tilnærming til måling av nivå. Figur 1 viser et skueglass montert på en tank.

Moderne nivåmålere bruker langt mer komplekse metoder for å måle nivået av væsker. En laseravstandsmåler sender ut lyspuls mot medieoverflaten som blir reflektert tilbake igjen mot en sensor. Basert på tiden lyset bruker fram og tilbake kan man kan man regne ut avstanden fra måleren til overflaten. Dette kalles for “time of flight” prinsippet (Seubert, 2017). For gode lengdemålinger er det derfor viktig med svært nøyaktig tidsmåling, ettersom man måler tilnærmet lysets hastighet.



*Figur 1 - Skueglass
(Binder GmbH, u.å.)*

Målekjede

Når man skal utføre målinger, er det viktig at målesignalet reflekterer virkeligheten av det som blir målt. Man må derfor ta hensyn til hele målekjeden. Målekjeden beskriver alt som skjer med et signal fra sensor mottar stimuli, til man kan lese av eller bruke signalet. Dette innebærer ledd som signalkonvertering og signalbehandling. Det er flere måter signaler blir behandlet på i industrien, blant annet blir signal filtrert, forsterket og digitalisert. Disse prosessene kan forstyrre signalet, slik at man får ikke reelle måleverdier. En annen måte signaler kan bli forstyrret, er ved falske ekko. Falske ekko er når en sensor mottar en feil verdi, grunnet refleksjon fra andre objekter (Massa, 2018). Hver komponent eller prosess i en målekjede utgjør en risiko for signalmodifikasjon, og ofte er systemer med mindre komponenter mer robuste av denne grunn (Pedersen, 2021).

Noen egenskaper som utgjør en god sensor, er nøyaktighet og presisjon. Nøyaktighet er hvorvidt en måling gir uttrykk for den sanne verdien av fenomenet man undersøker. En måling har stor nøyaktighet om man treffer nær den sanne verdien (Braut, 2019). Presisjon er et mål på repeterbarheten av målinger. Det vil si hvor nøyaktig et instrument gjengir samme

verdi ved gjentatte målinger, under like forhold og betingelser (Pedersen, 2021). Figur 2 illustrerer de to begrepene.

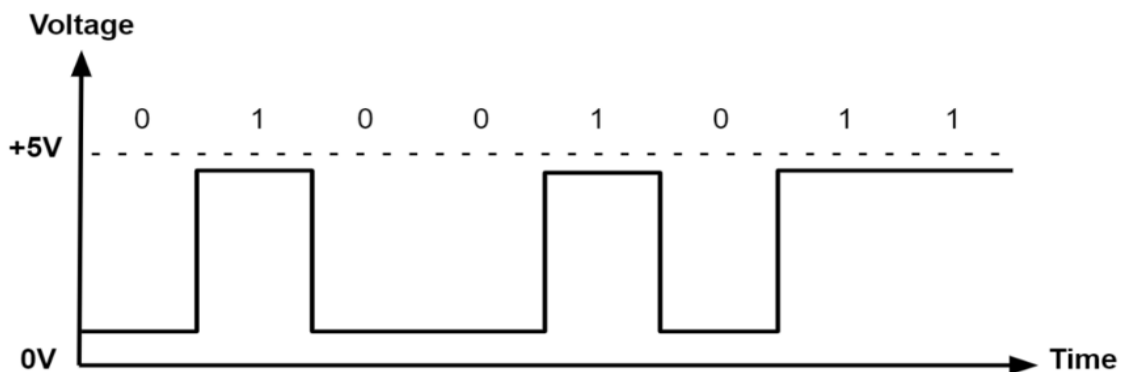


Figur 2 - Nøyaktighet og presisjon (Pedersen, 2021)

En måte å unngå feilmålinger, er ved å kalibrere sensoren. En kalibrering er en eller flere justeringer som utføres for å øke nøyaktigheten til en sensor. Hvordan kalibreringen av sensoren gjennomføres, er avhengig av måleprinsipp og produsent.

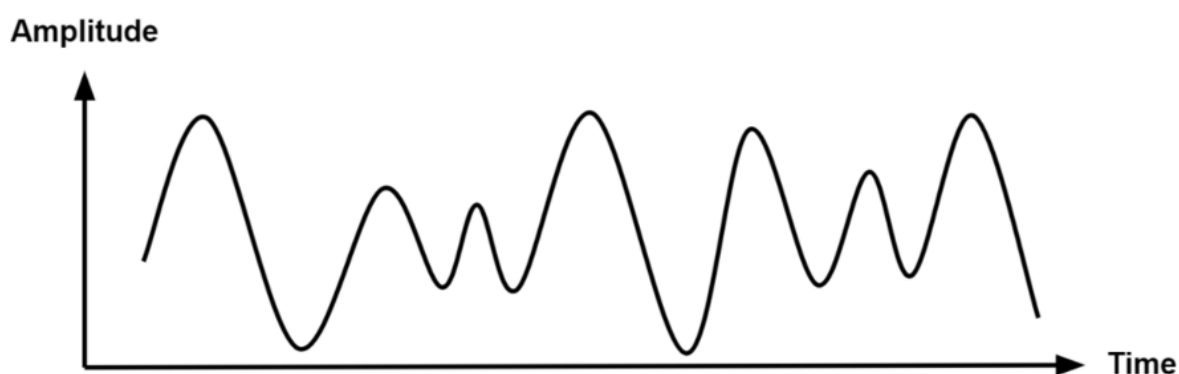
Analoge og digitale utgangssignal

Alle sensorer har en eller flere typer utgangssignal (outputs). En output sender den målte verdien til sensoren videre, og signalet er avhengig av outputtypen. Først skiller vi mellom to typer outputs: digitale og analoge. Sensorer med digital output signaliserer en binær logisk verdi. Med andre ord: 0 eller 1, ja eller nei, gyldig eller ugyldig. Et slikt signal egner seg godt til å detektere om en fastsatt grenseverdi er nådd, eller indikere tilstedeværelsen til et objekt (Andersen, 2020). «Ser» sensoren objektet? Er grenseverdien nådd? Da vil den logiske verdien endres fra en 0 til en 1 eller omvendt. Figur 3 viser et typisk digitalt outputsignal.



Figur 3 - Digitalt signal (Digital signal, u.å.)

En sensor med analog output er i stand til å gi et signal som er kontinuerlig parallelt med den målte verdien. Analoge signal kan altså registrere verdier uten intervaller, som kan gi et uendelig antall verdier innenfor det gitte området. Man kan derfor måle konstant svingende temperaturer eller oscillasjoner med god nøyaktighet (Tan og Jiang, 2019). Figur 4 viser et analogt outputsignal. Her kan man tydelig se hvordan en sensor måler verdier uten intervaller.

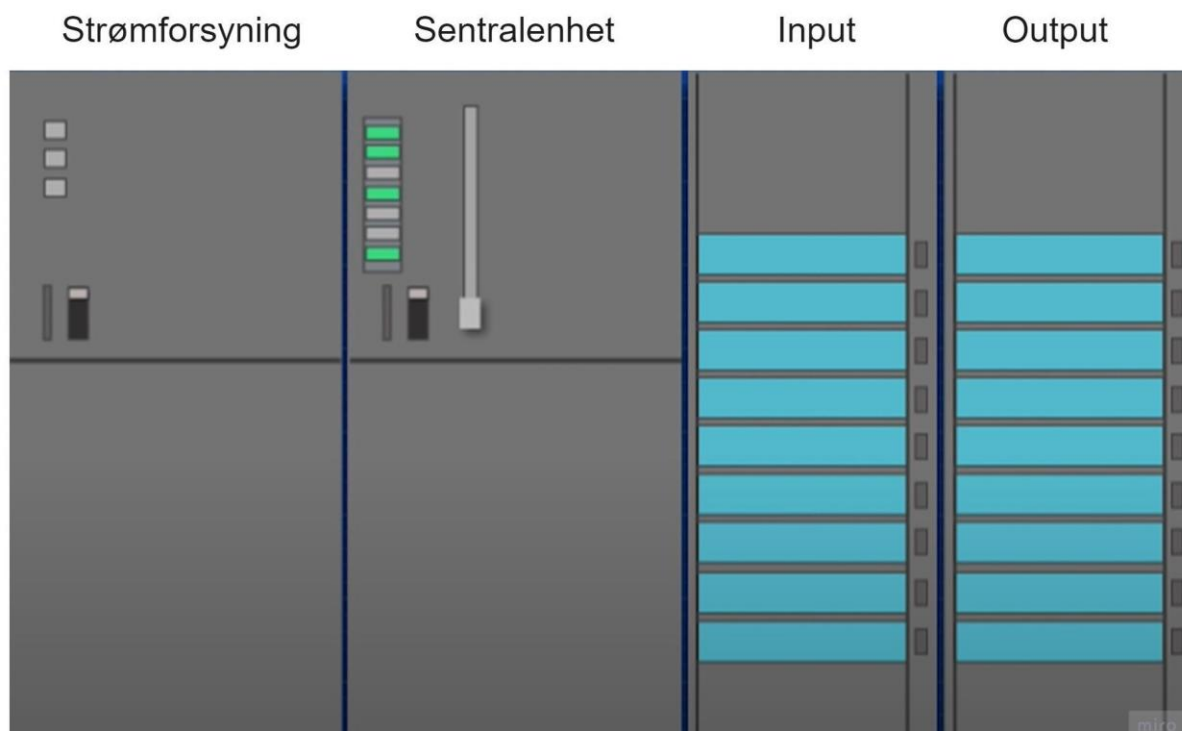


Figur 4 - Analogt signal (Analogue signal, u.å.)

En 4-20 mA (milliampere) utgang er en mye brukt analog output. Signalet er en elektrisk tilkobling gitt en konstant spenning. Denne kobles til en transmitter, som konverterer en målbar enhet til en likestrøm mellom 4 og 20 mA. Dette er en standard for industrielle sensorer og kommunikasjon, der 4 mA representerer 0% av det fysiske fenomenet som måles, og 20 mA er 100%. I en sensor ment for avstandsmåling vil eksempelvis 4 mA = 0 mm og 20 mA = 1000 mm. Signalet starter på 4 mA i stedet for 0 mA slik at man kan skille mellom et 0-signal og en funksjonsfeil. Får man et 0 mA signal vil det tilsvare funksjonsfeil (Paonessa og McDuffee, 2014).

3.1.4 Programmerbar Logisk Styring

En programmerbar logisk styring (PLS) er en enhet man kan bruke til å styre elektriske og automatiske systemer. PLS bygger videre på bruk av releér til styring av elektriske systemer, ved at man kan programmere enheten til å utføre funksjonene vi ønsker, fremfor å koble om releér, som var vanlig før introduksjonen av PLS (Vijzelaar og Lynglund, 2020).

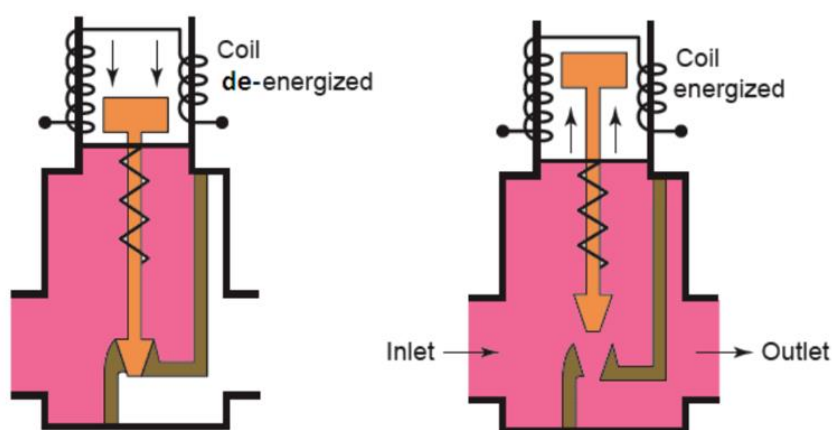


Figur 5 - Oversiktsbilde PLS

Hvor kompleks en PLS er, avhenger av funksjonene den skal utføre. Figur 5 viser et oversiktsbilde av hvordan en PLS typisk ser ut. De ulike skapene er delt inn i fire moduler: strømforsyning, sentralenhet, inngangssignal (input) og output. Strømforsyningen sørger for at PLS-enheten og utstyr koblet til enheten har strøm. Sentralenheten fungerer som datamaskinen i en PLS. Det er i denne modulen programkoden ligger, som bestemmer hva som skal utføres, på bakgrunn av signaler fra eksempelvis sensorer. En slik sentralenhet består av mange komponenter, slik som prosessor, harddisk for lagring av data osv. I input-modulen av PLS-enheten vil ulike sensorer og brytere kobles opp. Input-modulen har som hovedoppgave å motta og tolke signaler, og omgjøre disse til en lesbar verdi for prosessoren. En PLS kan motta flere typer analoge og digitale signaler, hvor 4-20 mA er en av disse (Vijzelaar og Lynglund, 2020). Output-modulen gir signaler til enheter vi ønsker å kontrollere, eksempelvis signal om start/stop, regulere gjennomstrømning o.l. Slike enheter kan eksempelvis være motorer, pumper, magnetventiler og lys.

Magnetventiler

En ventil er en mekanisk innretning som brukes til å starte, stoppe, blande eller regulere væsker eller gass. Det finnes flere typer ventiler, hvor en av disse er magnetventil. En magnetventil er en mekanisk ventil som kan åpnes eller lukkes ved å sende elektrisk strøm gjennom en spole. Dette inducerer et magnetfelt, som trekker ventilstammen opp eller ned. Figur 6 viser prinsippet, hvor ventilen til venstre ikke har en strømførende spole, og dermed stenger for gjennomstrømning. Dersom en elektrisk strøm påføres spolen, vil denne grunnet magnetfeltet løfte den oransje ventilstammen, og væske kan strømme gjennom ventilen. Disse magnetventilene kan altså styres ved å sende strøm gjennom dem, eksempelvis initiert av et 4-20 mA signal fra en sensor (Nesse, 2018).



Figur 6 - Magnetventil (Solenoid Valve Working Principle, u.å.)

Ventiler som dette finnes i flere varianter, med ulike normalposisjoner og antall porter. Ventilen i Figur 6 er en normalt stengt (NC) ventil, som vil si at dersom ventilen ikke har en strømførende spole, vil det ikke være gjennomstrømning av gass eller væske. Motsatt vil en normalt åpen (NO) ventil ha gjennomstrømning dersom spolen ikke er strømførende (Pedersen, 2021).

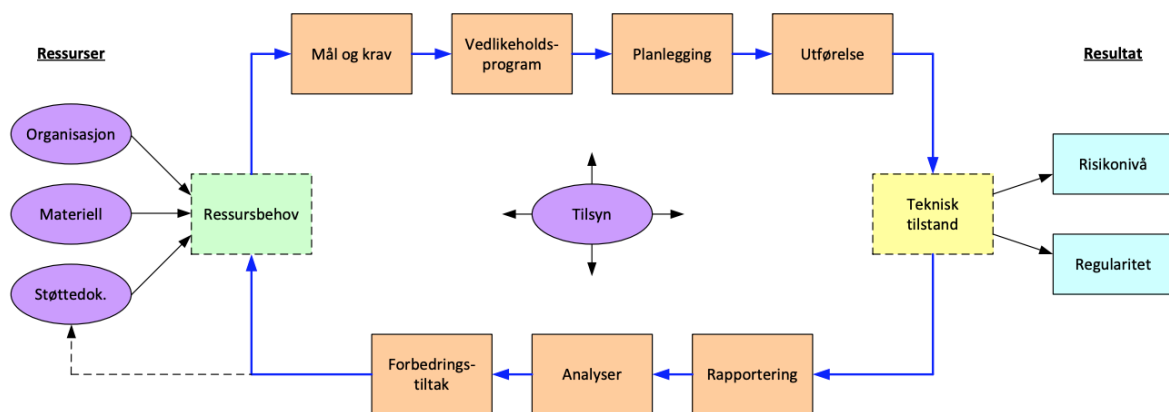
3.1.5 Vedlikeholdsledning og driftssikkerhet

Målstyring er en kontinuerlig forbedringsprosess med mål om å kontrollere, og ved behov korrigerende tiltak som iverksettes for måloppnåelse. Bedrifter bruker ofte måltall, som er verdier som skal vise om mål er oppnådd eller ikke. Disse måltallene, kalt Key Performance Indicators (KPI), kan eksempelvis være tilgjengelighet, nedetid eller Overall Equipment Efficiency (OEE). For optimal målstyring trenger man periodisk eller kontinuerlig datainnsamling, slik at man kan sammenligne de reelle mot de oppsatte måltallene. Finner

man at faktiske måltall avviker sterkt fra oppsatte måltall, bør man se nærmere på rutiner og metoder som påvirker disse.

For å kunne beholde konkurransedyktighet i produksjonssektoren er det viktig med god vedlikeholdsledelse. Dette inkluderer alle aktiviteter som bestemmer kravene, målene, strategiene og ansvarsområdene knyttet til implementering av vedlikehold. Et godt verktøy for å kunne oppnå optimal vedlikeholdsledelse er ved bruk av vedlikeholdssløyfen.

Vedlikeholdssløyfen er en modell som viser de ulike delene som utgjør en vedlikeholdsfunksjon hos en bedrift. Figur 7 er en illustrasjon av sløyfen og dens 15 elementer.



Figur 7 - Vedlikeholdssløyfen (Øien et. al., 2018)

Ressursene man administrerer i form av vedlikeholdsorganisasjon, materiell og støttedokumentasjon påvirker den tekniske tilstanden man kan oppnå. Uten tilstrekkelig ressurser vil man ikke kunne nå ønsket tilstand på utstyr og anlegg. Dette vil også ha en effekt på risikonivå, regularitet og kostnader.

Styringen av vedlikehold skjer ved å etablere mål og krav. Her er det viktig med god målstyring og egnede måltall. Videre må man dokumentere både planlagte og utførte tiltak vha. et vedlikeholdsprogram. Optimale vedlikeholdsprogram krever gode arbeidsprosesser, som beskriver hvordan jobben skal utføres i en normalsituasjon. For kontinuerlig forbedring av vedlikeholdsprogrammet brukes ofte Reliability Centered Maintenance - metodikk (RCM).

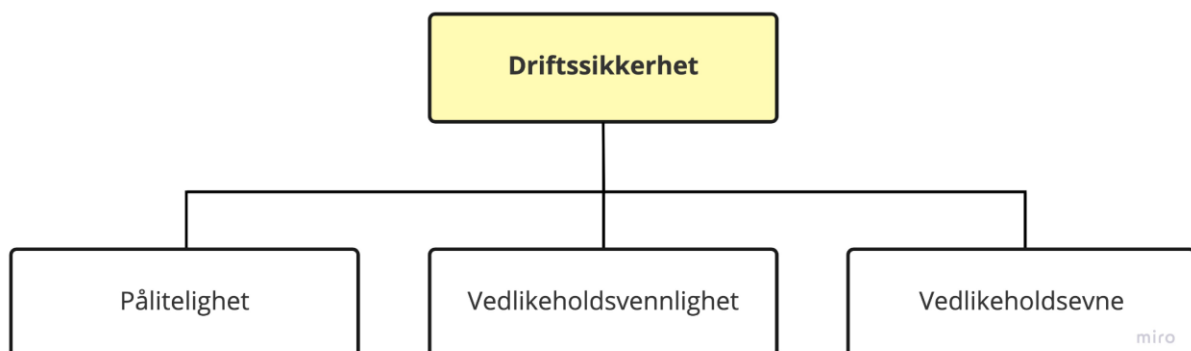
Det er også viktig at vedlikeholdet planlegges i samarbeid med driftsavdelingen, og at det utføres som planlagt. For å kunne forbedre vedlikeholdet ytterligere, er det viktig at det etableres rutiner for rapportering av vedlikeholdsarbeid, slik at man har historikk. Skulle ikke vedlikeholdsfunksjonen nå sine målsetninger, i form av eksempelvis måltall, må det gjennomføres årsaksanalyser, og forbedringstiltak må iverksettes. For at sløyfen skal fungere, er det viktig at alle deler fungerer som de skal, derfor er det også viktig at man har jevnlig tilsyn (Bye, 2009).

Computerized Maintenance Management System - CMMS

Et datastyrt vedlikeholdsstyringsystem, eller CMMS, er en programvare som samler vedlikeholdsinformasjon og forenkler prosessene for vedlikeholdsoperasjoner. Programvaren hjelper med å optimalisere bruken og tilgjengeligheten av fysisk utstyr, og fungerer som en database for all vedlikeholdsinformasjon. CMMS-systemer inneholder ofte følgende funksjoner: verktøy for ressurs- og arbeidsledelse, utstysregister, arbeidsordrehåndtering, material- og lagerstyring. I tillegg kan de inneholde verktøy for rapportering, analyse, revisjon og forebyggende vedlikehold. Et velfungerende CMMS-system bør inneholde hvert eneste vedlikeholdsoppdrag utført på en enhet, slik at det er tilgjengelig for analyse på et senere tidspunkt. Lykkes man i å implementere programvaren, kan arbeidere jobbe mer effektivt og med bedre arbeidsflyt (Cato, 2002).

Driftssikkerhet

Driftssikkerhet er den evne en enhet har til å være i den tilstand at den kan utføre en krevd funksjon over en gitt periode. Det er i hovedsak tre faktorer som påvirker driftssikkerheten til en enhet eller et anlegg. Figur 8 illustrerer faktorene.



Figur 8 - Driftssikkerhet

Pålitelighet handler om hvorvidt en enhet eller system har evnen til å utføre tiltenkt funksjon over en gitt tidsperiode, under gitte drifts- og miljøforhold. Man kan måle pålitelighet på flere måter, men typiske parametere er forventet levetid, sviktintensitet, funksjonssannsynlighet eller tilgjengelighet.

Vedlikeholdsvennligheten til en enhet er et mål på hvor enkelt en enhet kan vedlikeholdes. Når man undersøker vedlikeholdsvennligheten, ser man på operasjoner som reparasjon, feilsøking og funksjonstesting. Disse blir påvirket av hvor lett det er å finne og reparere feil, samt tilgang til teknisk dokumentasjon. Man måler som regel vedlikeholdsvennlighet ved å regne ut middeltid til utført reparasjon – Mean Time To Repair (MTTR).

Vedlikeholdsevne er en parameter som måler tiden det tar å mobilisere riktige ressurser for å utføre aktivt vedlikehold. Dette avhenger av blant annet kompetanse, vedlikeholdsstrategi og hvor godt vedlikeholdsfunksjonen virker. Typisk måler man vedlikeholdsevne ved å måle tiden fra svikt til vedlikeholdet påbegynnes – Mean Waiting Time (MWT) (Bye, 2009).

3.1.6 Vedlikeholdsbegrep

MTBM

Mean Time Between Maintenance (MTBM) indikerer gjennomsnittlig oppetid mellom hver vedlikeholdsoperasjon, og gjelder både korrektivt og forebyggende vedlikehold. Dette er en av flere parametere som regner ut oppetiden mellom vedlikehold. Andre, lignende begreper er Mean Time to Failure (MTTF) og Mean Time Between Failure (MTBF). Disse begrepene er veldig like MTBM, men differensierer seg med hvilke typer vedlikehold man inkluderer. Som nevnt inkluderer MTBM både forebyggende og korrektivt vedlikehold, mens MTTF og MTBF kun inkluderer korrektivt vedlikehold. Dette resulterer i et større driftsintervall, sammenlignet med MTBM. Formelen for MTBM er vist i Formel 1, hvor n er antall vedlikeholdsoperasjoner og T_i er total driftstid.

$$MTBM = \frac{1}{n} \sum T_i \quad (1)$$

MDT

Mean Down Time (MDT) kalkulerer gjennomsnittlig nedetid når man utfører vedlikehold på et system eller en maskin. Nedetiden inkluderer faktisk reparasjonstid for både korrektiv og forebyggende vedlikeholdsoperasjoner, i tillegg til diverse ventetid knyttet til for eksempel å isolere systemet eller finne reservedeler. Dette vil altså si MTTR og MWT. Kort sagt indikerer MDT hvor lang tid vedlikeholdsoperasjoner tar fra start til slutt. Formelen er vist i Formel 2, hvor n er antall vedlikeholdsoperasjoner og D_i er nedetiden.

$$MDT = \frac{1}{n} \sum D_i \quad (2)$$

Tilgjengelighet

Tilgjengelighet er “enhetens evne til å være i en tilstand til å utføre oppgaven under gitte forhold som det kreves og slik det kreves, forutsatt at de nødvendige eksterne ressursene er stilt til rådighet” (Norsk standard, 2018). Med andre ord er tilgjengeligheten et mål på hvor god maskinen er til å utføre sin funksjon. Tilgjengelighet er ofte knyttet opp mot tiden maskinen kjøres, og dette kaller man for tidsbasert tilgjengelighet. Man regner prosentandelen av tiden en enhet har evne til å utføre funksjonen sin i en gitt tidsperiode. Har man en tidsbasert tilgjengelighet på 100%, fungerer maskinen optimalt uten noe form for nedetid. I denne oppgaven bruker vi formelen for virkelig operasjonell tilgjengelighet, $A_{op.virk.}$, som er tilgjengeligheten som bruker/kunde opplever. Virkelig operasjonell tilgjengelighet tar for seg alle former for nedetid, inkludert logistikk- og administrativ nedetid. Formelen for $A_{op.virk.}$ er gitt slik:

$$A_{op.virk.} = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} \quad (3)$$

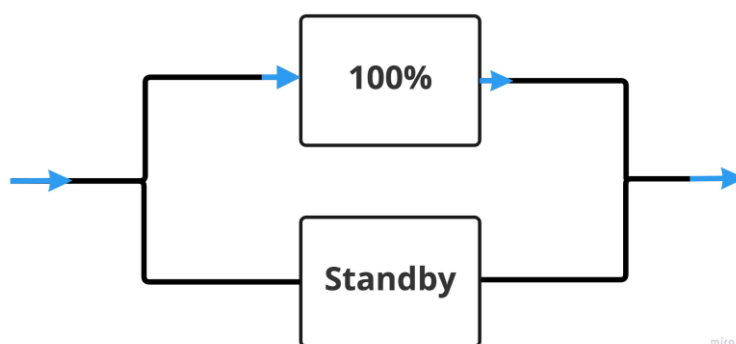
Pålitelighet

Tilgjengeligheten til en enhet avhenger av blant annet pålitelighet. Pålitelighet handler om hvorvidt en enhet eller system har evnen til å utføre tiltenkt funksjon over en gitt tidsperiode, under gitte drifts- og miljøforhold. Påliteligheten til maskiner i redundans beregnes ved bruk av formel 4:

$$\phi(x) = 1 - (1 - x_1)(1 - x_2) \dots (1 - x_n) = 1 - \sum_{i=1}^n (1 - x_i) \quad (4)$$

Redundans

Redundans beskriver en duplisering av kritiske deler eller funksjoner til et system, for å øke pålitelighet og systemytelse. Det finnes hovedsakelig to former for redundans, passiv og aktiv. Den mest brukte er passiv redundans, og kjennetegnes ved at man har en alternativ metode for å oppfylle krevd funksjon, som bare tas i bruk når den aktive metoden er utilgjengelig. Eksempelvis om en pumpe stopper, vil en annen pumpe være klar til å ta dens plass. Man kaller ofte reservepumpen for standbyenheten. Passiv redundans brukes ofte for mindre kritiske systemer, slik at om både hovedenheten og standbyenheten skulle svikte, ville det ikke resultert i totalt systemhavari.



Figur 9 - Passiv redundans

Aktiv redundans er når man bruker flere enheter samtidig for å oppfylle krevd funksjon. Dette betyr i praksis at man fordeler belastningen på flere enheter samtidig, slik at belastningen per enhet reduseres. Hver enhet må imidlertid kunne levere 100% av krevd funksjon. Dette beskytter både systemet og de individuelle elementene for svikt. Et eksempel på dette kan være fire parallelle pumper, som alle pumper med 25% av full kapasitet for å nå et mål om 100% pumpeeffekt. Redundans gjør det også enklere å reparere eller erstatte deler, med minimal nedetid (Bye, 2009).



Figur 10 - Aktiv redundans

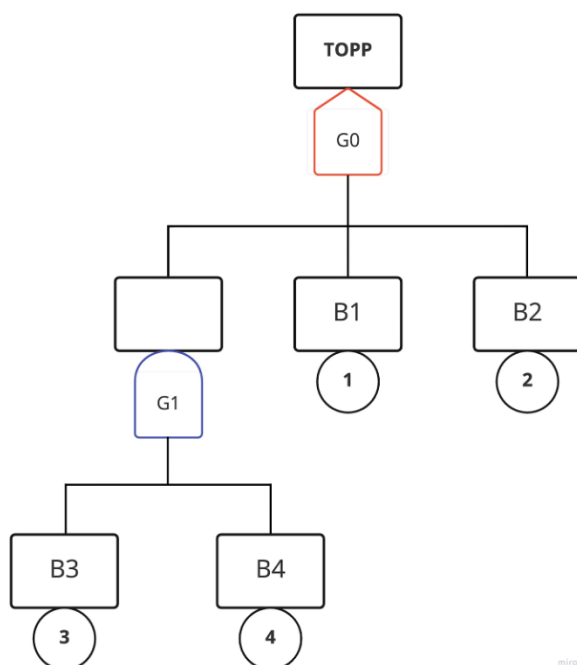
3.2 Metoder

Ståstedsanalyse

En ståstedsanalyse er en strukturert metode for å bestemme tilstanden til for eksempel et produksjonssystem eller en organisasjon. Gjennom analysen skal det fremkomme en objektiv oversikt over analyseobjektet, og denne er ment for å sikre en felles virkelighetsoppfatning for brukerne. Når man utfører en ståstedsanalyse er det viktig å ha klare fokusområder og begrensninger, da analysene ofte kan bli veldig omfattende. Analysen er avhengig av en strukturert metodikk for å samle og analysere data. For et produksjonssystem er det hensiktsmessig å undersøke vedlikeholdsstyringen, teknisk informasjon og HMS-praksis (Pedersen, 2021).

Feiltre

Feiltre er logiske diagram som illustrerer sammenhengen mellom en uønsket hendelse i et system, samt årsakene til hendelsen. Figur 11 viser et eksempel på et feiltre.



Figur 11 - Eksempel feiltre

Symbol	Betydning
	Utgangshendelsen inntreffer hvis minst én av inngangshendelsene inntreffer.
	Utgangshendelsen inntreffer hvis samtlige inngangshendelser inntreffer
	Symbol for komponent i primær feiltilstand

Tabell 4 - Symboler feiltre

Figuren er bestående av symboler som viser tilstandene til komponentene i systemet, og sammenhengen mellom disse tilstandene. Symbolene på figuren kalles for logiske porter, og viser hvordan tilstandene er knyttet sammen. Mest brukt av de logiske portene er «og» og «eller» portene, illustrert i Tabell 4.

En slik analyse kan også brukes til optimalisering av påliteligheten til et system, eller for verifikasjon av akseptabel pålitelighet. Man vil vha. en feiltreanalyse få en liste over mulige kombinasjoner av feil som fører til at en hendelse inntreffer. Dette kan være topphendelsen, eller andre uønskede hendelser i treet. Man får også en liste over betydningsfulle hendelser og komponenter, samt sannsynlighet for uønskede hendelser om man velger å utarbeide dette også.

I feiltreanalyser bruker man ofte begrepene kutt- og stimengder. En kuttmengde er en mengde inngangshendelser som ved å inntreffe sikrer at topphendelsen inntreffer. Man kan si det er minimal kuttmengde dersom den ikke kan reduseres uten å miste status som kuttmengde. En stimengde er en mengde inngangshendelser som ved ikke å inntreffe sikrer at topphendelsen

inntreffer. Den er minimal om den ikke kan reduseres uten å miste status som stimengde (Bye, 2009).

For å finne minimale kutt- og stimengder, brukes MOCUS-metoden. Før man starter, må alle porter og inngangshendelser nummereres. En starter fra toppen av treet, og skriver ned alle hendelsene som fører til topphendelsen. Hvis porten under topphendelsen er en ELLER-port, skrives hver inngang til den aktuelle porten under hverandre. Ved en OG-port skrives hver inngang etter hverandre. Deretter fortsetter man nedover feiltreet ved å trinnvis erstatte hver port med dens innganger, helt til det kun står igjen inngangshendelser. Brukes Figur 11 som eksempel, finner man minimal kuttmengde slik:

<u>G0 "ELLER" -port</u>	<u>G1 "OG"-port</u>
G1	3, 4
1	1
2	2

Minimal kuttmengde blir da:

$$K_1 = \{1\}, \quad K_2 = \{2\}, \quad K_3 = \{3,4\}$$

Risikovurdering

En risikovurdering er et begrep innenfor risikostyring som innebærer identifikasjon, analyse og evaluering av risiko. Det første steget, identifikasjon, går ut på å liste opp alle mulige hendelser som kan føre til negative konsekvenser for verdiene som skal beskyttes. Man ser også gjerne på mulige risikokilder og områder som berøres. I analyse-steget skal det utvikles en forståelse for risikoene ved å fastslå mulige konsekvenser og tilhørende sannsynlighet. Ofte vil en slik analyse omfatte en vurdering av årsakene og kildene til hendelsene, mulige konsekvenser og sannsynlighet for at hendelsen inntreffer. I det tredje steget evalueres risikoen. Dette går ut på å sammenligne risikonivået som er avdekket i analysen, med kriterier for hva som er akseptabel risiko. Finner man uakseptabel risiko, bør man foreslå håndtering av risikoen (Norsk standard, 2021).

En risikomatrix er et diagram som brukes for å beskrive risiko. Diagrammet illustrerer risikoen i to dimensjoner, konsekvens og sannsynlighet. Figur 12 viser hvordan slike matriser typisk ser ut.

		Risikomatrix		
Sanns.	Høy			
	Moderat			
	Lav			
		Lav	Moderat	Høy
		Konsekvens		

Figur 12 - Eksempel risikomatrixe

Farge	Betydning
	Indikerer uakseptabel risiko og tiltak må iverksettes
	Indikerer behov for innføring av risikoreducerende tiltak
	Indikerer akseptabel risiko. Tiltak kan vurderes

Tabell 5 - Fargenivåer risikomatrixe

Risikoen blir større jo lenger opp og til høyre hendelsen er plassert. Matrisen har tre farger som formidler risikonivået. Betydningen av de forskjellige fargene er vist i Tabell 5.

3.3 Økonomiske begrep

Nåverdimetoden

Ved bruk av nåverdimetoden kan man regne om alle fremtidige beløp til dagens pengeverdi. Metoden går ut på at man forskutterer at man mottar penger i fremtiden, men reduserer verdien av disse pengene med en rente (Berg, 2021). På generell form uttrykkes nåverdi (NNV) slik:

$$NNV = \sum_{t=1}^n \frac{x_n}{(1+r)^t} - I_0 \quad (5)$$

der

Symbol	Beskrivelse
I_0	$I_0 =$ investeringsbeløp på tidspunkt 0, det vil si “i dag”
t	antall perioder
x_n	kontantstrøm i periode n
r	avkastningskrav

Tabell 6 - Symbolbeskrivelse nåverdi

Internrente

Internrentemetoden er nært beslektet med nåverdimetoden. Internrenten sier noe om relativ avkastning og innebærer at man finner den diskonteringsrente som gjør at summen av fremtidige kontantstrømmer blir lik 0 (Berg, 2021). På generell form kan det uttrykkes som:

$$\sum_{t=1}^n \frac{x_t}{(1+r)^t} - I_0 = 0 \quad (6)$$

3.4 HMS

HMS står for helse, miljø og sikkerhet, og handler om de praktiske aspektene ved å beskytte miljøet og opprettholde sikkerhet i yrkessituasjoner.

Selv om vannkraftverk er en bærekraftig måte å utvinne energi på, vil det også være utfordringer knyttet til nærliggende miljø. En viktig miljøeffekt er at de kan påvirke det biologiske mangfoldet. Dette skjer grunnet forandringer i ferskvannshabitat, eller at vannkvaliteten forringes. I kraftverkene brukes det olje i forskjellige maskiner, som for eksempel turbinlagre og oljetrykksanlegg. Ved drukning av vannkraftverk som medfører oljelekkasje, må alt vann i kraftverket pumpes ut til tankbiler og deretter renses, ettersom det ikke kan sendes til avløp.

Sikker jobbanalyse (SJA) er en måte å systematisk gjennomgå stegene i en arbeidsoppgave, med hensikt å redusere risikoen for ulykker. Man deler først hovedoppgaven inn i mindre deloppgaver, og gjennomgår risikoen knyttet til disse. Oppdager man betydelig risiko, bør tiltak innføres for å redusere eller fjerne risikoen (Norsk olje og gass, 2017).

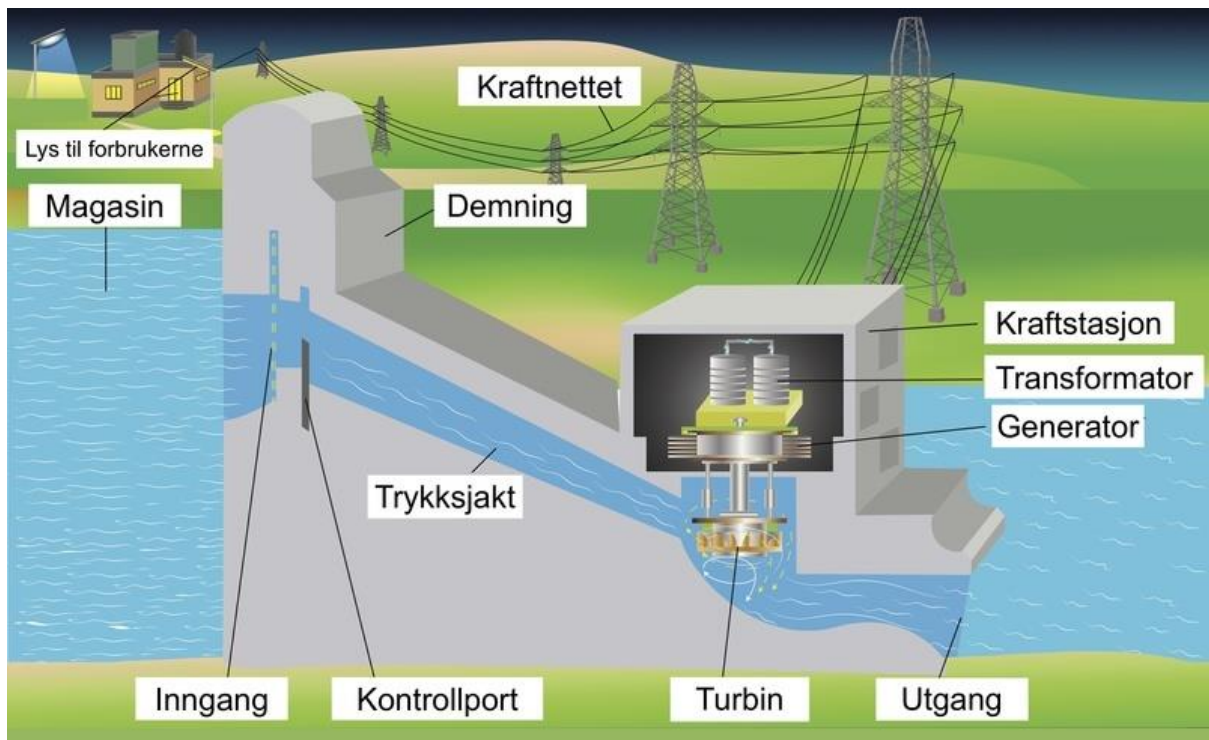
Vedlikeholdsarbeid i lenseanlegg innebærer ofte arbeid i høyden eller arbeid i kum. Arbeid i høyden er en av de vanligste årsakene til alvorlige skader og dødsfall på arbeidsplasser, og man bør minimere arbeidstiden i høyden så mye som mulig (Arbeidstilsynet, u.å.). Arbeid i kum innebærer også en viss risiko, ettersom tilkomst ved en ulykke er vanskelig.

4.0 Generell systembeskrivelse

Vannkraftverk utnytter den kinetiske energien vann får som følge av høydeforskjell, og omdanner kinetisk energi til elektrisitet. Dette kapitlet inneholder en overordnet systembeskrivelse for et vannkraftverk, samt en mer detaljert beskrivelse av hvordan et lenseanlegg i slike kraftverk fungerer.

4.1 Overordnet forklaring av vannkraftverk

Figur 13 viser en forenklet oversikt over hovedkomponentene i et vannkraftverk. Kommende kapitler tar i grove trekk for seg virkemåten til et vannkraftverk, fordelt på magasin og innløp, kraftstasjon, og utløp.



Figur 13 - Oversikt vannkraftverk (Mjønerud, 2019)

4.1.1 Magasin og innløp

Det finnes tre hovedtyper vannkraftverk: magasinkraftverk, elvekraftverk, og pumpekraftverk.

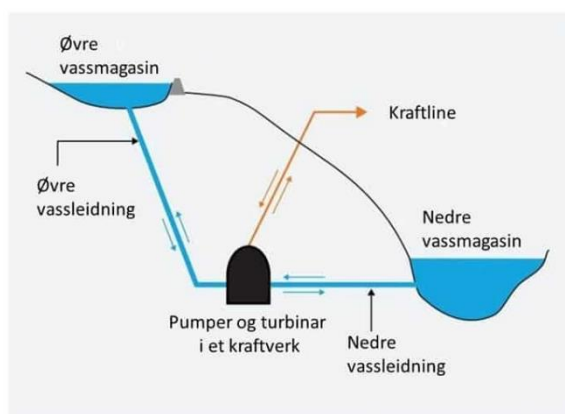
Et magasinkraftverk fungerer ved at vannet blir demmet opp i et magasin et stykke unna kraftverket, hvor høydeforskjellen mellom disse to er av vesentlig karakter. Det er ikke uvanlig med fallhøyde på opptil flere hundre meter. Fra demningen blir vannet ledet inn i en trykksjakt, som er en tilløpstunnel til kraftstasjonen. Disse tunnelene er vanligvis flere kilometer lange, og opptil flere meter i diameter. I tunnelene blir vannets potensielle energi, grunnet høyden til demningen, omgjort til kinetisk energi, da vannet beveger seg nedover tunnelen. Et eksempel på slike tilløpsrør er vist i Figur 14.



Figur 14 - Tilløpsrør
(Gustafsson, u.å.)

Et elvekraftverk brukes der vannmengden i elva er stor, slik at vannet allerede har denne kinetiske energien, og dermed kan ledes inn i kraftverket fra elva. Et slikt anlegg krever liten fallhøyde.

Den siste typen vannkraftverk pumper vannet fra et nivå til et annet. Her produseres strøm når det er gunstig, og vannet pumpes opp til et annet nivå når det er overskudd av strøm. Figur 15 viser et eksempel på dette (Pedersen, 2021).



Figur 15 - Pumpekraftverk (DOE, 2016)

4.1.2 Kraftstasjon

I kraftstasjonen blir vannets mekaniske energi omformet til elektrisk energi. Kraftstasjonen består i hovedsak av en eller flere turbiner, generatorer (sammen omtalt som aggregat), og transformatorer. Størrelsen på aggregatene avhenger av størrelse på kraftverk og behov, og kan variere fra kilowatt til megawatt. Samlet produksjon vil i mange tilfeller ende opp i flere hundre gigawattimer.

Kraftstasjonen virker ved at vannet fra innløpstunnelen driver en eller flere turbiner. Hvilken turbintype som brukes avhenger av flere faktorer, blant annet fallhøyde, vannmengde, og trykk. De to hovedtypene turbiner er impulsturbin og reaksjonsturbin.

For å omdanne energien videre fra rotasjonsenergi til elektrisk energi, brukes en generator. Denne generatoren består av en stator og rotor, hvor rotoren er festet på samme aksel som turbinen. Når denne akselen roterer, vil det skapes elektrisk spenning mellom stator og rotor, som kan lagres som elektrisk energi. Elektrisiteten vil deretter bli ført videre til en transformator, som transformerer spenningen til et høyere nivå, slik at det kan distribueres til husholdninger og andre brukere (Pedersen, 2021).

4.1.3 Utløp

Fra turbinen vil det være en utløpstunnel, som fører vannet tilbake i vassdraget.

Utløpstunnelen består i likhet med innløpstunnelen av rør med stor diameter, slik at vannet effektivt kan transporteres vekk fra kraftverket. I tilkobling til utløpet vil det også være et lenseanlegg, som har til hensikt å forhindre oversvømmelse i kraftstasjonen.

4.2 Beskrivelse av lenseanlegg

Et vannkraftverk er som oftest plassert lavere enn elva eller magasinet hvor vannet kommer fra. Kraftstasjonen er altså dykket. Et lenseanlegg har som formål å holde kraftstasjonen tørr, og er derfor nødvendig i slike vannkraftverk. Lenseanlegget skal ta unna lekkasjevann fra eksempelvis fjell, turbin og/eller vannvei. Dette anlegget må fungere uavhengig av uforutsette hendelser som strømbrudd, akutt svikt i aggregat etc., og består derfor av flere ulike instanser som kan ta unna vannet (Daleng, 1994).

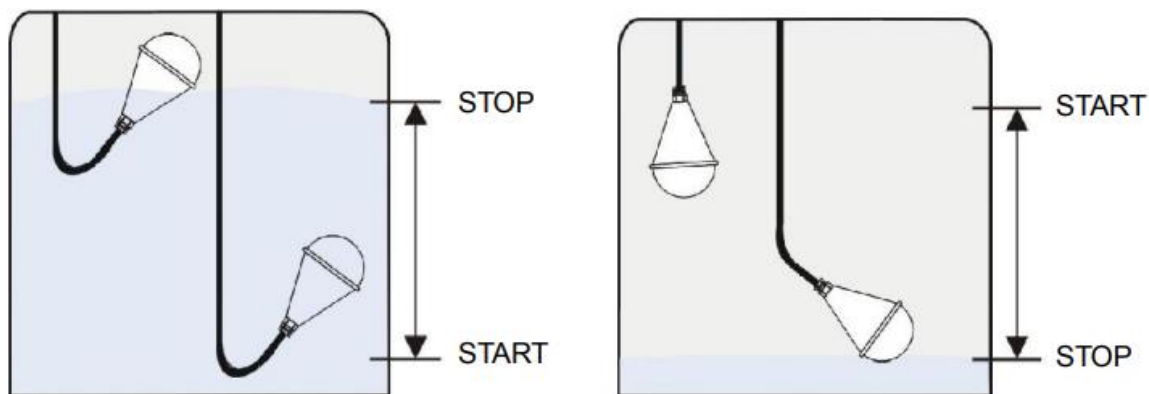
Et lenseanlegg består i hovedsak av en lensekum, to lensepumper, og en ejektor. I lensekummen samles lekkasjevannet fra turbinen, lekkasjer fra fjellet osv. Lensekummen befinner seg som regel under turbinen, og varierer i størrelse, avhengig av størrelsen på kraftstasjonen. I lensekummen vil det være en form for nivåovervåkning, som ved et gitt nivå vil signalisere at kummen må tømmes.

4.2.1 Lensepumper

Det er vanlig med minimum to lensepumper i slike anlegg. Disse er dykket i lensekummen, og kjøres vekselvis med gitte intervaller. Begge pumpene er i stand til å levere 100% av krevd mengde, som vil si at pumpene har redundans. Ettersom de kjøres vekselvis og ikke samtidig, kjøres pumpene med passiv redundans. Intervallet på hvor ofte kjøring av pumpene veksles, avhenger av operatøren. Pumpene blir slått på ved signal fra nivåovervåkingen, og dersom nivået blir høyt nok, vil begge bli aktivert. Lensepumpene transporterer vannet vekk fra lensekummen, som oftest til avløpet til turbinen.

4.2.2 Nivåovervåkning

Nivåovervåkningssystemet er det som gir start- og stoppsignal til lensepumpene, og signal til aktuatoren om å åpne ventilen til ejektor. Oppsett og overvåkningsmetode kan variere mellom anlegg, men det har i lang tid vært utbredt å benytte seg av ulike flottører og flottørbrytere til denne prosessen. Flottørbrytere kan fungere på to måter; stopp ved fylling, eller start ved fylling. Førstkommende betyr at flottørbryterne gir signal dersom lensekummen er under nivået flottørbryteren har blitt hengt på. Dersom nivået stiger over dette nivået, vil enheten begynne å flyte, og dette vil medføre at signalet brytes. Flottørbrytere som er koblet opp til start ved fylling fungerer på motsatt måte, altså at det ikke sendes ut signal før enheten begynner å flyte i vannet. Figur 16 viser figurer av henholdsvis stopp og start ved fylling.

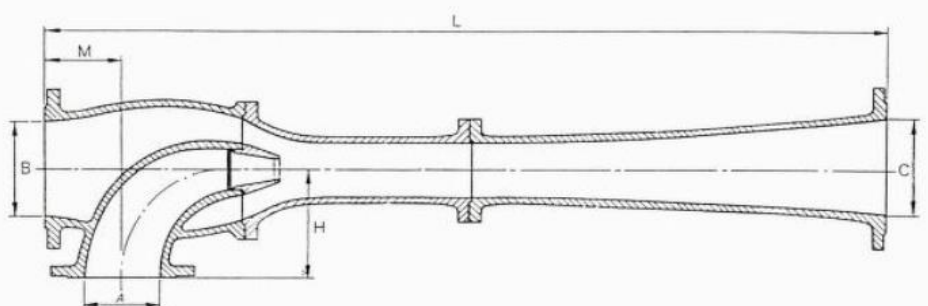


Figur 16 - Flottørbrytere (Disibeint Electronic, u.å.)

Nivåovervåkning i lenseanlegg kan også benytte seg av enkle flottører, som kan være festet til ulike ventiler. Dersom nivået blir høyt nok vil disse i likhet med flottørbryterne flyte, og utløse en handling, eksempelvis åpne en ventil. Åpning av ventil til ejektor er en handling hvor man benytter seg av tradisjonelle flottører, ettersom metoden ikke benytter seg av strøm.

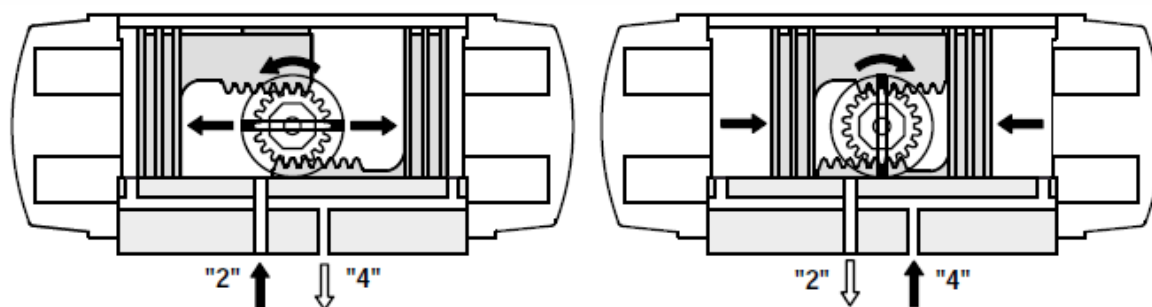
4.2.3 Ejektor

Ejektoren fungerer som siste instans i lensekummen, og er ikke avhengig av strøm for å fungere. Ejektoren blir brukt dersom nivået i lensekummen blir kritisk høyt, som kan skje ved eksempelvis totalt bortfall av strøm, eller dersom begge pumpene svikter. Figur 17 viser en skisse av en slik ejektor. Ejektorens funksjonsprinsipp er at når drivvannet akselereres i dysen, skapes et undertrykk på sugesiden, som trekker vannet i lensekummen med seg ut på avløpssiden. Drivvannet til ejektoren tas som regel direkte fra trykksjakten, som er den siste rørdelen før turbinen. Røropplegget til ejektor er vanligvis felles med lensepumpene (Daleng, 1994).



Figur 17 - Ejektor (Daleng, 1994)

For at vannet skal nå ejektoren, må en ventil i lensekummen åpnes. Denne åpnes som regel ved hjelp av en vannstyrt aktuator, som bruker vannet og vanntrykket i lensekummen til å åpne ventilen, slik at det ikke kreves strøm for å åpne denne.



Figur 18 - Vannstyrt aktuator (Garlock, u.å.)

Figur 18 viser et oversiktsbilde av en vannstyrt aktuator. Venstre del av figuren viser åpning av aktuator (og dermed åpning av ventilen), høyre side viser stenging. En vannstyrt aktuator fungerer ved at tannhjulet i figuren er koblet sammen med ventilen, slik at man ved å rotere tannhjulet kan åpne eller lukke denne. Som figuren viser, har en slik aktuator to porter - innløp og utløp. Innløp er i dette tilfellet markert med "2", og utløp med "4". Ved å føre vann inn port "2", vil kammeret fylle seg opp. Etter hvert vil det dannes et trykk i kammeret, som vil gjøre at stemplene på hver side vil bli presset utover av vanntrykket, som vist i venstre del av figuren. Disse stemplene har tannstenger som er koblet opp mot tannhjulet. Når vanntrykket øker og aktuatoren "ekspanderer", vil man grunnet tannstengene og tannhjulets sammenkobling rotere tannhjulet, og ventilen aktuatoren er festet på vil åpne for gjennomstrømning.

Dersom man så ønsker å stenge ventilen, kan væske føres inn port "4", som reverserer prosessen, og altså skyver stemplene inn mot senter igjen. Dette roterer tannhjulet i motsatt retning, og vil medføre stenging av ventilen aktuatoren er plassert på.

4.2.4 Vanlige skade- og feilmekanismer

Et lenseanlegg består som nevnt av mange komponenter, som også betyr mange vedlikeholdsobjekter. Det finnes flere typer skade- og feilmekanismer som kan forekomme i et slik anlegg, hvor et utvalg av de vanligste mekanismene er gjengitt i Tabell 7:

Komponent	Rør og rørdeler		Lensekum	Lensepumpe		Ejektor		Nivåovervåkning	
Skadetype	Normal slitasje	Sprekker	Normal slitasje	Normal slitasje	Brudd i pumpeljul	Normal slitasje	Tett/skadet filter	Normal slitasje	Signalfeil
Årsak	Sanderosjon, korrosjon, deformasjon, forskyvninger, gjentetting	Utmatting, deformasjon, trykkstøt	Groing, sedimentering, korrosjon utmatting	Sanderosjon, korrosjon, kavitasjon, mekanisk slitasje, slitte akseltettinger, feiloppretting, for lavt oljenivå, løsrivning	Utmatting, kavitasjon, fremmedlegemer	Sanderosjon, korrosjon, kavitasjon, mekanisk slitasje, utmatting	Store mengder sand/urenheter i væsken, feil sildeuk, for langt rensintervall.	Gjentetting, korrosjon, sanderosjon	Løse forbindelser, sanderosjon, tett måler
Mulige konsekvenser	Økt fare for sprekke dannelse, lekkasjer, oversvømmelse	Brudd i rør, oversvømmelse	Gjentetting av rør, redusert kapasitet, lekkasjer	Virkningsgradreduksjon, lagerhavari, lekkasje, redusert kapasitet, vibrasjoner	Virkningsgradreduksjon, lagerhavari, akselbrudd	Redusert kapasitet, lekkasjer, oversvømmelse	Dårlig filtrering, gjentetting av nivåovervåkning/ejektor etc., erosjonsskader	Feil indikering av nivå, tett mengdemåler, varmgang av pumper	Feiloverføring av signaler, driftsstans
Påvisning	Visuell kontroll, mengdemåling	Penetrantkontroll.	Visuell kontroll - Synlige tegn til groing, korrosjon, sprekker etc.	Visuell kontroll - Synlige tegn på sprekker, riper, groper, ødelagte tetninger etc. Temperaturmåling, vibrasjonsanalyse, kapasitetstesting	Visuell kontroll - Synlige tegn til brudd. Vibrasjonsanalyse.	Visuell kontroll - Synlige tegn til riper, sprekker, tæringer etc. Magnetpartikkeltesting.	Visuell kontroll. Differansetrykkmåling	Visuell kontroll - Synlige tegn til korrosjon, oppsamling av sand etc.	Visuell kontroll - Løse kontakter, synlige skader etc.-

Tabell 7 - Skade- og feilmekanismer (Daleng, 1994)

Av Tabell 7 kan man lese at feil som skyldes sanderosjon, vanninntrengning og generell korrosjon er blant de mest fremtredende. Det varierer også stort hvor ofte feil forekommer. Det vil eksempelvis oftere forekomme feil hos lensepumpene sammenlignet med ejektoren. Dette er både grunnet kompleksitet og brukstid, da ejektoren er mye sjeldnere i bruk enn lensepumpene. Andre feil, eksempelvis groing og sedimentering i lensekum, skal det svært mye til for at forekommer, ettersom det er hyppig utskiftning av væske i slike lensekummer. Groing og sedimentering kan imidlertid forekomme hyppigere andre steder i lenseanlegget, eksempelvis i filter.

5.0 Ståstedsanalyse

Ståstedsanalysen i dette kapittelet skal se nærmere på de fem lenseanleggene tilknyttet KVO. Hensikten med analysen er å få oversikt over hvordan lense-systemene driftes, og er ment for å synliggjøre utfordringer ved systemet. Analysen går gjennom TrønderEnergis vedlikeholdsstrategi, teknisk informasjon om utstyr, vedlikeholdshistorikk, kostnader og HMS-utfordringer over de siste 6 årene.

Analysen innledes med en funksjonsbeskrivelse av lenseanlegget på Svorkmo, ettersom det er gjennomført befaring på dette anlegget. Det er gjennom ståstedsanalysen også vist eksempler på beregninger, hvor vedlikeholdsdata fra Svorkmo benyttes. Overordnet vil vedlikeholdshistorikk fra alle fem anlegg bli brukt som beslutningsgrunnlag i oppgaven, grunnet deres svært like oppbygging av lenseanlegget. Tabell 8 viser en oversikt over nøkkelegenskaper til anleggene.

Vannkraftverk	Byggeår	Årlig produksjon (GWh)	Fallhøyde (m)	Kraftverktype
Svorkmo	1983	275	98	Elv
Brattset	1982	390	270	Magasin
Grana	1982	305	460	
Litjfossen	1982	155	288	
Ulset	1985	140	325	

Tabell 8 - Oversikt vannkraftverk (TrønderEnergi, u.å.)

5.1 Vedlikeholdsstrategi

TrønderEnergi, som mange andre bedrifter, har ikke offentlig publisert sine måltall. Dermed er det vanskelig å kommentere disse. Det er likevel mulig å kommentere hvordan drift og vedlikehold av anleggene gjøres. TrønderEnergi har for det meste operert med en kombinasjon av korrektivt og forebyggende vedlikehold, med lite bruk av nyere teknologi. Det har vært lite tilstandsovervåking av utstyr, annet enn kritiske alarmsystem som informerer operasjonssentralen om anleggets drift. Det har imidlertid de siste årene blitt gjennomført tiltak for å pivotere vedlikehold mot mer bruk av tilstandsovervåking, fremfor

inspeksjon. I dette inngår blant annet trådløst internett i anlegget, samt oppgradering av kontrollanlegg. Det er i tillegg planlagt kameraovervåkning og bruk av nye målemetoder til overvåkning, i den hensikt å kunne innhente og behandle måledata på en gunstig måte. På denne måten kan stegene i vedlikeholdsstyringsløyfen utnyttes på en mer effektiv måte. TrønderEnergi benytter seg av en forenklet versjon av vedlikeholdsstyringsløyfen til forbedringsarbeid. Ved å ta i bruk stadig mer moderne teknologi, øker datagrunnlaget for forbedringsarbeid. TrønderEnergi ønsker med dette å planlegge vedlikehold bedre, og samtidig ha større kontroll over prosessene som foregår på deres kraftverk.

5.2 Funksjonsbeskrivelse - Lenseanlegg

5.2.1 Pumpesystem

Kjøring av lensepumper veksles vanligvis hver stasjonsrunde. En stasjonsrunde er en rutinesjekk som gjennomføres i starten av hver måned. På Svorkmo er pumpene identiske, av typen Flygt N3171, produsert av Xylem Water Solutions & Technology. Denne typen lensepumpe skal gradvis installeres på alle anlegg i KVO, etter hvert som de eldre pumpene svikter og trenger utskiftning.

Alle pumpene i lenseanleggene i KVO har IP-klassifisering IP68, som vil si at de er støvtette og tåler varig neddykking i vann. Detaljert info om lensepumpene brukt på Svorkmo vises i Tabell 9. En oversikt over pumpetyper og fabrikat brukt i de andre anleggene til TrønderEnergis kraftverk i Orkla er beskrevet i Tabell 10. Alle lensepumpene har tilnærmet like spesifikasjoner.



Figur 19 - Lensepumpe (Xylem Vue, u.å.)

Anlegg	Pumpe 1	Pumpe 2
Svorkmo	Flygt 3171	
Brattset	Pumpex KP-152-F	
Grana	Pumpex KP-152-F	PXPumps PX4-100-2
Litjossen	Flygt CP3201-456H	
Ulset	Pumpex KP-106	Grundfos S1.80.100.125

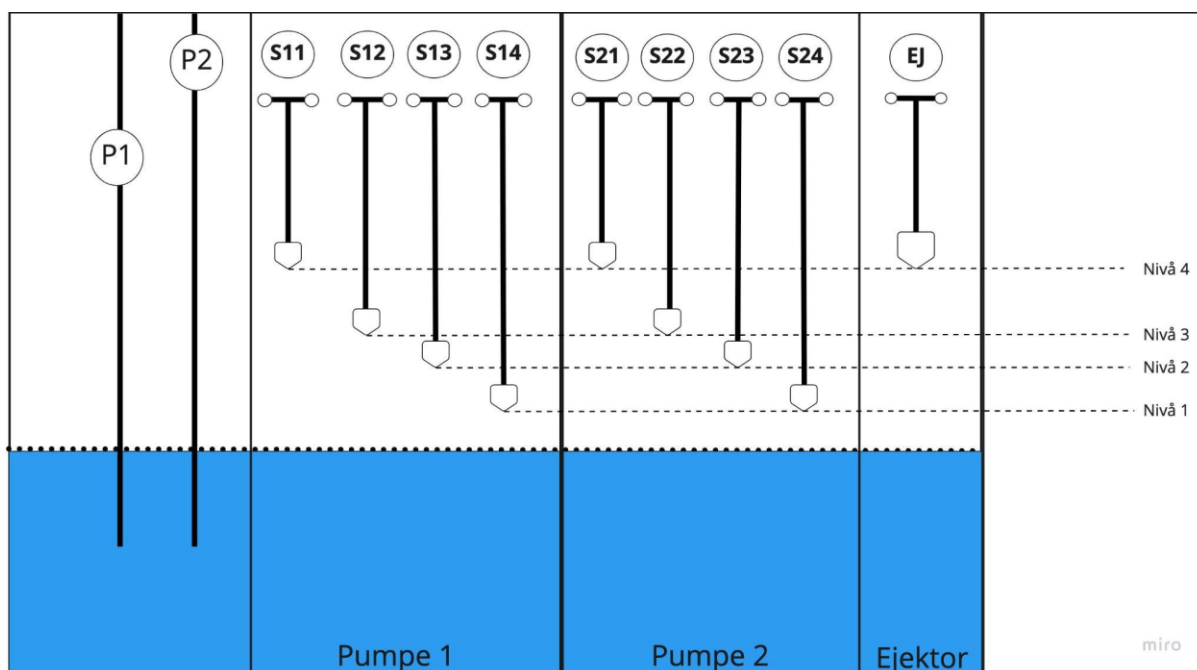
Tabell 10 - Pumpetyper KVO

Informasjon	Svorkmo	
	Pumpe 1	Pumpe 2
Produsent	Flygt/Xylem	
Modellnavn	3171	
Ytelse	22 kW	
Årsmodell	2013	
Kapasitet	50 L/s	
Ampere	59A	
Løftehøyde	20m	
IP	IP68	
Vekt	319kg	
Montør	K.Lund	

Tabell 9 - Pumpetyper Svorkmo

5.2.2 Signalsystem

Start- og stoppsignalene til pumpene og ejektoren er styrt av et mekanisk signalsystem. Signalgivingen skjer ved hjelp av åtte flottørbrytere og en flottør, som alle aktiveres ved fylling av kummen. Flottørbryterne aktiverer pumpene, og flottøren åpner til ejektor. Systemet er en kritisk del av lenseanlegget, og har ikke gjennomgått større oppgraderinger siden anlegget ble satt i drift i 1983. Signalsystemet er lite mottakelig for bruk av moderne tilstandskontroll, ettersom flottørbryterne ikke har mulighet for kontinuerlig overvåkning. Figur 20 illustreres hvordan flottørbryterne er montert i lensekummen.



Figur 20 - Funksjonstegning flottørbrytere

Som man kan se fra figuren, har hver Pumpe fire tilhørende flottørbrytere som styrer forskjellige funksjoner. For aktiv Pumpe vil alle brytere være aktive, mens for standby Pumpe blir bryter ved nivå 2 deaktivert. Dette er ettersom bryteren her styrer start av aktiv Pumpe. Totalt er 7 brytere aktive til enhver tid. Flottøren som er merket EJ styrer ejektor. Tabell 11 viser funksjonene til de forskjellige flottørbryterne.

Flottørbryter	Nivå	Funksjon ved økende vannivå	Funksjon ved synkende vannivå
S14/S24	1	Sikkerhetsfunksjon-bryter/Gir strøm	Kutter strøm
S13/S23	2	Start aktiv pumpe	Stopp aktiv pumpe
S12/S22	3	Start standby pumpe	Stopp standby pumpe
S11/S21	4	Aggregat blir stanset	Muliggjør start av aggregat
EJ	4	Nødtømmeventil åpnes	Muliggjør lukking av nødtømmeventil

Tabell 11 - Funksjon flottørbrytere

Bryterne på nivå 1 muliggjør start av aktiv pumpe, ved å tilføre strøm til enheten. Bryteren indikerer at stopp-betingelsene er intakte, og at den trygt kan starte uten å risikere tørrkjøring av pumpene. Dersom disse bryterne er ute av drift, vil ikke bryterne på nivå 2 kunne gi signal om at aktiv pumpe skal starte.

Når vannet stiger til nivå 2, er vannivået i kummen så høyt at bryterne S13/S23 vil gi startsignal til pumpen som står aktiv. Det er kun aktiv pumpe som får startsignal på nivå 2. Dersom vannet stiger til nivå 3, vil S12/S22 bli aktivert. Dette indikerer at væsknivået i kummen stiger raskere enn pumpekapasiteten til den aktive pumpen, eller at aktiv pumpe ikke har startet. Dersom kapasiteten til den aktive pumpen er for lav, vil begge pumpene kjøre parallelt, for å øke pumpekapasitet.

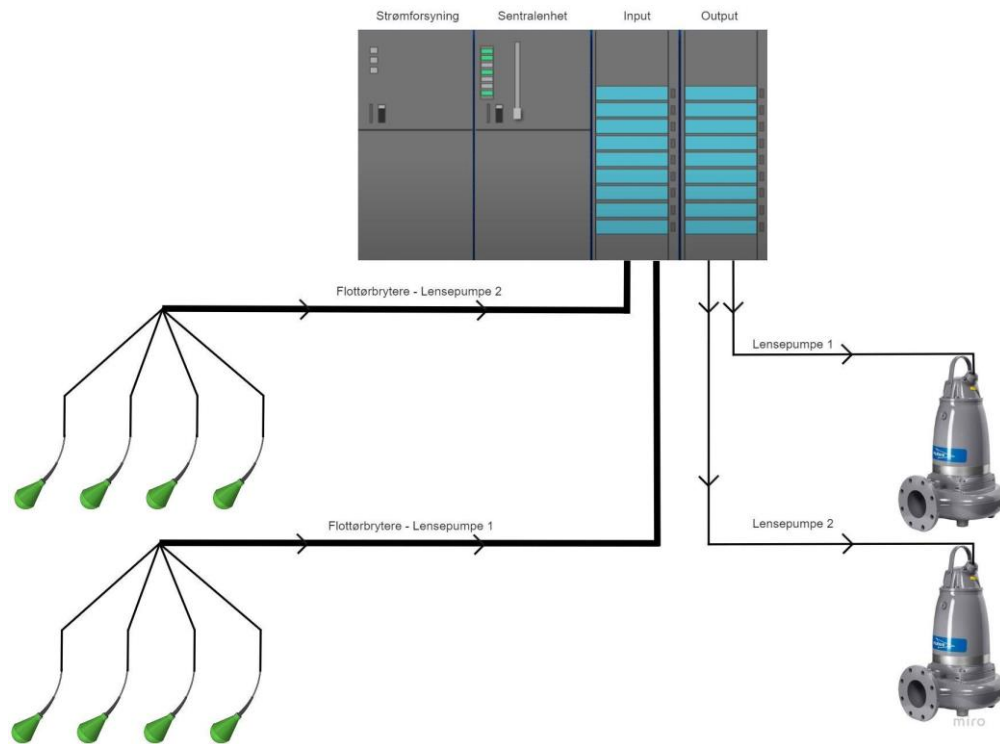
Stiger vannet til nivå 4, kan dette være en indikasjon på flere ting:

1. Pumpene har for lav kapasitet
2. Pumpene er ute av drift
3. Tilsiget til kummen er større enn hva pumpene er beregnet for

Nivå 4 er kritisk høyt nivå i kummen, og ved aktivasjon av S11/S21 vil aggregatet beskrevet i kapittel 4.1.2 bli stanset, og strømproduksjon vil stoppe. Når vannet i kummen synker igjen under nivå 4 vil det muliggjøre start av aggregat, men dette må gjøres manuelt av personell på stedet. I tillegg til stans av aggregat ved nivå 4, vil flottør EJ aktivere aktuatoren, slik at ventilen til ejetor åpnes.

Disse flottørbryterne leverer et digitalt signal, altså enten “av” eller “på”. Dette signalet går så til PLS-enheten. Figur 21 viser en forenklet oversikt over PLS-oppkoblingen til flottørbryterne. Basert på signalene fra flottørbryterne, vil PLS-enheten starte eller stoppe

lensepumpene. Den kan også sette i gang andre prosesser, som eksempelvis stans av aggregat ved nivå 4.



Figur 21 - PLS originalsystem

5.2.3 Ejektorsystem

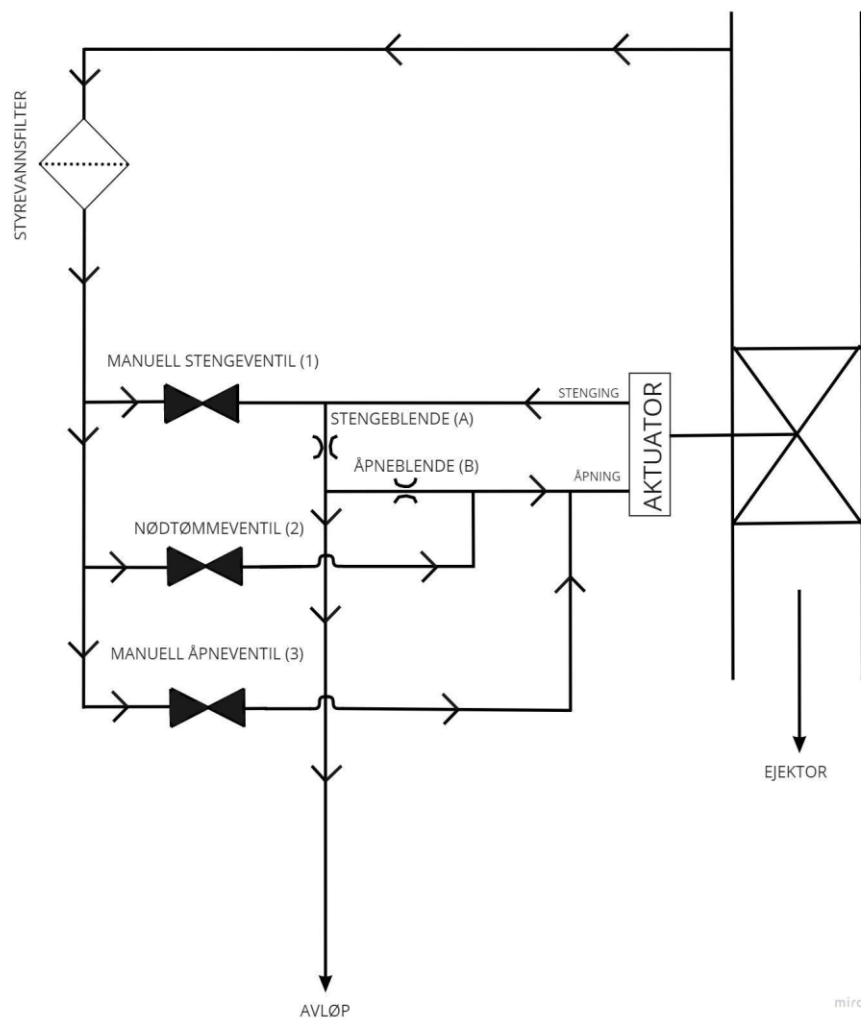
Pumpene er første instans for å forhindre drukning av vannkraftverket. Dersom pumpene eller signalsystemet svikter, er ejektoren siste barriere. For at vannet skal nå den vannstyrte aktuatoren og dermed åpne ventilen for gjennomstrømning til ejektor, må en kuleventil i lensekummen åpnes. Denne ventilen har en påsveist flottør, EJ, slik at den vil åpnes ved høyt nok væskeniå i lensekummen. Figur 22 viser et bilde av flottør EJ i lensekummen.



Figur 22 - Ejektorflottør lensekum

Figur 23 viser et flytskjema av prosessen med å åpne og stenge aktuatoren i lenseanlegget. Vannet passerer først et styrevannsfiler, for å redusere innholdet av sand og annen uønsket forurensing. Deretter vil vannet ha tre mulige veier å gå: til manuell stengeventil (1), nødtømmeventil (2), eller manuell åpneventil (3). Alle disse er normalt stengt under drift. (2) er kuleventilen som er sveiset til flottøren EJ. (2) åpnes dersom nivået i lensekummen er høyt nok, grunnet flottørens bevegelse. Dersom dette skjer, vil vannet bevege seg videre mot innløpet til aktuatoren, og aktuatoren vil åpnes. Når aktuatoren er åpen, vil vanntrykket føre til at åpneblende B åpnes, og det resterende vannet vil bli drenert til avløp.

For å ha mulighet til å åpne hovedventilen uten bruk av flottøren i lensekummen, kan man bruke (3). Ved å åpne denne ventilen, åpner man også aktuatoren på samme måte som skjer ved bruk av flottøren.



Figur 23 - Flytskjema, original flottørløsning

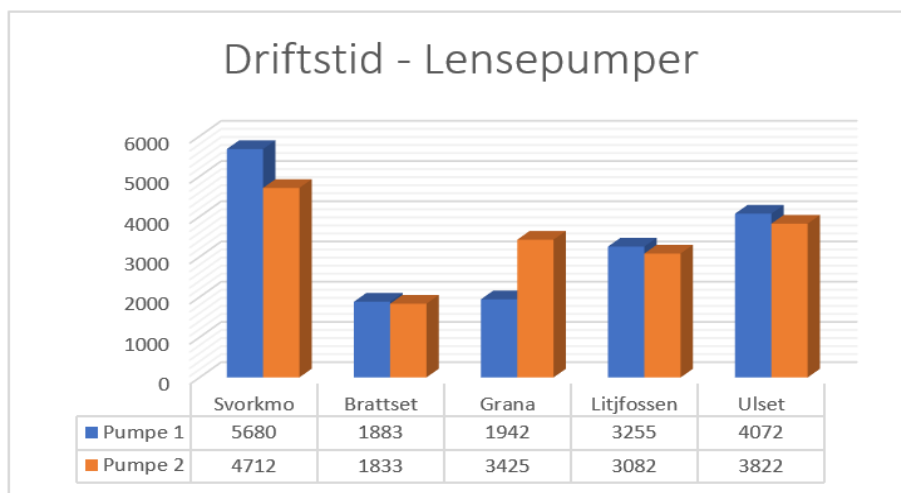
I alle anleggene i KVO er stenging av aktuatoren en manuell prosess. Dette betyr at når ejektoren har tømt lensekummen for væske, vil den begynne å suge luft, selv om (2) har stengt av trykket mot innløpet til aktuatoren. For å stenge aktuatoren, påser man først at både (2) og (3) befinner seg i stengt posisjon. Deretter åpnes (1), slik at vannet styres inn til stengesiden av aktuatoren, og vannet som presses ut av åpnesiden går til avløp, via (B). Stengeblende (A) fungerer på samme måte som (B), og vil drenere vannet til avløp når aktuatoren står i stengt posisjon. Når aktuatoren er stengt, settes (1) tilbake til stengt posisjon, og aktuatoren har igjen normal driftsposisjon.

5.3 Vedlikeholdshistorikk

Vedlikeholdshistorikken for anleggene er hentet fra registrerte arbeidsordre i TrønderEnergis CMMS, IFS Enterprise. I denne oppgaven er intervallet for vedlikeholdshistorikk perioden januar 2016 - januar 2022, som tilsvarer 72 måneder, eller 2160 dager. Denne vurderingen er gjort basert på tilgjengelige arbeidsordre i IFS, samt for å få nok grunnlag til å bestemme hvilke sviktårsaker som er gjentakende, og hvilke objekter som er mest vedlikeholdskrevende.

5.3.1 Driftstid

Dersom man sammenligner driftsstatistikk for alle anleggene i KVO, ser man store variasjoner mellom anleggene. Søylediagrammet i Figur 24 viser at Svorkmo er anlegget med klart høyest driftstid på lensepumpene sine, med nesten 300% høyere driftstid sammenlignet med lensepumpene lokalisert på Brattset. Disse variasjonene skyldes flere naturlige faktorer, blant annet om kraftstasjonen har inntaksmagasin eller ikke, om det er stort vanntilsig fra fjellet, dybde under bakken osv.



Figur 24 - Driftstid lensepumper

Ettersom det ikke er registrert driftstid på verken signalsystem eller ejektorsystem, er det vanskelig å bestemme spesifikk driftstid til disse. I denne oppgaven har man tatt utgangspunkt i døgnekstimerlig drift av disse to, hvilket over 6-års intervallet fra 2016-2022 tilsvarer 51 840 timer. Begrunnelse for dette estimatet blir diskutert i 9.1 Resultatmål 1: Ståstedsanalyse.

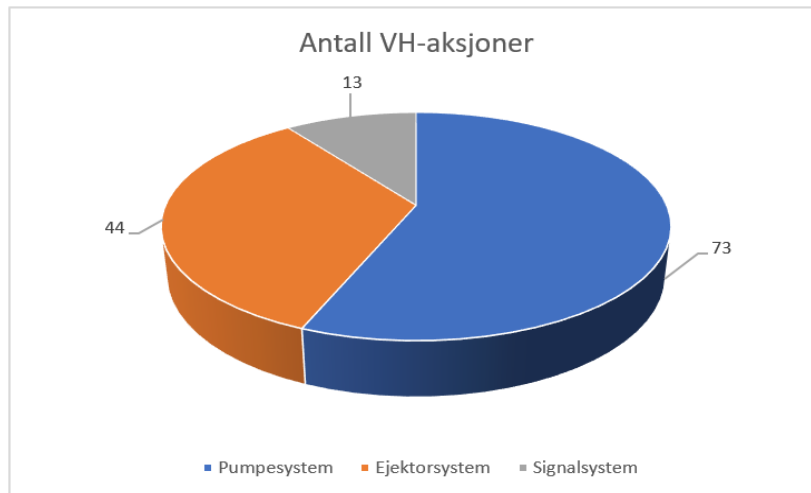
5.3.2 Vedlikeholdsaksjoner og MTBM

Tabell 12 viser fordelingen av vedlikeholdsaksjoner på de ulike vedlikeholdsobjektene i lenseanlegget på Svorkmo. Disse er videre delt inn i hva slags type vedlikehold som ble utført, henholdsvis forebyggende og korrektivt vedlikehold.

Svorkmo - Antall VH-operasjoner				
Type VH	Lensepumpe 1	Lensepumpe 2	Ejektorsystem	Signalsystem
FV	6	5	7	0
KV	2	2	5	4
Sum	8	7	12	4

Tabell 12 - Vedlikeholdsaksjoner Svorkmo

Dersom man ser på alle vedlikeholdsaksjonene som er gjennomført på lenseanleggene til KVO, er det naturlig å dele disse mellom tre hovedobjekter; pumpesystem, ejektorsystem, og signalsystem. Figur 25 viser et sektordiagram av antall vedlikeholdsaksjoner gjennomført på de ulike vedlikeholdsobjektene, i alle anleggene i KVO.

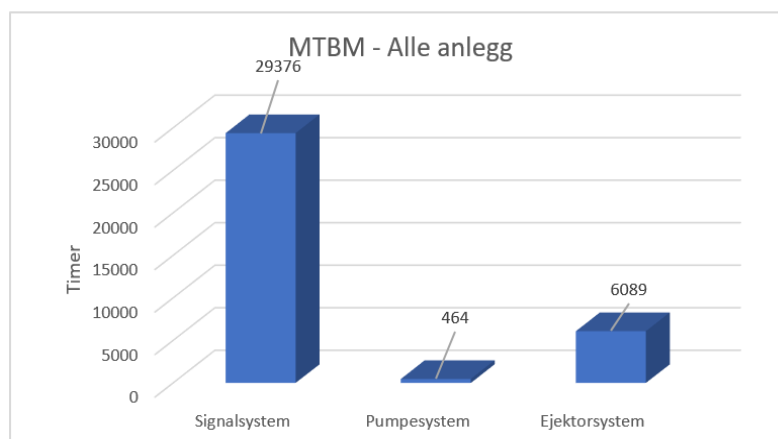


Figur 25 - Totalt antall vedlikeholdsaksjoner

På bakgrunn av Tabell 12 og tall presentert i 5.3.1 Driftstid, er det mulig å gjøre beregninger av ulike parametere, eksempelvis Mean Time Between Maintenance (MTBM). Formel 8 viser utregning av MTBM for lensepumpe 1 på Svorkmo, med utgangspunkt i driftshistorikk fra Tabell 12 og Figur 24.

$$MTBM_{pumpe\ 1} = \frac{\text{Timer kjørt i perioden}}{\text{Antall VH - aksjoner}} = \frac{5680\ \text{timer}}{8} = 710\ \text{timer} \quad (7)$$

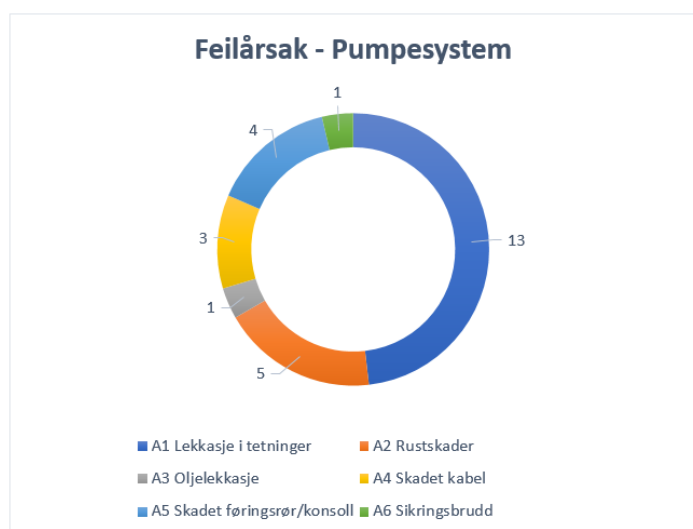
For alle anleggene i KVO gjelder stolpediagrammet i Figur 26, hvor lensepumpene er slått sammen til en stolpe. Dette ble gjort på bakgrunn av at lensepumpe 1 og 2 i en overvekt av anleggene er av identisk fabrikat.



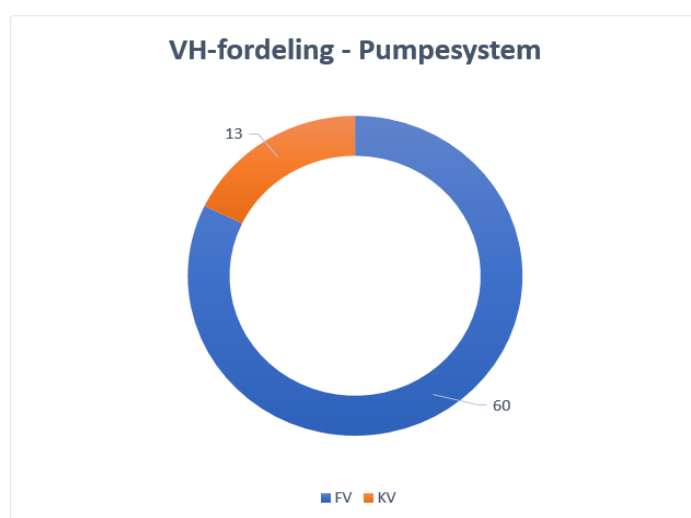
Figur 26 – MTBM - Alle anlegg

5.3.3 Pumpesystem

Det er i de fleste arbeidsordre i IFS kommentert hva som er gjennomført. Hvor inngående denne informasjonen er varierer, men på bakgrunn av gjennomgang av arbeidsordre i alle anleggene i perioden, er det mulig å lage en oversikt over gjentakende feilårsaker. I vedlikeholdsstandarden NS-EN 13306 er sviktårsak definert som “forhold knyttet til spesifikasjon, utforming, framstilling, installering, bruk eller vedlikehold, som fører til svikt” (Standard Norge, 2018, s. 16). Ettersom det i denne analysen også vurderes vedlikehold som ikke utelukkende gjøres grunnet svikt i å oppfylle krevd funksjon, har prosjektgruppen valgt å kalle vedlikeholdsårsakene feilårsaker, fremfor sviktårsaker. Dette begrepet inkluderer altså også årsaker som reduserer en enhets oppfyllelse av krevd funksjon, i tillegg til svikt.



Figur 27 - Feilårsak pumpeystem



Figur 28 - VH-fordeling pumpeystem

Figur 27 og 28 viser hhv. feilårsak og vedlikeholdsfordelingen for lensepumpene i anleggene i KVO. Av denne er det fremtredende at det meste av vedlikehold gjennomføres som et forebyggende tiltak, fremfor en korrektiv reparasjon. Dette kan knyttes til systemets redundans. Dersom man under inspisering legger merke til abnormiteter som begynnende lekkasjer, vil det være mulig å avlaste denne pumpen frem til man får gjort vedlikeholdet. Den vanligste feilårsaken for lensepumpene i denne perioden er lekkasjer i tetninger, som fører til vanninntrengning. I slike tilfeller vil pumpen bli løftet opp av kummen, og vedlikehold vil bli gjennomført av en ekstern aktør. Andre, mindre gjentakende feil kan være rustskader, oljelekkasjer o.l. Tabell 13 viser en klassifisering av feilårsakene presentert i Figur 27.

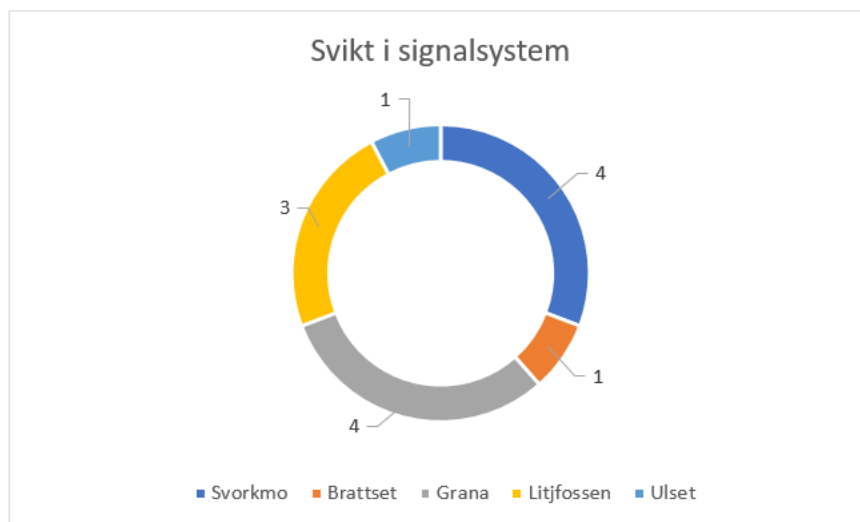
Feilklassifisering - Pumpesystem	
Feilårsak	Mulige konsekvenser
A1 Lekkasje i tetninger	Vanninntrengning i pumpe, risiko for svikt.
A2 Rustskader	Risiko for rusthull i utstyr. Kan medføre svikt grunnet mangel på olje eller vannlekkasje.
A3 Oljelekkasje	Risiko for svikt grunnet manglende smøring.
A4 Skadet kabel	Risiko for at pumpen ikke starter, da det er brudd i kabelen.
A5 Skadet føringsrør/konsoll	Kan føre til store ødeleggelse i lensekummen, med risiko for å slå i stykker flottører og flottørbrytere
A6 Sikringsbrudd	Pumpen starter ikke.

Tabell 13 - Feilklassifisering pumpeystem

5.3.4 Signalsystem

Signalsystemet som står i lenseanleggene i KVO består av flere like vedlikeholdsobjekter, presentert i 5.2.2 Signalsystem som flottørbrytere. Disse bryterne er kritiske for å gi start- og stoppsignal til pumpene, og det er derfor viktig at dette systemet fungerer til enhver tid.

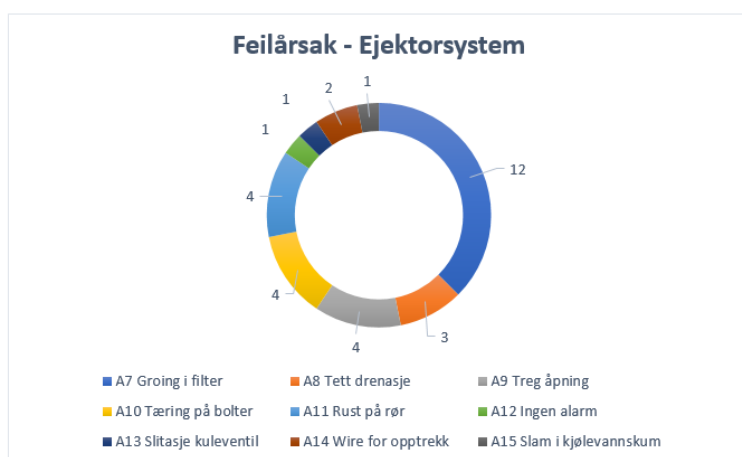
Figur 29 viser en oversikt over antall svikt i signalsystemet, fordelt på de ulike anleggene i KVO. Det er ifølge IFS kun gjort uforutsett korrektivt vedlikehold på disse systemene. Det er totalt gjennomført 13 korrektive vedlikeholdsaksjoner på signalsystemet. Sammenlignes dette med vedlikeholdsfordelingen i Figur 25, ser man at signalsystemet står for 10% av det totale vedlikeholdet på lenseanleggene i KVO. Dersom man kun betrakter korrektive vedlikeholdsaksjoner, står signalsystemet for 35% av det korrektive vedlikeholdet. Dette antallet antas å være noe lavt, etter samtaler med vedlikeholdspersonell. Denne problemstillingen vil bli drøftet videre i 9.1 Resultatmål 1: Ståstedsanalyse.



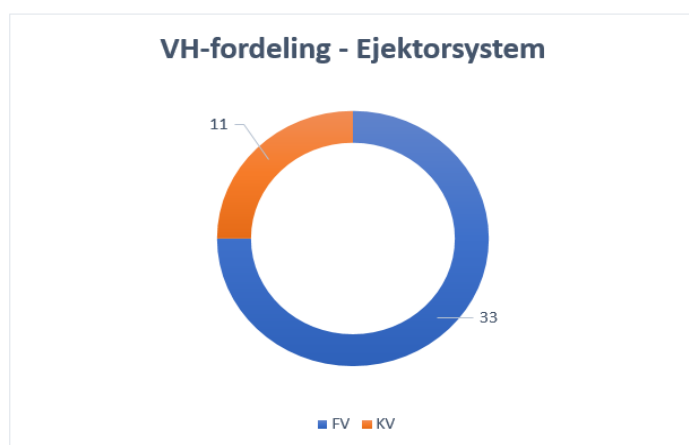
Figur 29 - Svikt i signalsystem

5.3.5 Ejektorsystem

I likhet med pumpesystemet, viser Figur 30 og 31 at forebyggende vedlikehold er den vanligste vedlikeholdsmetoden for ejektorsystemet. Det finnes også her feilårsaker som forekommer gjentagende ganger. I dette tilfellet er det mest knyttet til groing, som fører til tette filtre og dreneneringsrør. Vannet som kommer inn inneholder blant annet sandpartikler, hint av leire, og dette bidrar til å tette kanaler og filter, som gjør at aktuatoren enten blir tregere og krever mer energi for å åpne, eller at den ikke åpnes i det hele tatt. Feilårsaker knyttet til groing eller tett drenasje står for 47 % av vedlikeholdstilfellene, som kan forekomme dersom ejektorsystemet står i ro over lengre perioder.



Figur 30 - Feilårsaker ejektorsystem



Figur 31 - VH-fordeling ejektorsystem

Andre feil kan være tæring på bolter grunnet store krefter, nedslitt kuleventil grunnet sandinnhold i vannet etc. Tabell 14 skisserer mulige konsekvenser av feilårsakene.

Feilklassifisering - Ejektorsystem	
Feilårsak	Mulige konsekvenser
A7 Groing i filter	Tett styrevannsfiler kan medføre at ejektoren ikke åpnes.
A8 Tett drenasje	Tett drenasje kan medføre at ejektoren ikke stenger.
A9 Treg åpning	Risiko for redusert kapasitet og oversvømmelse.
A10 Tæring på bolter	tiltenkt.
A11 Rust på rør	Risiko for rusthull, som kan gi uheldige lekkasjer.
A12 Ingen alarm	Ingen alarm til sentralbordet om at ejektoren åpnes, som fører til tørrkjøring av ejektor og evt. pumper.
A13 Slitasje kuleventil	Risiko for lekkasjer.
A14 Wire for opptrekk	Wire brukes ifbm. Stasjonsrunde - ingen praktisk konsekvens for anlegget.
A15 Slam i kjølevannskum	Dersom for mye slam samles i bunn av kummen, medfører det risiko for at ejektoren ikke klarer å åpnes og/eller at pumpene suger opp slam og svikter.

Tabell 14 - Feilklassifisering ejektorsystem

5.3.6 Operasjonell tilgjengelighet

For å beregne operasjonell tilgjengelighet på utstyret i lenseanlegget, benyttes MTBM og MDT. Tabell 15 viser disse beregningene for utstyr på Svorkmo. Driftstid til ejektor og signalsystem er som nevnt satt til 51 840 timer. MDT er satt til et estimat på 40 timer for alt utstyr. Disse usikkerhetsmomentene vil bli diskutert i 9.1 Resultatmål 1: Ståstedsanalyse.

Svorkmo			
Utstyr	MTBM, timer	MDT, timer	Operasjonell tilgjengelighet
Lensepumpe 1	710	40	0,9467
Lensepumpe 2	673	40	0,9439
Signalsystem	12960	40	0,9969
Ejektorsystem	4320	40	0,9908

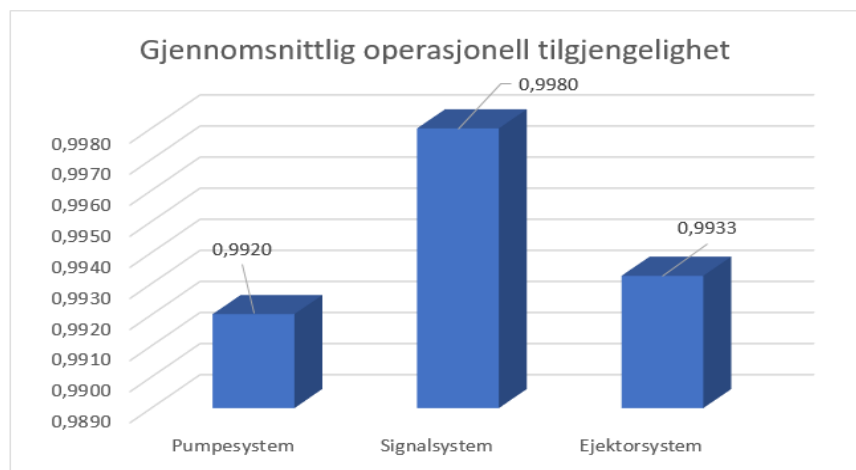
Tabell 15 - Beregninger Svorkmo

Av formel 8 kan man lese at operasjonell tilgjengelighet for lensepumpe 1 er 94,7%.

Operasjonell tilgjengelighet for resterende utstyr kan sees i Tabell 15.

$$A_{op, lensepumpe\ 1} = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} = \frac{710}{710 + 40} = 0,9467 \approx 94,7\% \quad (8)$$

Ved å betrakte alle lenseanlegg i KVO, kan man beregne gjennomsnittlig operasjonell tilgjengelighet for utstyret. I søylediagrammet i Figur 32 er pumpesystemet betraktet som et system som står i redundans, slik at man følgelig får høyere operasjonell tilgjengelighet enn om pumpene hadde stått hver for seg. Denne type beregning vil i utgangspunktet være å betrakte som en pålitelighet, men da pålitelighet og tilgjengelighet korrelerer sterkt, vil det i resten av rapporten bli brukt tilgjengelighet for alle system. Dette er gjort som et ledd i å gjøre informasjonen mer oversiktlig for leseren. Denne vurderingen diskuteres videre i 9.1 Resultatmål 1: Ståstedsanalyse. Det er brukt en MDT på 40 timer på alt utstyr. Av figuren kan man lese en operasjonell tilgjengelighet på 99,2% for lensepumper, 99,8% for signalsystemet, samt 99,3% for ejektorsystemet.



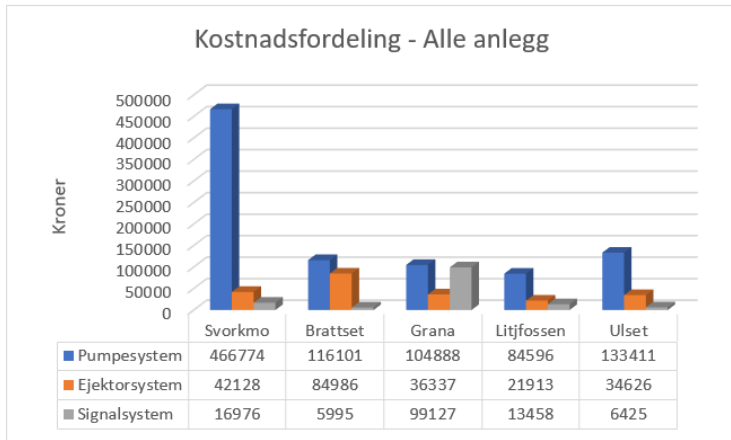
Figur 32 - Total operasjonell tilgjengelighet

5.4 Økonomisk betraktning

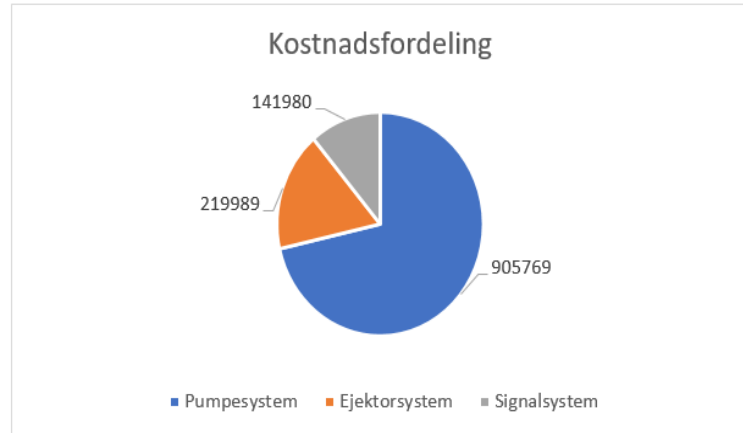
I IFS er det også loggført kostnader knyttet til de ulike arbeidsordrene. Kostnadstypene som kan loggføres tilhører ekstern, utgifter, material, personell, og verktøy/utstyr. TrønderEnergi benytter seg kun av to av disse kostnadstypene; ekstern og personell. Ekstern innebærer hovedsakelig kostnader knyttet til innkjøp av nye pumper, reservedeler o.l., mens personell viser personalkostnad ved stasjonsrunder, utrykning ved svikt etc. I denne rapporten er disse kostnadene slått sammen til en felles kostnad. Bakgrunnen for dette diskuteres i 9.1 Resultatmål 1: Ståstedsanalyse.

Figur 33 viser disse kostnadene fordelt på hhv. pumpesystem, ejektorsystem og signalsystem i de ulike kraftverkene i KVO. Av denne kan man lese at det er stor variasjon i objektskostnader på de ulike anleggene, spesielt dersom man betrakter kostnadene knyttet til

lensepumpene på Svorkmo. Denne markante forskjellen skyldes kostnadsføring av to nye lensepumper på dette anlegget. En totaloversikt over kostnadene fordelt på de tre hovedgruppene er vist i Figur 34. Validiteten til kostnadene, og eventuelle manglende kostnader vil bli drøftet i 9.1 Resultatmål 1: Ståstedsanalyse.



Figur 33 - Kostnader ved hvert anlegg



Figur 34 - Total kostnadsfordeling

6.0 Risikovurdering

Dette kapittelet tar for seg tekniske risikoer knyttet til et lenseanlegg. Risikoanalysen som blir utført er en forenklet analyse, med hensikt å undersøke uønskede hendelser som kan føre til totalt havari, det vil si drukning av kraftstasjonen. Først listes viktige sviktmoder og deretter beskrives tidligere konsekvenser ved havari og sannsynligheten for dette. Avslutningsvis diskuteres det tiltak for å redusere risiko, og HMS utfordringer ved arbeid i lensekum. En slik risikovurdering vil vanligvis inngå i en risikoanalyse som presentert i kapittel 5.0

Ståstedsanalyse, men har i denne rapporten blitt presentert i et eget kapittel. Dette er gjort for å gjøre rapporten mer oversiktlig.

6.1 Identifikasjon og konsekvens

For å kunne vurdere risikoen knyttet totalt havari, må man ha en oversikt over mulige trusler. Lenseanlegget er hovedsakelig avhengig av tre systemer for å oppfylle krevd funksjon. Det er nivåovervåking og enhetene som blir styrt av dette systemet, henholdsvis pumpeystem og ejektorsystem. Det er derfor logisk å fokusere de viktigste mulige hendelsene knyttet til disse tre systemene. Etter drøfting med vedlikeholdspersonell har man identifisert 13 viktige sviktmoder og årsaker. En sviktmode er ifølge NS-EN 13306 definert som “måten en enhet mister evnen til å oppfylle krevd funksjon på” (Standard Norge, 2018, s. 16). Tabell 16 viser en oversikt over de identifiserte uønskede hendelsene som kan lede til totalt havari.

FTA nr.	Mulige sviktmoder	Kommentar
1	Rørbrudd	Et rørbrudd kan føre til drukning, gitt at det er et alvorlig nok brudd på et kritisk sted. Kan skyldes korrosjon eller dårlig sveis
–	Ejektorflottør svikt	Er en del av det overordnede nivåovervåkingssystemet
2	Tett styrevannsfiler	Skyldes groing/sedimentering i filter
3	Flottør svikt	Kan skyldes korrosjon
–	Pumpeystem svikt	
4	Pumpe 1 svikt	Se tabell 13 for feilårsaker knyttet til pumpe.

5	Pumpe 2 svikt	
–	Ejektorsystem svikt	
6	Ejektorsvikt	Se tabell 14 for feilårsaker knyttet til ejektor.
7	Aktuatorsvikt	Mekanisk svikt internt i aktuator som kan skyldes urenheter i vann, feilmontasje osv.
–	Signalsystem svikt	
8 - 9	Defekt strømbryter	Dersom flottørbryter S14 og S24 er defekt, er ikke stoppbetingelser intakt, og det blir ikke tilført strøm til pumpene. Kan skyldes mekanisk svikt, eller at de mister oppdrift.
10-13	Defekt startbryter	Dersom flottørbryterne som gir startsignal er defekte, vil ikke pumpene starte.
8, 9, 11, 13	Kombinasjon av defekt start- og strømbryter	

Tabell 16 - Uønskede hendelser lenseanlegg

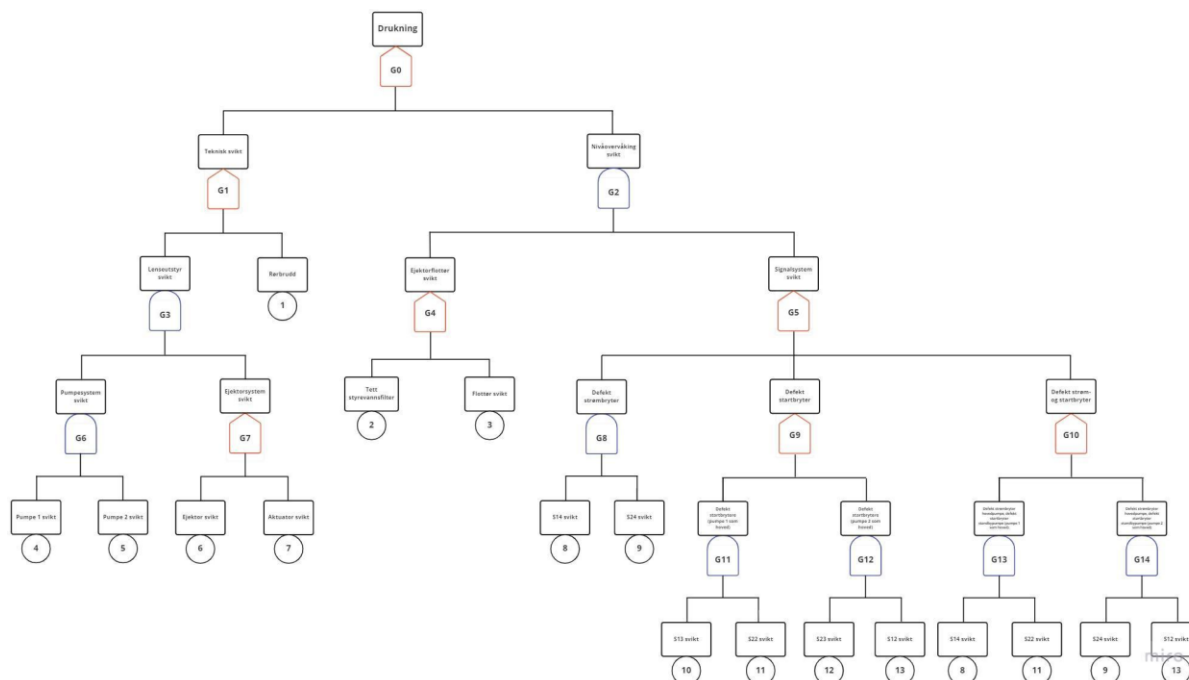
Som nevnt i 4.2.4 Vanlige skade- og feilmekanismer, er feil som skyldes sanderosjon, vanninntrenging og generell korrosjon mest fremtredende for lenseanlegg. Dette er feilmekanismer som skjer grunnet degradering over tid, enten på grunn av vanlig drift eller ugunstige driftsforhold. Feilene fører som regel ikke til svikt, men fører til svekket evne til å utføre krevd funksjon. For eksempel fører sanderosjon til at ejektor kan åpne veldig tregt. Slike feil blir som regel oppdaget på de månedlige stasjonsrundene, og håndtert fortløpende.

6.1.1 Tidligere konsekvenser ved drukning

I 1998 forårsaket et rørbrudd på tilførselsrøret til ejektor delvis drukning av Driva vannkraftverk. Ulykken førte til at mye utstyr ble nedsenket og derav ødelagt. I tillegg hadde det lekket olje fra turbinlager og oljetrykkanlegg, dette gjorde at utpumpingen av vannet måtte være kontrollert og bli sendt videre til rensing. lekkasjen påførte anlegget skader for 1 378 577 kr. Magasinet var for tiden fullt, og tilsiget stort, slik at hele kapasiteten ved kraftverket ble produksjonstap i perioden før anlegget var operativt igjen. Det var full produksjonsstans ved kraftverket fra 03.08.98 til 13.08.98. Produksjonstapet i perioden ble regnet til 1 610 506kr. Hadde rørbruddet skjedd i dag ville kostnaden blitt på 4 923 782 kr, gitt 2.1% gjennomsnittlig inflasjon fra 1998. Denne ulykken ble klassifisert som delvis drukning, som betyr at konsekvensene ved en fullstendig drukning kan bli vesentlig høyere.

6.2 Analyse

For å enklere kunne se sammenhengen mellom sviktmodene, er det konstruert et feiltre. Feiltreet, som vist i Figur 35, tar utgangspunkt i de identifiserte hendelsene beskrevet i 6.1 Identifikasjon og konsekvens, og viser hvordan den uønskede hendelsen drukning, avhenger av totalt 15 porter med totalt 13 inngangshendelser. Det er lagt ved mer lesbare versjoner av alle påfølgende feiltrær i 13.0 Vedlegg.



Figur 35 - Originalt feiltre

Ved bruk av MOCUS-metoden på feiltreet kan man finne totalt 13 minimale kuttmengder. Det vil si det er 13 mulige måter for topphendelsen å inntreffe. Kuttmengdene er som følger:

$K_1 = 1$	
$K_2 = \{4,5,6\}, K_3 = \{4,5,7\}$	
$K_4 = \{2,8,9\}, K_5 = \{2,10,11\}, K_6 = \{2,12,13\}, K_7 = \{2,8,11\}, K_8 = \{2,9,13\}$	
$K_9 = \{3,8,9\}, K_{10} = \{3,10,11\}, K_{11} = \{3,12,13\}, K_{12} = \{3,8,11\}, K_{13} = \{3,9,13\}$	

Tabell 17 - Minimale kuttmengder, originalt feiltre

Tabell 17 viser alle kuttmengder og grupperer disse ift. hvilken port kuttmengden stammer fra. Kuttmengdene som er identifisert er alle av 3. orden, med unntak av K_1 rørbrudd. Det må altså inntreffe 3 forskjellige sviktmoder for at man skal oppleve drukning.

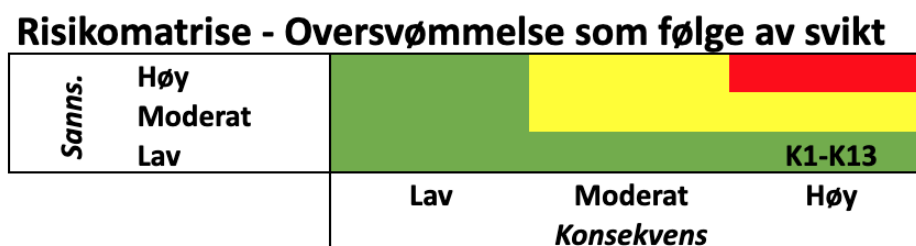
Kuttmengde K_1 er av 1. orden, hvilket vil si at om denne hendelsen inntreffer, vil det føre til havari av lensesystem. Ifølge NVE er det meldt inn totalt 15 rørbrudd fra 2016 til 2020 (NVE, 2020). Flere av disse rørbruddene medførte skader tilknyttet kraftstasjonen, men ingen alvorlige hendelser. Generelt sett pleier ikke rørbrudd tilknyttet vannkraftanlegg å føre til drukning, men skulle man oppleve et stort nok rørbrudd på et kritisk sted, er det likevel mulig, som vist i Driva-ulykken.

Kuttmengde K_2 og K_3 omhandler fullstendig svikt av aktiv og redundant pumpe, samt svikt av enten ejetor eller aktuator. Som nevnt i 5.2.1 Pumpesystem, kjøres pumpene vekselvis, og det blir utført kontroll en gang i måneden. Pumpesystemet i KVO har en gjennomsnittlig operasjonell tilgjengelighet på 99% hvilket vil si at systemet har veldig god evne til å utføre tiltenkt funksjon. En kritisk situasjon, hvor systemet er spesielt sårbart, er når en av pumpene er til reparasjon. For å hindre komplikasjoner i slike situasjoner, har TrønderEnergi kjøpt en ekstra pumpe som installeres på anlegg ved behov. Dette gjør at man tilnærmet alltid vil ha redundans i pumpene, noe som øker tilgjengeligheten til systemet. I tillegg, skulle man oppleve strømbrytning, vil pumpene fortsatt fungere på grunn av et eksternt dieselaggregat.

Generelt sett er det lite feil med ejetor og aktuator. Groing i styrevannsfiler er relativt normalt og kan hindre ejetor fra å åpne, men grunnet månedlige forebyggende vedlikehold sikrer man at dette ikke blir et problem. Åpning og lukking av ejetoren kan gå tregt, men det er ikke fravær av krevd funksjon. Det er ikke rapportert tidligere om mekanisk svikt i aktuator, men dette er ikke utenkelig. Feilmontasje eller urenheter i vann kan forårsake feil og bør tas hensyn til.

De resterende kuttmengdene, $K_4 - K_{13}$ består av forskjellige kombinasjoner av flottørbryter- og ejetorflottørsvikt. Flottørbrytere kan for eksempel oppleve mekanisk svikt, eller de kan miste oppdrift. Dersom visse kombinasjoner av brytere blir defekte kan man risikere at lensesystemet ikke starter, til tross for ingen feil på pumpene. Nivåovervåkingen i KVO har en gjennomsnittlig operativ tilgjengelighet på 99%. Det er registrert totalt 13 korrektive vedlikeholdsoperasjoner på bryterne på KVO, men som nevnt i 5.3.4 Signalsystem antas dette å være underrapportert. Skulle en slik hendelse inntreffe, blir siste barriere ejetorflottøren. Denne kan svikte ved tett styrevannsfiler, eller den kan miste oppdrift.

Figur 36 viser en risikomatrix for oversvømmelse av vannkraftverk som følge av svikt i lenseanlegg. Det er i denne matrisen presentert tre risikoelementer, i form av de identifiserte kuttmengde-gruppene. Hendelsene er plassert i matrisen på bakgrunn av samtaler med kyndig personell og deres erfaringer, samt tolkning av innhentet data. Risikomatrixen vurderer sannsynlighet og konsekvens for ulike hendelser, og disse tilegnes deretter en farge, enten grønn, gul eller rød. Fargene indikerer hhv. akseptabel risiko, moderat risiko, og uakseptabel risiko.



Figur 36 - Risikomatrixe lenseanlegg

Som man ser fra figuren faller alle kuttmengdene under samme rute, lav sannsynlighet og høy konsekvens. Sannsynligheten for at man opplever flere påfølgende sviktmoder anses som svært lav, spesielt da tilgjengeligheten på delsystemene er såpass høy. Risikovurderingen ser hovedsakelig på sviktmoder knyttet til den uønskede hendelsen drukning, og Driva hendelsen viste hvordan drukning kan ha store økonomiske konsekvenser. Konsekvensen vurderes derfor til høy.

Til tross for lav sannsynlighet for drukning, er det flere tiltak som kan gjøres for å redusere sannsynlighet for svikt, og redusere konsekvensene dersom det går galt.

6.3 Risikoreducerende tiltak

6.3.1 Reduksjon av sannsynlighet for svikt

Det finnes flere tiltak som kan iverksettes for å redusere sannsynligheten for svikt i lenseanlegg. Dette kan være å øke kapasiteten på anlegget, enten i form av større lensekum, lensepumper med større kapasitet, eller større ejetor. Økt kapasitet på lensepumper kan også virke positivt på påliteligheten til disse komponentene, da de kan kjøres med lavere belastning enn eksisterende utstyr. Dersom utstyret opplever gjentakende svikt, kan det også

være fordelaktig å vurdere andre produsenter og/eller pumpetyper, som kan garantere færre svikt.

I 6.2 Analyse ble det beskrevet at hendelser knyttet til rørbrudd, manglende signal, samt pumpe- og ejektorsvikt er hendelsene som kan medføre størst konsekvenser. Det kan derfor være gunstig å analysere og vurdere andre løsninger til signalmåling- og behandling, dersom anlegget har gjentagende svikt med utstyret som står i anlegget nå.

Et tiltak som kan bidra til å gi fullstendig oversikt over anlegget og utstyret som befinner seg der, er å gjennomføre en RCM og/eller konsekvensklassifisering av hele eller de mest kritiske delene av lenseanlegget, eller hele vannkraftverket. Ved å gjennomføre en slik prosess, vil man kunne danne seg et bilde av hvilket utstyr det er viktig å fokusere på, samt få innspill på hvordan drift og vedlikehold av dette utstyret bør gjennomføres. Spesielt konsekvensklassifisering fokuserer på det mest kritiske utstyret mtp. HMS og lignende faktorer, noe et lenseanlegg i vannkraftverk vil være.

6.3.2 Reduksjon av konsekvenser ved drukning

Dersom anlegget grunnet pumpevikt, signalfeil osv. ikke klarer å tømme lensekummen fort nok, vil nivået i lensekummen etter hvert øke til kritisk høy, som vil gi alarm på sentralbordet til TrønderEnergi. Det vil deretter være utrykning til anlegget, for å fastslå årsaken til alarmen. Avhengig av hvilket anlegg det er slått alarm på, kan uttrykningen ta opptil flere timer, da vannkraftverkene ofte står på ukurante steder i forhold til bedriftens hovedavdeling for vedlikehold. Dersom varslingen ikke var falsk, og kraftstasjonen faktisk risikerer drukning, vil det bli slått full alarm, og drukningen vil bli forsøkt stanset.

I de fleste vannkraftverk finnes det ingen ventil som stenger innløpet til turbinen, og dermed stenger vanntilførselen til kraftverket. Dette gjelder eksempelvis anleggene i KVO. Det finnes imidlertid i flere anlegg en luke øverst i tilløpstunnelen, som da vil stenge vanntilførsel. Dette finnes blant annet på kraftverket i Brattset. Da vil vanntilførselen fra elv eller demning være stengt. Tilløpstunnelen vil dog fortsatt være full av vann, og må gjennom kraftverket, som tilsvarer store mengder vann. På kraftverket i Brattset er denne tunnelen 16,7 km lang, med opptil flere meter i diameter på det meste (TrønderEnergi, u.å.). Dersom delvis drukning forekommer, kan oljelekkasjer og forurensing av vannet også være til stede, slik at vannet ikke kan slippes ut i elva igjen, men må fraktes vekk og renses. For å redusere

konsekvensene i en slik situasjon, kan det være interessant å undersøke muligheten av implementering av en ventil på innløpet til turbinen, slik at vannmengden som må tømmes ved en eventuell fullstendig svikt er minimal, sammenlignet med alternativet.

6.4 HMS risiko

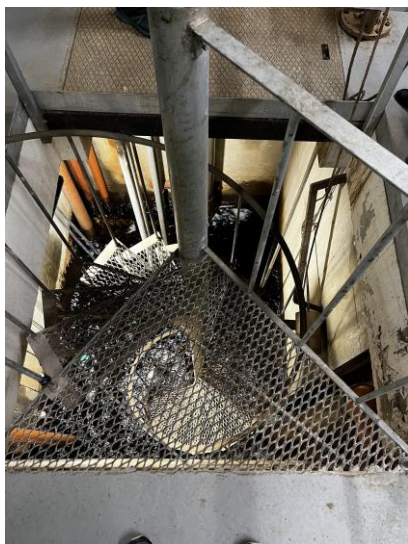
Ettersom arbeidsmediet i et kraftverk som Svorkmo er vann, medfører ikke arbeid i lensekummen umiddelbar fare når det kommer til eksponering for farlige kjemikalier. Lensekummen er imidlertid nokså dyp og trang, noe Figur 38 illustrerer. Denne vil tømmes dersom det er behov for vedlikehold av enten lensepumper eller ejektor, men ikke ved arbeid på signalsystemet. Vedlikehold av lensepumper vil ikke gjøres nede i kummen, men eksempelvis ved utskiftning av flottørbrytere må personell ned i kummen. Dette medfører en vesentlig risiko for drukning, da overflatene i kummen er svært glatte, samtidig som det er ukurante arbeidsforhold, slik at det i enkelte anlegg må tas i bruk stige for å skifte disse. Svorkmo er blant de mest vedlikeholdsvennlige anleggene, altså et anlegg med forholdsvis enkel tilgang til flottørbryterne.

Utstyr som lensepumper har også en vekt på over 300kg, som tilsier at det ved behov for vedlikehold eller reparasjoner vil være nødvendig å bruke en traverskran til å løfte ut pumpene og annet utstyr. Traverskranen kan sees i Figur 37, hvor en luke åpnes for å gi tilgang til lensekummen. Et hvert løft er en risiko, og personell som arbeider med å løfte vil være pålagt å ha gjennomført et sikkerhetskurs for sikker bruk av kranen. Dette medfølger også risiko for å falle ned i kummen, klemskader etc., som vedlikeholdspersonell må passe på ved slikt arbeid. Som regel slipper man å gå ned i kummen for å feste kroken til lensepumpen, som gir økt sikkerhet mtp. fall. Ettersom reparasjon utenom oljeskift og generell inspeksjon av utstyret settes bort til en ekstern bedrift, er det risiko knyttet til løft som vil være mest fremtredende for TrønderEnergis personell.

TrønderEnergi har iverksatt flere risikoreducerende tiltak for å minske sannsynligheten for ulykker ved arbeid i og rundt lensekummen. Blant disse finner vi krav om SJA ved hver arbeidsordre, et tiltak som synliggjør farene ved arbeidet for alle involverte. Det skal også være minimum to personer til stede ved arbeid i og rundt lensekum, slik at det er mulig å hjelpe hverandre ved fall, klemskader o.l. Det er i tillegg krav om krankurs for alt personell

som skal utføre løft med traverskran, samt årlig redningskurs. Traverskran sertifiseres årlig, for å sikre funksjonalitet.

I 2021 skjedde det totalt 4 HMS-hendelser ved kraftverkene i Orkla. Ingen av hendelsene var knyttet til lenseanleggene, og det er ikke rapportert om personskade.



Figur 38 - Lensekum Svorkmo



Figur 37 - Traverskran Svorkmo

6.5 Vurdering av risiko

Etter å ha vurdert farekildene og kombinasjon av uønskede hendelser, er det tydelig at risikoen for drukning av kraftverket er lav. Lenseanleggene er kanskje gamle, men likevel robuste. Lensepumpene står i passiv redundans, og det er derfor alltid en pumpe som er klar til å overta jobben, skulle aktiv pumpe havarere. I tillegg til dette finnes det en ekstra pumpe som kan installeres ved behov, eksempelvis når en pumpe er på reparasjon. Strømstans av pumpene er heller ikke et problem, da det er installert dieselaggregat, slik at de kan kjøres uten strøm fra vanlig strømnett.

Skulle pumpene likevel svikte, er det installert en ekstra sikkerhetsbarriere i form av ejektorsystemet. Dette virker til tross for strømstans, da den aktiveres av en vannstyrt aktuator. På denne måten sikrer man at lenseanlegget fortsatt vil fungere, dersom det skulle være uforutsette driftsavbrudd i anlegget. Risikoen for drukning av anleggene i KVO anses som lav, men ikke utenkelig. Konsekvensene ved drukning er store, og man kan derfor undersøke risikoreducerende tiltak, gitt at det er økonomisk forsvarlig å implementere.

7.0 Potensielle forbedringer

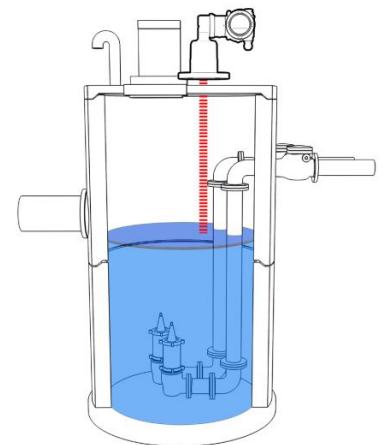
Kapittelet omhandler mulige forbedringstiltak som kan implementeres på anleggene. Virkemåte, implementering og kostnader tilhørende hvert tiltak vil bli presentert. Hvert forslag har også et tilhørende feiltre, ment for å illustrere hvordan endringen har effekt på kompleksiteten til anlegget. I forbedring 1, som omhandler modernisering av signalsystemet, vil det også bli gjort en nåverdiberegning, for å vurdere lønnsomheten til tiltaket.

7.1 Forbedring 1 - Modernisering av signalsystem

Som nevnt i ståstedsanalysen er signalsystemet mekanisk drevet, og ikke veldig kompatibelt med ny teknologi, som gjør moderne overvåkning vanskelig. I dette delkapittelet vil en løsning på modernisering av dette systemet bli presentert, ved bruk av lasermåling som et felles signalsystem for begge lensepumper. Denne løsningen muliggjør bedre overvåkning, sammenlignet med eksisterende løsning.

7.1.1 Måleprinsipp

En alternativ løsning til å bruke flottører, er å benytte seg av laser til nivåmåling. Laseren tar i bruk “time of flight” prinsippet, hvor man regner ut tiden laserstrålen bruker på å reflekteres av mediet. En slik laserstråle blir ikke påvirket av falske ekko og andre ytre påvirkninger - den måler det den ser. Figur 39 illustrerer prinsippet. Lasersensorer brukes i dagens industri som posisjonssensorer for å overvåke avstander hvor nøyaktighet er kritisk viktig, samt til nivåmåling av både faste stoffer og væsker.



Figur 39 - Måleprinsipp laser (ABB, 2022)

7.1.2 Implementering og kostnader

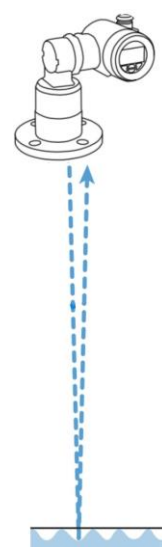
Et forslag på en nivåmåler som bruker laserteknologi, er ABB sin LLT100. Dette er en allsidig og velprøvd nivåmåler som brukes for både solide stoff og farlige kjemikalier, samt for å måle vannmengder. Figur 40 viser den aktuelle enheten.



Figur 40 - LLT100 (ABB, u.å.)

Laseren bruker et analogt 4-20 mA signal for å gjøre om målingen til en brukbar enhet, eksempelvis prosent eller tall. Denne spesifikke sensoren kan gjøre målinger i væske opp til 30 meter, som gjør den godt egnet til bruk i lensekummen, som har en maksimal høyde på ca. 5 meter.

Implementering av sensoren er nokså enkelt. Det er imidlertid kritisk for laserens funksjonalitet at sensoren monteres slik at den står vinkelrett på vannoverflaten, ettersom laserstrålen som sendes også må reflekteres tilbake og absorberes av sensoren. Dette er et lite areal, og feil montering vil føre til at laserstrålene ikke vil bli absorbert, som gir feil eller ingen signal. Figur 41 illustrerer dette. Vannoverflater reflekterer også laserstråler mer konsentrert enn andre medier, slik at det i tilfellet med installasjon i lensekum er kritisk at montering blir utført riktig.



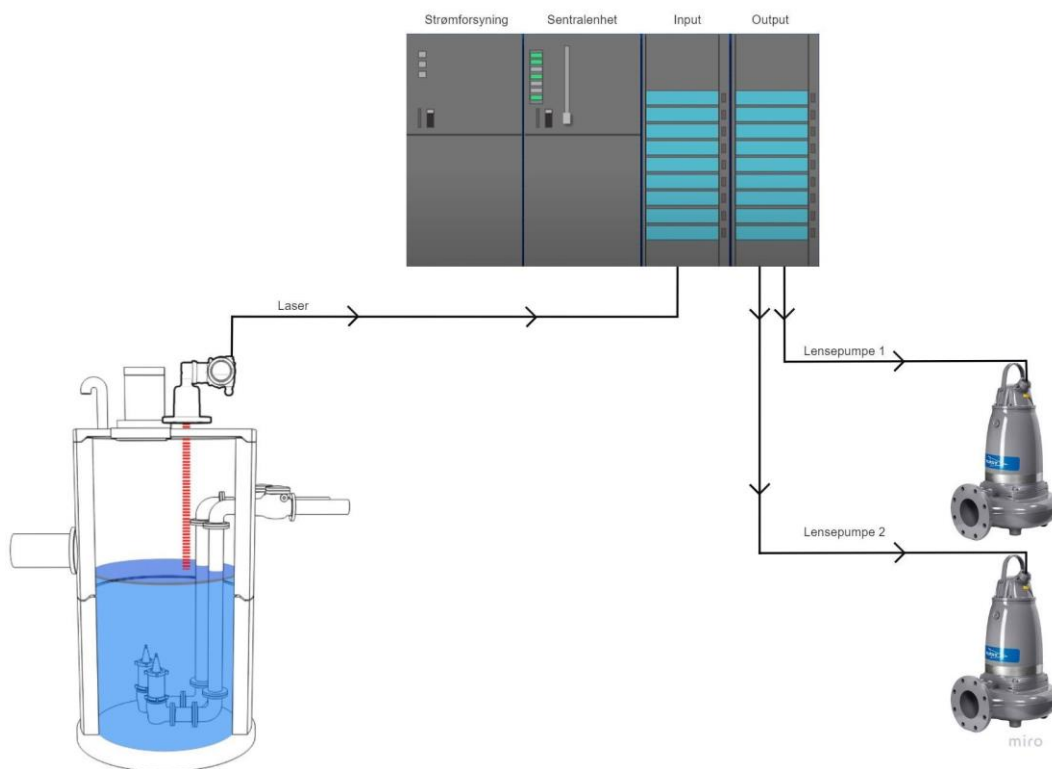
Figur 41 - Feilmontering (ABB, 2020)

Prisforslag for en slik nivåmåler er 16 300 kr eks. mva, ikke inkludert installasjon og eventuelle braketter. Andre nøkkelegenskaper kan sees i Tabell 18.

Produsent	ABB
Modellnavn	LLT100
Temperaturspenn	-40°C - +60°C
Materialtype	Aluminium
IP-grad	IP67
Utgangssignal	4-20 mA
Målelengde	30 000 mm
Vekt	3,7 kg
Pris	16 300 kr eks. mva

Tabell 18 - Nøkkelegenskaper LLT100

I likhet med flottørbryterne i dagens signalsystem, vil laseren måtte kobles opp til PLS-enheten til lenseanlegget. Ved å programmere PLS-enheten til å handle basert på dette signalet, kan man eliminere kompleksiteten til alle flottørbryterne, og kun benytte seg av signalet fra laseren. Ved eksempelvis 10 mA kan PLS-enheten gi signal til hovedpumpen om start. Disse nivåene kan justeres ved behov. Laseren fra ABB har også et display på sensoren, som kan vise info om fyllnivå i tanken, hvilket strømsignal som gis i sanntid osv. Figur 42 illustrerer samhandlingen mellom komponentene i lenseanlegget.



Figur 42 - PLS modernisering av signalsystem

Figur 42 fungerer også som et eksempel på målekjeden ved bruk av en slik sensor. Det vil være lite signalbehandling, ettersom sensoren selv tolker og sender ut et signal i form av 4-20 mA, slik at unøyaktighet og presisjon kun er forbeholdt laseren, ikke andre elementer i målekjeden. Laseren har en nøyaktighet på ± 11 mm, som vil være mer enn godt nok til bruk i lensekum. Grunnet få elementer og lite behandling av sensordata, anses dette som en pålitelig målekjede.

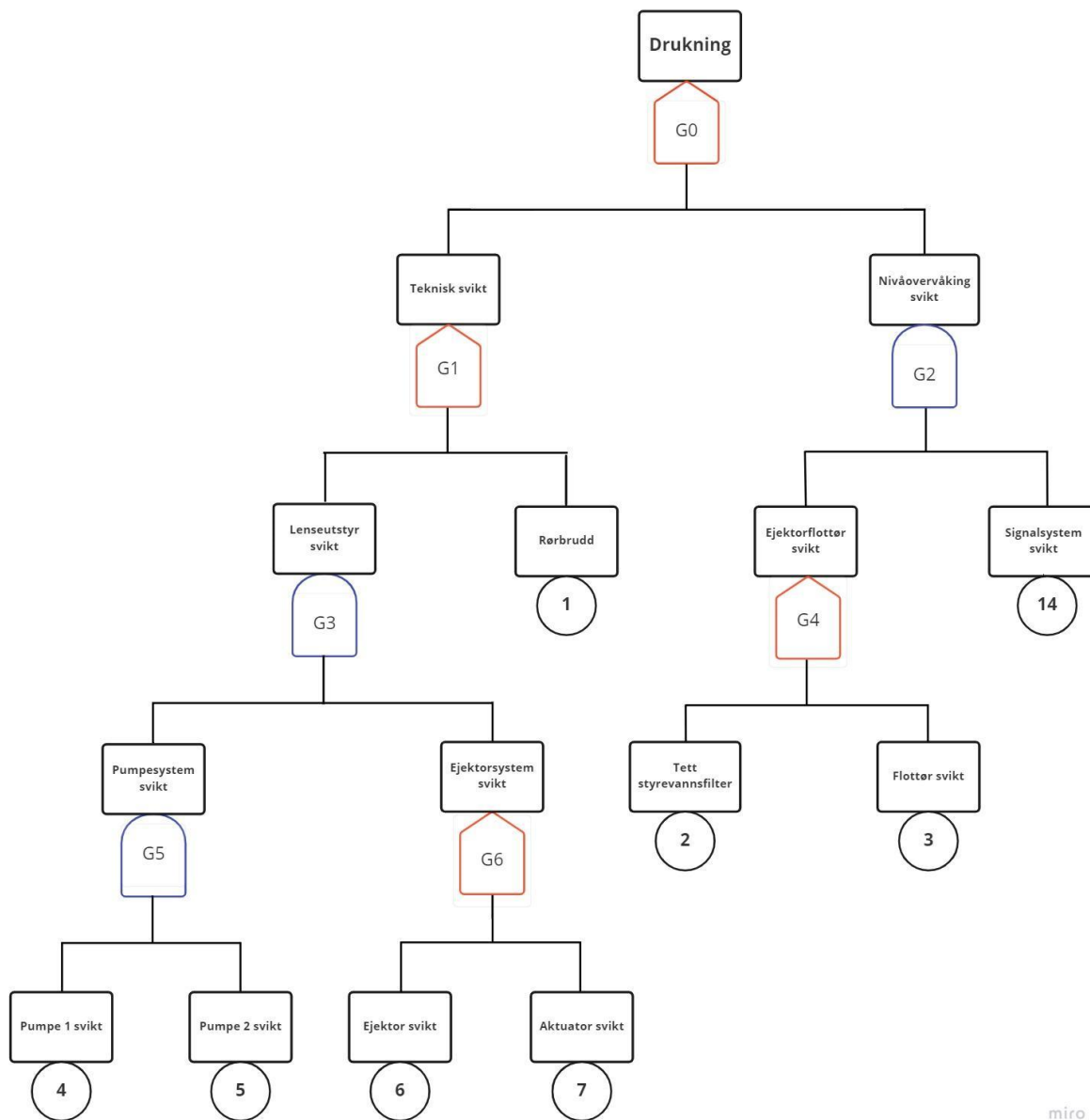
7.1.3 Vedlikehold

Lasersensorer er nøyaktige, og ettersom de ikke er i direkte kontakt med mediet de måler, er de svært lite vedlikeholdskrevende. Disse krever heller ikke kalibrering, da de kun måler det sensoren ser, og ikke opplever ytre påkjenninger som kan påvirke måleresultatet. Siden sensoren måler opp til 30 meter, kan denne også monteres over lensekummen. Dette gir økt sikkerhet, ettersom vedlikeholdspersonell slipper å klatre ned i lensekummen ved implementering, inspeksjon og eventuelt vedlikehold.

ABB LLT100 er oppgitt med en Mean Time Between Failure (MTBF) på 25 år, og det kreves som nevnt ingen kalibrering, slik at sensoren i teorien skal være vedlikeholdsfri. Dette vil altså si at teoretisk tilgjengelighet for anlegget er på 100%, dersom man betrakter en 6-årsperiode. Ifølge ABB skal sensoren også være upåvirket av bevegelse i vannet, slik at det ikke er behov for bølgereduserende tiltak i vannet.

7.1.4 Feiltre

Ved å modifisere signalsystemet ved bruk av laser, forenkler man høyre gren av feiltreet. Signalsystemet vil da betraktes som en enhet, og det vil dermed være færre vedlikeholdsobjekter å behandle. Dette kan bedre påliteligheten til denne grenen, avhengig av hvor pålitelig det nye systemet er. Figur 43 viser et feiltre som benytter seg av denne forenklingen.



Figur 43 - Feiltre ved modernisering av signalsystem

Sammenlignet med det originale feiltreet, vil man som følge av denne løsningen få færre kuttmengder. Feiltreet i Figur 43 har følgende minimale kuttmengder:

$K_1 = \{1\}$
$K_2 = \{4,5,6\}, K_3 = \{4,5,7\}$
$K_4 = \{2,14\}, K_5 = \{3,14\}$

Tabell 19 - Minimale kuttmengder ved modernisering av signalsystem

7.1.5 Nåverdiberegninger

I dette kapittelet gjennomføres en nåverdiberegning av en løsning hvor en lasersensor implementeres på et av TrønderEnergis anlegg, sammenlignet med å fortsette med eksisterende løsning. Hensikten med en slik beregning er å gi et estimat på lønnsomheten ved å oppgradere anlegget.

Implementeringskostnader

Som nevnt i 7.1.2 Implementering og kostnader, har ABB gitt et pristilbud på lasersensoren LLT100 på 16 300 kr. I tillegg til dette vil det i oppstartsfasen være kostnader knyttet til braketter og modifikasjoner av lensekum, oppkobling mot TrønderEnergis kontrollanlegg, samt andre uforutsette kostnader. Etter dialog med personell i TrønderEnergi og kontaktperson i ABB, er en rimelig implementeringskostnad av lasersensor i et lenseanlegg satt til 40 000 kroner, som vist i Tabell 20.

Implementeringskostnader per lenseanlegg	
Laser	16 300
Tilleggsutstyr	3 000
Installering	20 700
Sum	40 000

Tabell 20 - Implementeringskostnader LLT100

Driftsbesparelser

Et av de risikoreduserende HMS-tiltakene TrønderEnergi har innført, er å ha to mann til stede ved arbeid i og rundt lensekummen. Etter dialog med kontaktperson i TrønderEnergi, har et estimat på driftskostnader ved å fortsette med den eksisterende løsningen blitt utarbeidet. Her beregnes det en kostnad på 1000 kroner per time per ansatt, og det er som nevnt to ansatte. Kjøring til og fra anleggene varierer åpenbart mellom anleggene, men er i tabellen satt til 1 time hver vei. Utskiftning og testkjøring av flottørbryter er satt til 2 timer fra start til slutt, og inkluderer blant annet utskiftning, ferdigstilling av arbeidsordre og rengjøring. Flottørbryterne leveres av Elteco, og koster 2 341 kr per stk. Det er estimert at kostnadene per tur vil være på ca. 10 000 kr. Basert på vedlikeholdshistorikk loggført i IFS, er det over 6 år loggført 13 hendelser i KVO hvor personell har måttet rykke ut for å skifte flottørbryter, i

tillegg til flere alarmer og feil oppdaget under stasjonsrunder. Etter samtaler med kontaktperson i TrønderEnergi, vil et mer sannsynlig estimat være to årlige VH-aksjoner per lenseanlegg. Tabell 21 gir en oversikt over årlige kostnader knyttet til vedlikehold av flottørbryterne i et lenseanlegg. Som beskrevet i 7.1.2 Implementering og kostnader, skal løsningen som innebærer nivåovervåking med lasersensor verken kreve vedlikehold eller kalibrering på opptil 25 år. Det vil derfor ikke være noen løpende driftskostnader knyttet direkte til denne. Dette betyr at den årlige besparelsen ved å oppgradere signalsystemet i et lenseanlegg er på 20 628 kr.

Årlige driftsbesparelser per lenseanlegg	
Kjøring til/fra anlegg	4 000
Utskiftning av flottørbryter	4 000
Kostnad flottørbryter	2 341
Kostnad per tur	10 341
Gjennomsnittlig antall VH-aksjoner grunnet vipper	2
Totalt	20682

Tabell 21 - Driftsbesparelser LLT100, per anlegg

NV-beregninger

I beregningen antar vi at verken lasersensor eller andre komponenter har restverdi. Formel 9 viser formelen for nåverdi ved 2 årlige VH-aksjoner, 10% kalkulasjonsrente, og tilbakebetalingstid på 3 år. Tabell 22 viser flere nåverdiberegninger, med ulikt antall VH-aksjoner, og variasjon i tilbakebetalingstid. Dette er nåverdiberegninger for implementering av lasersensor et lenseanlegg.

$$NNV_{3\text{ år}, 2\text{ årlige aksjoner}} = NNV = \sum_{t=1}^3 \frac{20\,683}{1,1^t} - 40\,000 = 11\,433 \quad (9)$$

Antall VH-aksjoner	Kalkulasjonsrente	Antall år	NNV	IRR
1	10 %	2	-22 053	-34,61 %
2			-4 106	2,26 %
3			13 842	35,01 %
1		3	-14 283	-11,71 %
2			11 433	25,63 %
3			37 150	57,83 %
1		4	-7 220	1,35 %
2			25 559	37,05 %
3			58 339	67,77 %

Tabell 22 - Nåverdiberegninger LLT100, oppgradering i et lenseanlegg

Av tabellen kan man lese at dersom to VH-aksjoner er et riktig estimat, vil nedbetalingsperioden til utstyret måtte være på minimum 3 år, for å få en positiv nåverdi. Dersom det kun forekommer en VH-aksjon årlig, vil investeringen være å anse som ikke lønnsom. Her betrakter man kun redusert vedlikehold som følge av oppgradering, ikke økt overvåkning av anlegget, som også er en positiv effekt. Negativ internrente (IRR) skyldes at investeringskostnaden ikke blir tjent inn ilt. nedbetalingsperioden.

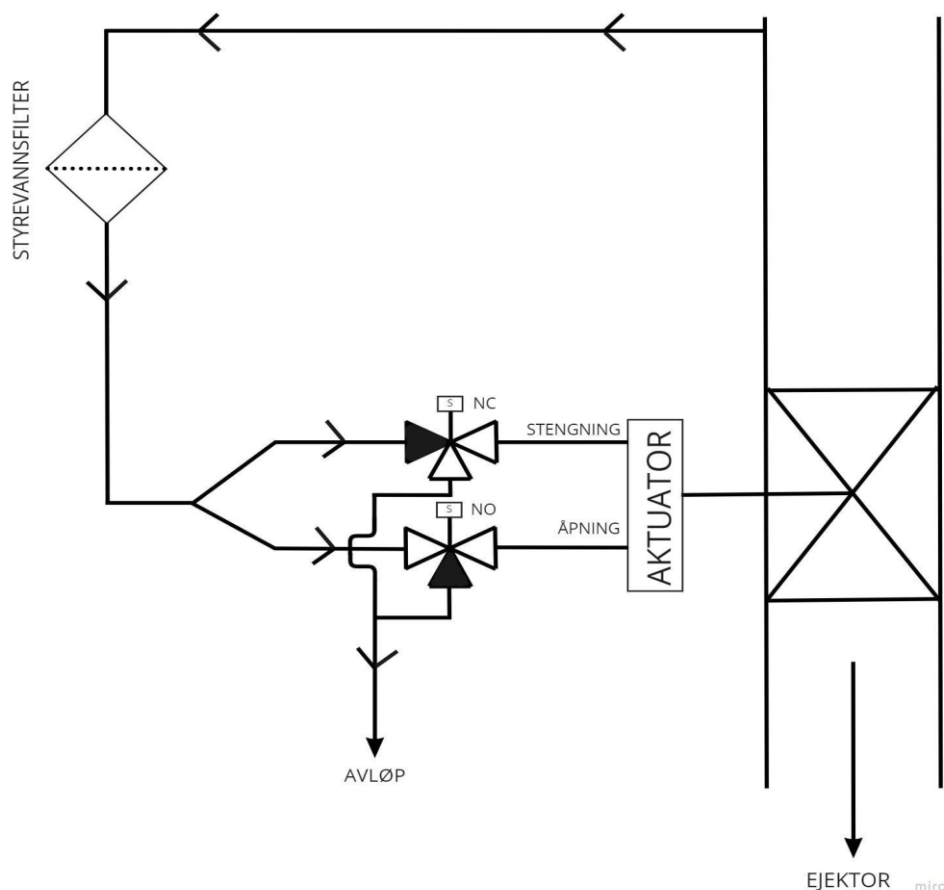
7.2 Forbedring 2 - Modifisering av ejektorsystem

Som nevnt i 4.2.3 Ejektor, er ejektorsystemet siste instans før en eventuell fullstendig svikt av lenseanlegget. For at vannet skal føres til ejektor, må en aktuatorstyrt ventil åpnes. Denne aktuatoren er vannstyrt, og ved åpning må denne stenges manuelt. Dette betyr at dersom ejektoren blir nødt til å ta unna vann fra lensekummen, vil det være nødvendig med utrykning for å stenge ventilen. Dette uavhengig av om det var en reell svikt, midlertidig svikt eller signalfeil.

7.2.1 Forbedret løsning

For å slippe å rykke ut til anleggene ved mindre eller falske feil, vil det lønne seg å automatisere prosessen som omhandler stenging av aktuatoren. Dette kan gjøres på flere måter, eksempelvis ved å installere en elektrisk aktuator, som får signal om å åpne eller stenge. Dette vil være kostbart både i forhold til nytt utstyr og oppgradering av anlegget, og

det vil derfor være hensiktsmessig å finne en alternativ løsning. Ved å ta i bruk magnetventiler kan man fortsette å benytte seg av den vannstyrte aktuatoren som allerede finnes på anlegget.



Figur 44 - Flytskjema modifisering av ejektorsystem

Figur 44 viser et flytskjema av en forenklet løsning på åpning og lukking av aktuatoren. I denne løsningen blir det benyttet to magnetventiler, med tre porter og to mulige posisjoner. Ventilene er plassert før innløp og utløp til aktuatoren. På innløpet har magnetventilen normalposisjon åpen, mens magnetventilen på utløpet har normalposisjon lukket. Disse ventilene åpnes og lukkes ved hjelp av signaler fra flottørbrytere, på samme måte som signalsystemet for lensepumpene. I en driftssituasjon vil ventilene få signal om å stå i motsatt av sin normalposisjon, hhv. lukket for innløpsventilen, og åpen for utløpsventilen. Da vil aktuatoren være stengt. Dersom nivået i lensekummen blir høyt nok, vil magnetventilene få signal om å sette ventilene til sin normalposisjon, slik at aktuatoren åpnes, og vannet ledes til ejektor. Når nivået i lensekummen synker til normalt nivå igjen, vil ventilene få signal om å åpnes igjen.

Ettersom ventilenes normalfunksjon er valgt slik at det vil være trykk på innløpssiden av aktuatoren med mindre annet gis signal om, vil aktuatoren åpnes i en ekstraordinær situasjon, eksempelvis ved strømbrudd. Ved å gjøre det på denne måten vil anleggets sikkerhet opprettholdes, altså at man kan være trygge på at ejektoren fortsatt er operasjonell ved strømbrudd.

Et annet positivt aspekt ved en slik løsning, er muligheten for testkjøring av anlegget. Dette avhenger av hvilken signalmetode som blir brukt, og om denne kan overstyres av kontrollrommet. Dersom dette er mulig, kan man ved en løsning vist i Figur 44 fjernstyre åpning av aktuator. Regelmessig testkjøring av anlegget kan ha en positiv effekt på flere av de eksisterende feilårsakene, eksempelvis groing i filter og sedimentering som fører til treg åpning. Dersom implementeringen blir gjort riktig, vil en slik testing av anlegget være veldig enkel å gjennomføre, og testintervallet kan derfor gjennomføres hyppigere enn for dagens løsning.

7.2.2 Implementering og kostnader

Sammenlignet med å bytte ut den vannstyrte aktuatoren med en elektrisk styrt, vil implementering av to magnetventiler være svært kostnadseffektivt. Problemstillingen vil i dette tilfellet være knyttet til hvordan signalsystemet skal settes opp. Som nevnt, kan en løsning være å installere to nye flottørbrytere i lensekummen, en for hver magnetventil. Når flottørbryterne blir aktivert, vil disse sende signaler til ventilene om å åpne eller lukke. Disse bryterne vil imidlertid ha samme driftsutfordringer som signalsystemet for lensepumpene. Det er også usikkerhet knyttet til hvordan oppkoblingsprosessen vil være, og kostnader relatert til dette. En slik løsning vil derfor være enklere å implementere dersom signalsystemet også oppgraderes, for eksempel til bruk av laser til nivåmåling. Da er det enkelt å legge inn flere nivåer hvor handlinger skal utføres, blant annet signal til magnetventilene. Det lar seg med andre ord gjennomføre å oppgradere styringssystemet til aktuatoren alene, men det er mest virkningsfullt og pålitelig dersom man samtidig oppgraderer signalsystemet.

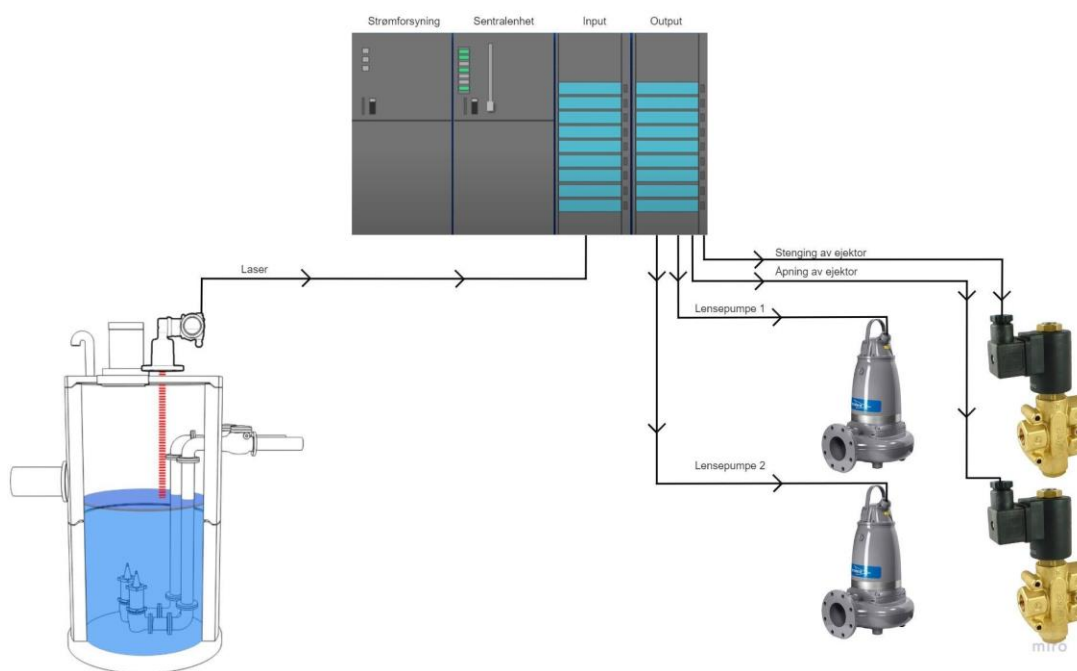
Dersom signalsystemet oppgraderes, vil kostnadene forbundet med oppgradering av ejektorsystemet være nokså lav. Kostnadene vil være knyttet til to magnetventiler, modifisering av rørsystem, samt oppkobling av signalgivning til nevnte magnetventiler. Signalgivningskostnadene for ejektorsystemet vil nært knyttet til de samme kostnadene for

signalsystemet, ettersom man er avhengig av signal fra denne for å sende videre til magnetventilene. Konkrete kostnadsestimater per lenseanlegg kan sees i Tabell 23. Her er ikke kostnader knyttet til signalgivning presentert, da dette kan variere svært mye.

Implementeringskostnader per lenseanlegg	
Magnetventil, 2 stk.	4 000
Rørdeler	1 000
Installering	5 000
Sum	10 000

Tabell 23 - Implementeringskostnader modifisering av ejektorsystem

Ved å oppgradere både signal- og ejektorsystem, kan man i tillegg til styring av lensepumper bruke PLS-enheten til å gi signal om å åpne aktuatoren. Figur 45 illustrerer dette. I drift vil det på bakgrunn av magnetventilenes normalposisjon være nødvendig å gi disse strøm, slik at aktuatoren er stengt. Dersom signalet fra laseren tilsvarer at nivået i lensekummen er kritisk høyt (f.eks. 18 mA), kan PLS-enheten slutte å gi strøm til disse ventilene, slik at vannet vil strømme inn på åpnesiden av aktuatoren, og ejektoren tar unna vannet i lensekummen. Når nivået i kummen når et moderat nivå igjen (eksempelvis ved en måling tilsvarende 6 mA), vil aktuatoren stenge ventilen til ejektor, slik at lensepumpene igjen tar over.



Figur 45 - PLS oppgradering av signal- og ejektorsystem

7.2.3 Vedlikehold

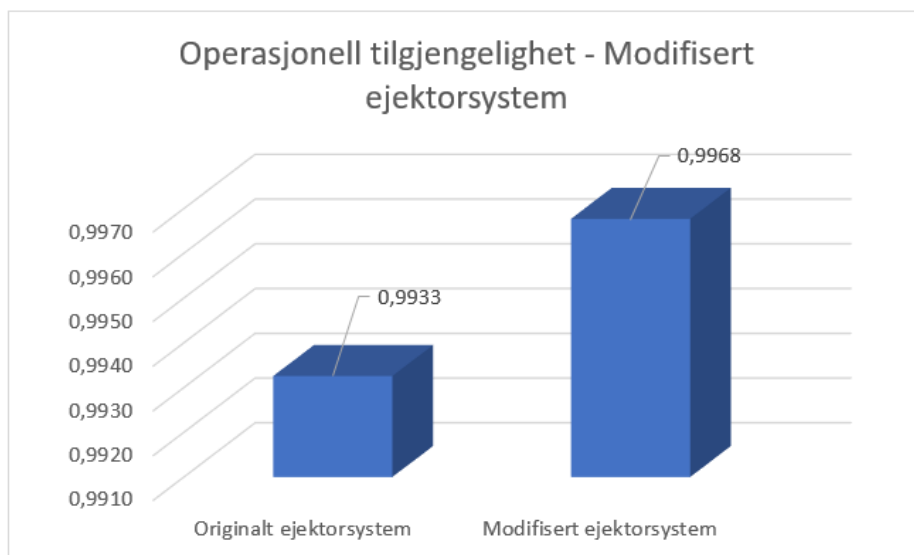
Dersom en slik løsning blir implementert, får man minimum to nye vedlikeholdsobjekter, i form av to magnetventiler. Om det blir flere, avhenger av hvordan nivåovervåkning løses. Til gjengjeld vil man kvitte seg med tre eksisterende ventiler, i form av nødtømmeventil og de to ventilene som brukes i forbindelse med stenging av aktuator. Denne reduksjonen fra tre til to ventiler kan alene gi utslag på vedlikeholdsintervallet, men dette er vanskelig å bestemme uten fysisk testing. Det anbefales å bruke pålitelige magnetventiler, som tilfredsstillende sikkerhetskravene beskrevet i standarden IEC 61508. Dersom en slik løsning imidlertid muliggjør testkjøring av ejektorsystemet, vil regelmessig kjøring av systemet kunne redusere feil knyttet til groing og sedimentering, som er vanlige feilårsaker i anlegget. Ved regelmessig kjøring vil ikke sand og skitt kunne samle seg på aktuator og ventiler over like lang tid, som kan ha positiv effekt vedrørende vedlikeholdsfrekvens på disse. Hvis dette viser seg å fungere godt, kan det også være mulig å programmere en slik testkjøring til å gjennomføres regelmessig, eksempelvis hver uke.

Betrakter man antall vedlikeholdsaksjoner utført på ejektorsystemet i KVO, finner man 44 aksjoner. Dersom man ved regelmessig testkjøring av anleggene fjerner vedlikehold knyttet til groing og sedimentering, er det i beste fall mulig å redusere det totale antall VH-aksjoner fra 44 til 23, eller fra 9 til 4 per anlegg. Dette tilsvarer en reduksjon i vedlikehold på ca. 47%. I reduksjonen inngår:

Vedlikeholdsreduksjon ved modifikasjon av ejektorsystem	
Feilårsak	Reduksjon i VH-aksjoner
A7 Groing i filter	12
A8 Tett drenasje	3
A9 Treg åpning	4
A13 Slitasje kuleventil	1
A15 Slam i kjølevannskum	1
Sum	21

Tabell 24 - Vedlikeholdsreduksjon modifisering av ejektorsystem, alle anlegg

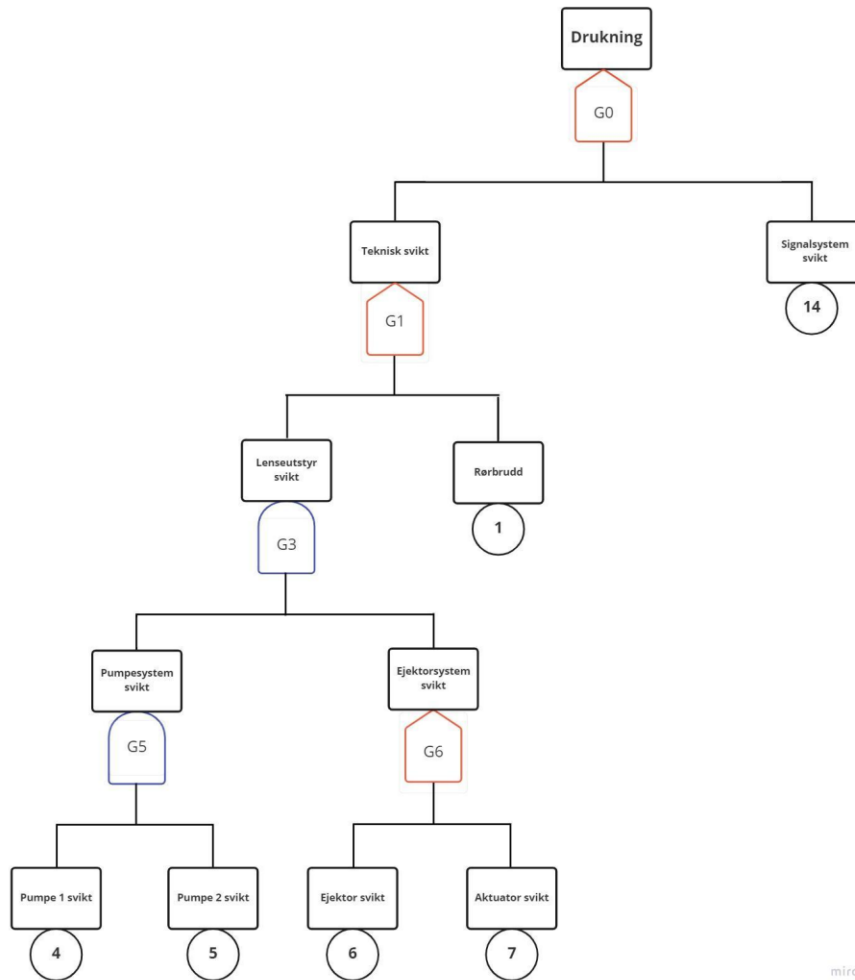
Ved å redusere antall VH-aksjoner knyttet til ejektoren i alle anlegg med 47%, øker den operasjonelle tilgjengeligheten til systemet. Økningen er visualisert i Figur 46.



Figur 46 – Tilgjengelighet, modffisering av ejektor

7.2.4 Feiltre

Ved å kombinere modifisering av ejektorsystemet og nytt signalsystem, vil behovet for en egen flottør for åpning av aktuatoren være unødvendig. Dette reduserer antall vedlikeholdsobjekter, og gjør dermed feiltreet enklere, som vist i Figur 47. Høyre del av treet har grunnet sammenslåing av måleenhet blitt betraktelig forenklet, med kun en sviktmode, signalsystemsvikt.



Figur 47 – Feiltre, modifisering av signal- og ejektorsystem

Med et ytterligere forenklet feiltre, vil også antall kuttmengder reduseres. Minimale kuttmengder vil i Figur 47 være:

$K_1 = \{1\}$
$K_2 = \{4,5,6\}, K_3 = \{4,5,7\}$
$K_4 = \{14\}$

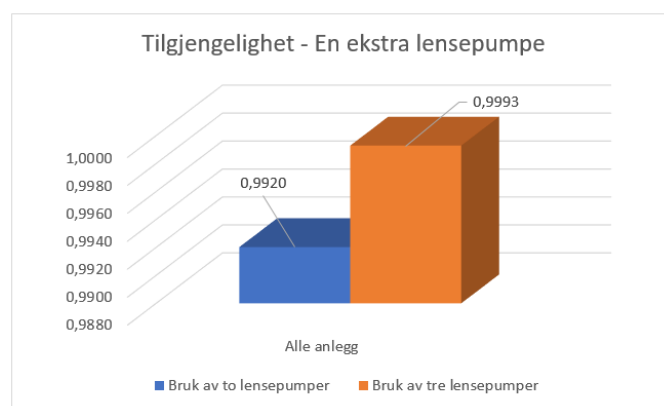
Tabell 25 - Kuttmengder modifisering av signal- og ejektorsystem

7.3 Forbedring 3 - 3 Pumper

Et annet tiltak som kan gjøres for å sikre tilgjengeligheten til anlegget, er å installere en tredje lensepumpe. Ved å gjøre dette introduserer man et nytt objekt som har mulighet til å utføre 100% av anleggets krevde funksjon, slik at man til sammen har fire slike objekter; tre lensepumper og en ejektor.

7.3.1 Sammenligning mellom bruk av 2 og 3 lensepumper

Ved å benytte seg av beregninger for utstyr som står i redundans, kan man regne ut i hvor stor grad tilgjengeligheten øker som følge av å implementere en ekstra lensepumpe. Figur 48 viser en sammenligning av tilgjengelighet ved bruk av hhv. to og tre lensepumper i anlegget. Av figuren kan man lese at tilgjengeligheten øker ved bruk av tre lensepumper. Pumpesystemet vil ha en tilgjengelighet på 99,2% ved bruk av to pumper, mot 99,9% ved bruk av tre pumper. Dette er en økning på ca. 0,7%.



Figur 48 - Tilgjengelighet ved bruk av 3 lensepumper

7.3.2 Implementering og kostnader

Dersom en slik løsning skal gjennomføres, kreves det flere modifikasjoner på anlegget. Blant annet må man modifisere lensekummen til å fungere effektivt med 3 lensepumper stående nede i kummen, man må modifisere signalsystemet til å gi signaler til pumpe nummer 3 også, samt legge opp det elektriske til ytterligere en pumpe. Disse modifikasjonene må også vurderes mtp. vedlikeholdsvennlighet, eksempelvis at det ikke medfører en større risiko å løfte opp lensepumper for vedlikehold med 3 pumper, sammenlignet med eksisterende løsning.

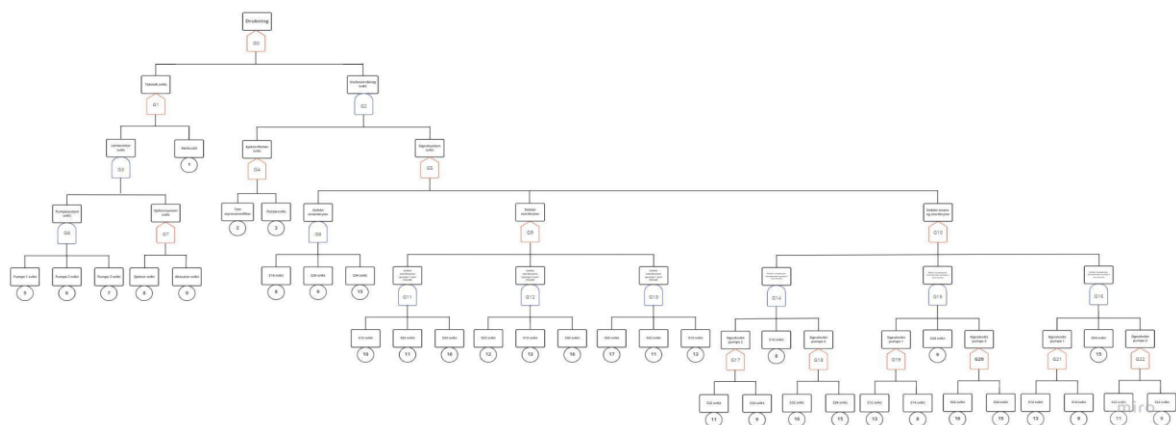
Hovedkostnaden til denne løsningen er likevel knyttet til innkjøp av en ny lensepumpe. Ifølge innkjøpshistorikken til lenseanleggene til TrønderEnergi, har slike lensepumper en kostnad på over 180 000 kroner, som er en svært betydelig sum, sammenlignet med årlige driftskostnader til anleggene.

7.3.3 Vedlikehold

Ved å implementere en ekstra lensepumpe, vil man også få et nytt vedlikeholdsobjekt. Dersom dette skal bli implementert på Svorkmo, vil det bli brukt samme Pumpe som de eksisterende lensepumpene, levert av Xylem. Denne pumpen vil, i likhet med de to andre, ha behov for regelmessige oljeskift, inspeksjoner, reparasjoner o.l. Det vil dermed være rimelig å anta at det blir en økt vedlikeholdskostnad ved en slik løsning. Ettersom lensepumpene i dag kjøres passivt redundant, vil man risikere at lensepumpene står i opptil 2 måneder før denne blir valgt som “hovedpumpe”, som kan gi uønskede konsekvenser mtp. driftssikkerheten til objektet. Man vil til gjengjeld få en antatt økt trygghet mot fullstendig svikt av lenseanlegget. En slik løsning vil derimot ikke hjelpe ved en eventuell signalfeil, da dette må fungere for at pumpene skal starte.

7.3.4 Feiltre

Figur 49 viser hvordan feiltreet endres ved å introdusere en tredje lensepumpe. I dette tilfellet vil det som nevnt være nødvendig å modifisere signalsystemet, i tillegg til å legge til en ny lensepumpe. Dette øker kompleksiteten til feiltreet betraktelig, som figuren illustrerer. Antall kuttmengder vil ha en stor økning, sammenlignet med originalløsningen. På bakgrunn av åpenbar økt kompleksitet, vil antall minimale kuttmengder øke med 10, til totalt 23. Disse vil ikke bli presentert i tabellform, grunnet det store antallet kuttmengder.



Figur 49 - Feiltre, bruk av 3 lensepumper

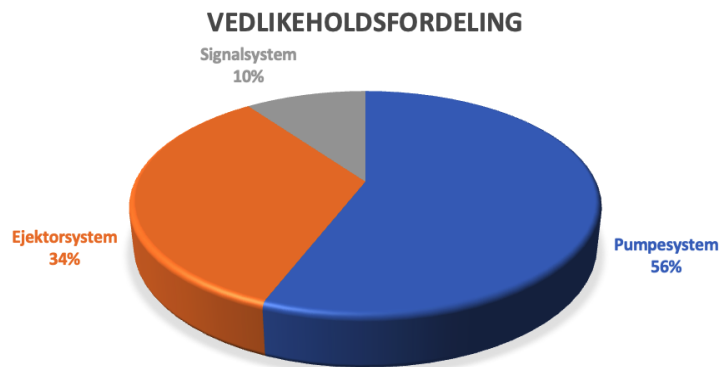
8.0 Resultat

I dette kapittelet vil hovedfunn fra ståstedsanalysen presenteres, og de ulike forbedringene beskrevet i 7.0 Potensielle forbedringer blir oppsummert og sammenlignet.

8.1 Ståstedsanalyse

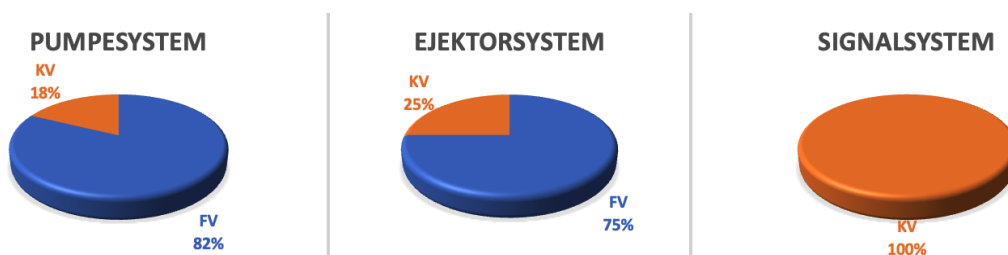
8.1.1 Vedlikehold

I ståstedsanalysen ble det kartlagt totalt 130 vedlikeholdsaksjoner knyttet til systemene i lenseanleggene i KVO. Lensepumpene står for 73 av aksjonene, mens ejektorsystem og signalsystem står for henholdsvis 44 og 13 aksjoner. Figur 50 illustrerer fordelingen mellom objektene.



Figur 50 - Vedlikeholdsfordeling

Det er tydelig at pumpesystemet er mest vedlikeholdskrevende, da disse står for 56% av alt vedlikehold på lenseanleggene. Figur 51 viser fordelingen mellom korrektivt og forebyggende vedlikehold for objektene.

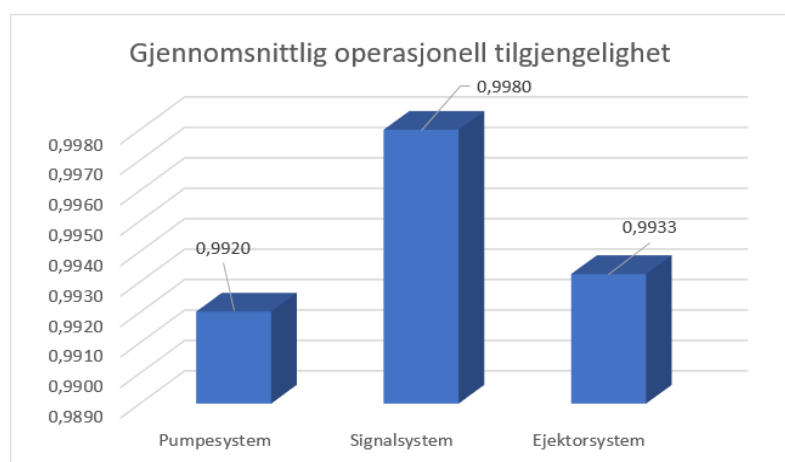


Figur 51 - Sammenligning vedlikehold

For både pumpe- og ejektorsystem er det hovedsakelig utført forebyggende vedlikehold, hvor korrektivt står for henholdsvis 18% og 25% av det totale vedlikehold. Mest fremtredende fra figuren er signalsystemet, hvor det kun har blitt utført korrektivt vedlikehold.

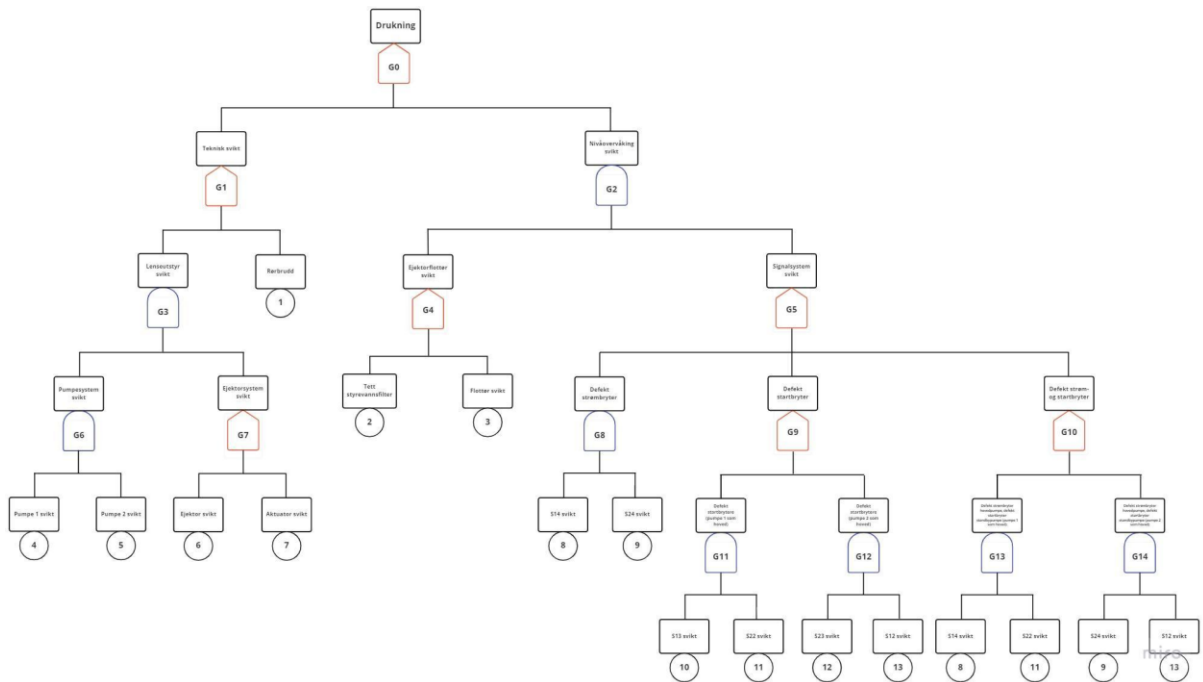
8.1.2 Tilgjengelighet

I ståstedsanalysen kommer det frem at gjennomsnittlig operasjonell tilgjengelighet på de tre systemene er høye, og man ser at anlegget generelt har høy tilgjengelighet. Signalsystemet har i dag den høyeste tilgjengeligheten på 99,8%, sammenlignet med ejektorsystemet og pumpesystemet som har hhv. 99,3% og 99,2% tilgjengelighet, som kan sees i Figur 52.



Figur 52 - Gjennomsnittlig operasjonell tilgjengelighet

8.1.3 Feiltre



Figur 53 - Originalt feiltre

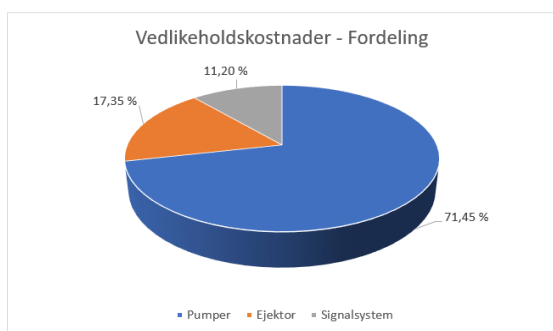
Feiltreet vist i Figur 53 gir en oversikt over mulige sviktmekanismer i det opprinnelige anlegget. Her ser man at det er mange sviktmekanismer som kan lede til at signalsystemet svikter, som igjen fører til at topphendelsen “Drukning” inntreffer. Ved bruk av MOCUS-metoden finner man totalt 13 minimale kuttmengder, som vil si at det er 13 mulige måter for topphendelsen å inntreffe. Disse er vist i Tabell 26.

$K_1 = 1$				
$K_2 = \{4,5,6\}, K_3 = \{4,5,7\}$				
$K_4 = \{2,8,9\},$	$K_5 = \{2,10,11\},$	$K_6 = \{2,12,13\},$	$K_7 = \{2,8,11\},$	$K_8 = \{2,9,13\}$
$K_9 = \{3,8,9\},$	$K_{10} = \{3,10,11\},$	$K_{11} = \{3,12,13\},$	$K_{12} = \{3,8,11\},$	$K_{13} = \{3,9,13\}$

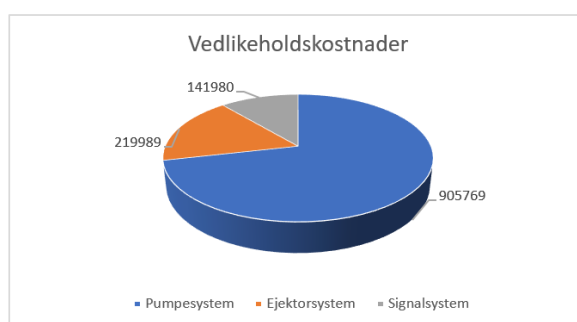
Tabell 26 - Originale kuttmengder

8.1.4 Kostnader

Resultatet fra den økonomiske betraktningen i ståstedsanalysen viser at det i perioden januar 2016 - januar 2022 er brukt omtrent 1,27 millioner kroner på vedlikehold av lenseanleggene i KVO. Dersom man fordeler dette på 6 år, har TrønderEnergi årlig brukt ca. 200 000 kroner på vedlikehold, fordelt på 5 kraftverk. Disse kostnadene er fordelt mellom lensepumper, signalsystem og ejetor, og inneholder både personalkostnader og kostnader forbundet med rehabilitering og kjøp av nytt utstyr. Figur 54 viser kostnadsfordelingen, hvor lensepumpene står for 71,45% av de totale kostnadene.



Figur 54 - Kostnadsfordeling, prosent



Figur 55 - Kostnadsfordeling, kroner

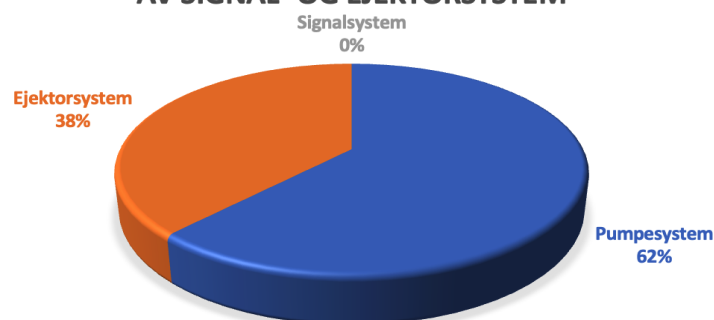
8.2 Sammenligning av forbedringer

8.2.1 Vedlikehold

I 7.0 Potensielle forbedringer undersøkes tre løsninger som blant annet bidrar til en endring i antall vedlikeholdsaksjoner. Det første forslaget tar for seg signalsystemet, som kan oppgraderes ved bruk av lasersensor. Ved å benytte ABB sin LLT100, kan man redusere antall vedlikeholdsobjekter i et signalsystem fra 9 til 2. Vedlikeholdsobjektene som fjernes er de 8 flottørbryterne for pumpene, og det kommer et nytt objekt i form av laseren. Denne krever ingen kalibrering ved installasjon eller drift, og er i teorien vedlikeholdsfri, med en MTBF på 25 år. En slik oppgradering fører til at man eliminerer vedlikeholdet på signalsystemet.

I IFS er det loggført totalt 13 vedlikeholdsaksjoner på flottørbryterne for hele KVO, de siste 6 årene. Med lasersensoren kan man redusere dette antallet til 0. Figur 56 viser ny vedlikeholdsfordeling ved oppgradering av signalsystemet.

VEDLIKEHOLDSFORDELING | OPPGRADERING AV SIGNAL- OG EJEKTORSYSTEM

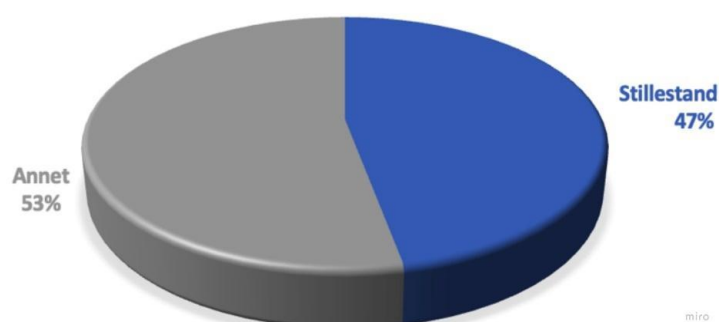


Figur 56 - Vedlikeholdsfordeling ved oppgradering av signalsystem

Et annet system som er vurdert i rapporten, er ejektorsystemet. Slik som det kommer frem i rapporten, er dette også mekanisk styrt per dags dato. Dersom man oppgraderer ejektorsystemet ved å innstallere to magnetventiler på aktuatoren som mater ejektor med drivvann, tilfører man to vedlikeholdsobjekt, magnetventiler. Disse vil på den andre siden erstatte 3 kuleventiler, som reduserer antall vedlikeholdsobjekt med 1. Det kreves to ekstra brytere i form av ekstra flottører for å kommunisere med magnetventilene, dersom signalsystemet ikke oppgraderes samtidig.

Ved å gjennomføre en oppgradering av signalsystemet og ejektorsystemet parallelt, bidrar dette til automatisering av testkjøring av ejektorsystemet. I ståstedsanalysen ser man at 47% av vedlikeholdet på ejektorsystemet i KVO er knyttet til at systemet står lenge mellom hver gang det testes, samt vedlikehold relatert til testing, som illustrert i Figur 57.

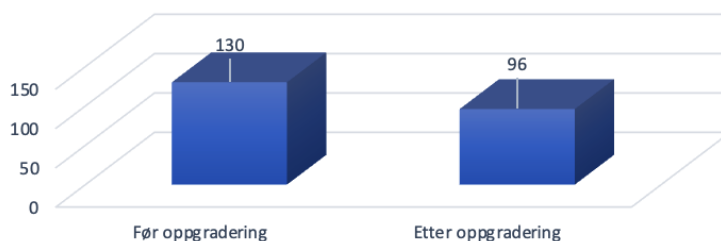
VEDLIKEHOLDSFORDELING | EJEKTORSYSTEM



Figur 57 - Vedlikeholdsfordeling på ejektorsystem

En oppgradering av ejektorsystemet kombinert med en oppgradering av signalsystemet kan dermed redusere det totale vedlikeholdet på ejektorsystemet med 21 vedlikeholdsaksjoner, som sammen med eliminering av vedlikehold på signalsystemet reduserer totalt vedlikehold på disse systemene i KVO med 34 vedlikeholdsaksjoner, som vist i Figur 58. Dette antallet gjelder altså dersom en slik oppgradering blir implementert på alle anleggene i KVO.

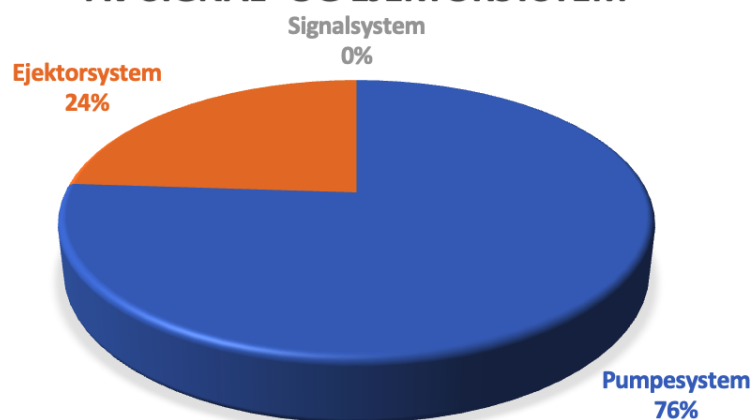
REDUSERING AV VEDLIKEHOLD | EJEKTOR- OG SIGNALSYSTEM



Figur 58 - Endring i vedlikehold ved modifisering av signal- og ejektorsystem

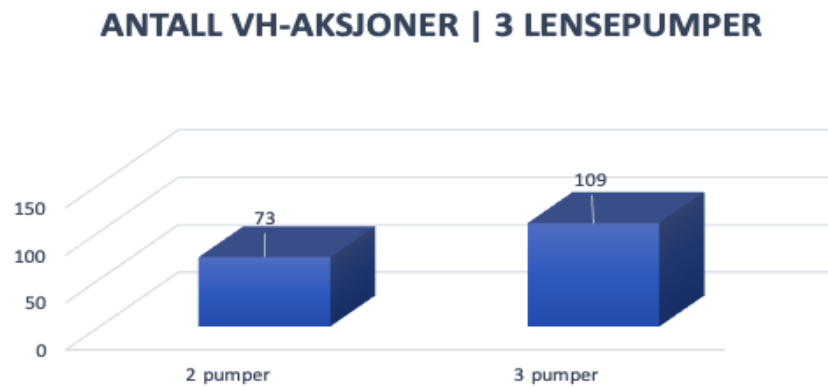
Vedlikeholdet vil deretter være fordelt som vist på Figur 59, hvor man ser at 76% av det totale vedlikeholdet er på pumpene, og 24% på ejektorsystemet.

VEDLIKEHOLDSFORDELING | OPPGRADERING AV SIGNAL- OG EJEKTORSYSTEM



Figur 59 - Vedlikeholdsfordeling ved oppgradering av signal- og ejektorsystem

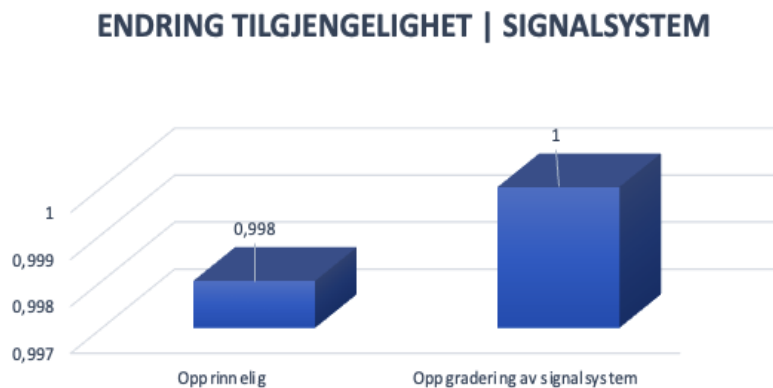
Det siste forslaget er oppgradering av pumpesystemet, ved implementering av en tredje pumpe. En slik oppgradering vil føre til at pumpesystemet får flere vedlikeholdsobjekter, og derav flere vedlikeholdsaksjoner. Opprinnelig er det 73 vedlikeholdsaksjoner registrert på pumpesystemene i KVO de siste 6 årene, jevnt fordelt over de eksisterende pumpene. Dersom samme type pumpe installeres på hvert anlegg, kan antall vedlikeholdsaksjoner øke til 109, som vist i Figur 60.



Figur 60 – Totale vedlikeholdsaksjoner ved bruk av 3 lensepumper

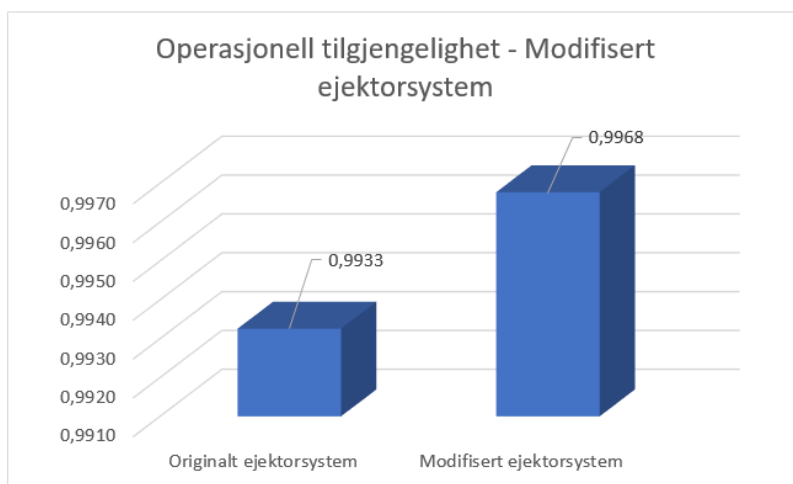
8.2.2 Tilgjengelighet

I forslaget til oppgradering av signalsystemet fjernes alle eksisterende vedlikeholdsobjekter, som erstattes av en vedlikeholdsfri laser. Dette gir systemet en tilgjengelighet på 100%, som vist i Figur 61.



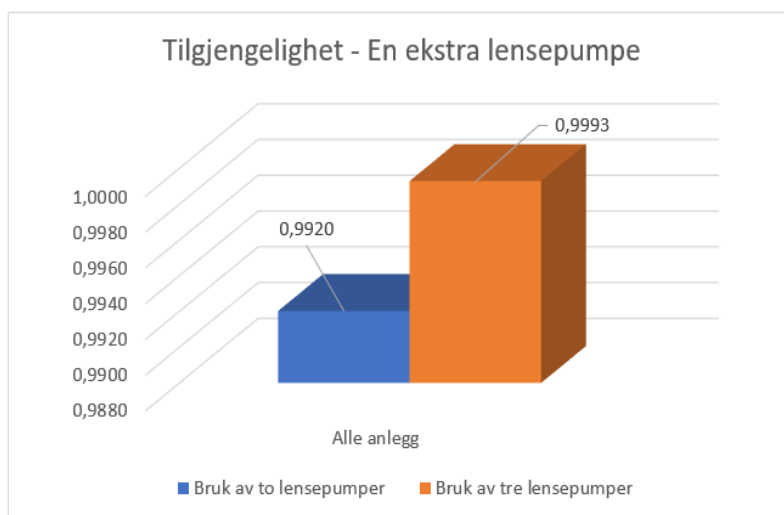
Figur 61 - Tilgjengelighet ved oppgradering av signalsystem

Ved oppgradering av ejektorsystem i tillegg til signalsystem, reduseres antall vedlikeholdsaksjoner med 47%. Dette øker den operasjonelle tilgjengeligheten på systemet til 99,7%, som er en økning på 0,4%. I Figur 62 ser man endring i tilgjengelighet fra originalt til modifisert ejektorsystem.



Figur 62 - Tilgjengelighet ved oppgradering av ejektor- og signalsystem

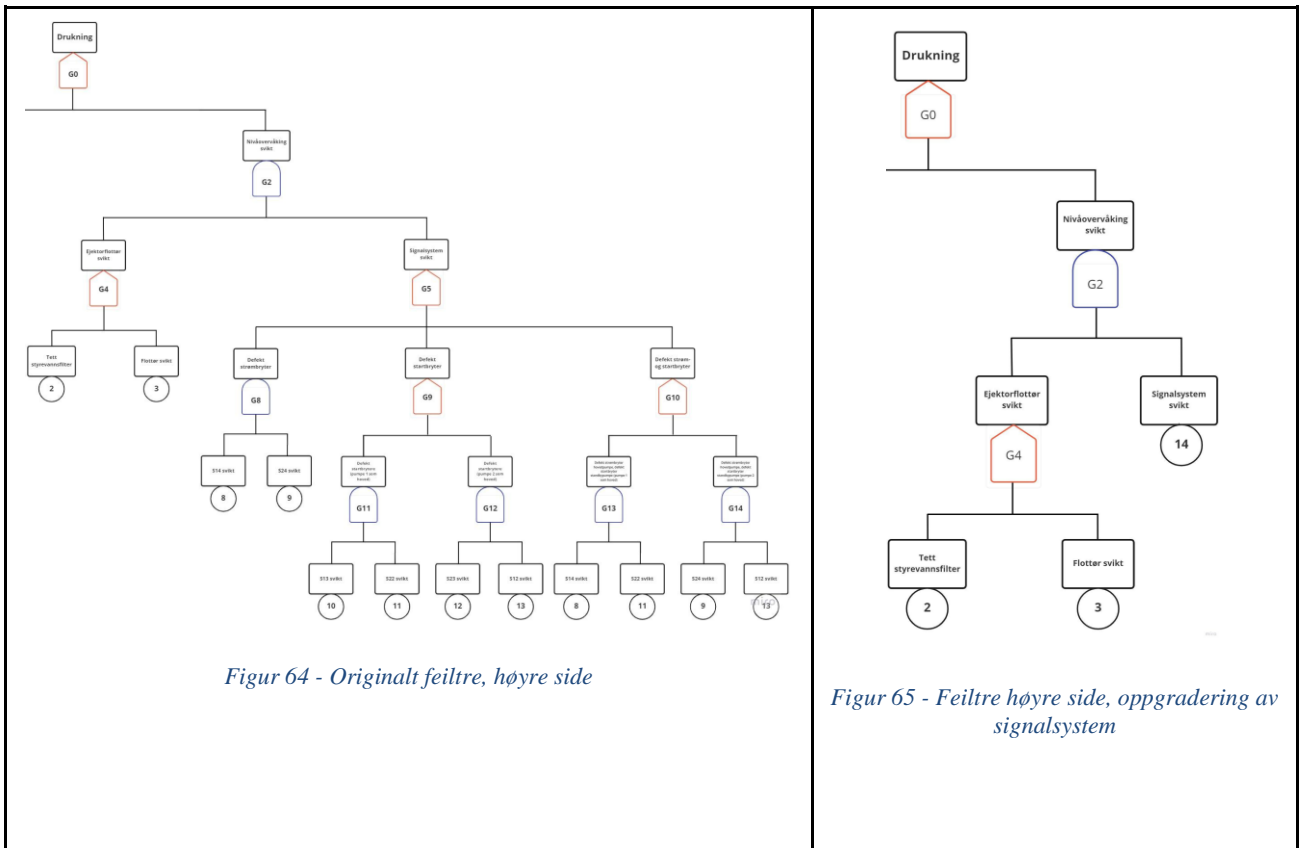
Den siste forbedringen som er vurdert, er å installere en tredje lensepumpe. Den tredje pumpen gjør at systemet har 3 enheter som hver for seg kan levere 100% kapasitet. Tilgjengeligheten til pumpesystemet vil da økes fra 99,2% til 99,9%. Dette er vist i Figur 63.



Figur 63 - Tilgjengelighet ved bruk av 3 lensepumper

8.2.3 Feiltre

Ved oppgradering av signalsystemet vil man forenkle høyre gren av feiltreet betraktelig, som vist i Figur 64 og 65. Dette resulterer i en reduisering på 8 minimale kuttmengder, og man står da igjen med 5 minimale kuttmengder, som vist i Tabell 27. Endringen fører også til kuttmengder av lavere orden. K_4 og K_5 blir redusert til 2.orden, hvilket vil si, to hendelser må inntreffe før drukning.



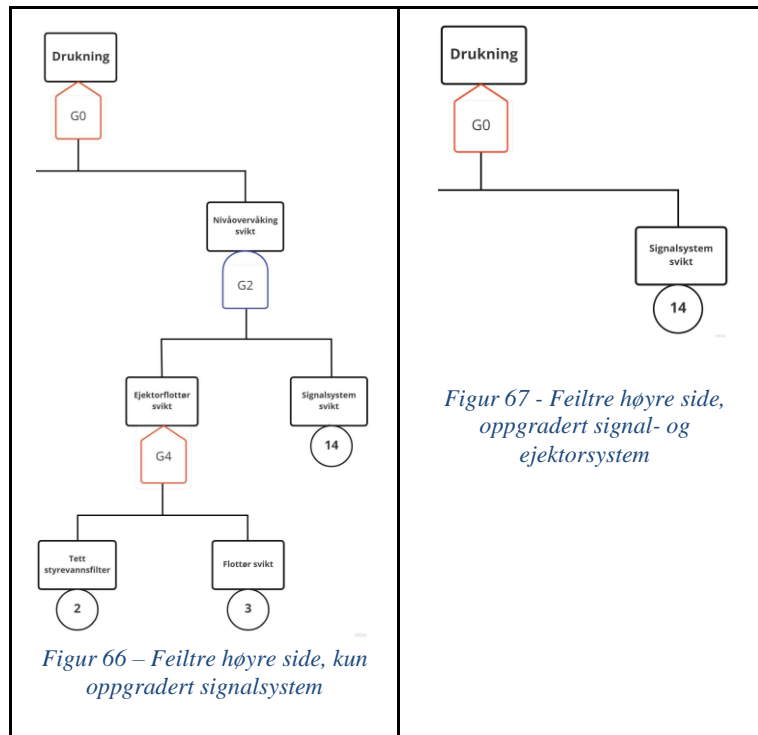
Figur 64 - Originalt feiltre, høyre side

Figur 65 - Feiltre høyre side, oppgradering av signalsystem

$K_1 = \{1\}$
$K_2 = \{4,5,6\}, K_3 = \{4,5,7\}$
$K_4 = \{2,14\}, K_5 = \{3,14\}$

Tabell 27 - Kuttmengder, oppgradering av signalsystem

Dersom man i tillegg til oppgradering av signalsystemet velger å oppgradere ejektorsystemet, vil den minimale kuttmengden reduseres ytterligere til 4. K_4 blir da redusert til 1. orden. I Figur 67 ser man hvordan høyre gren av feiltreet vil se ut, kuttmengdene presenteres i Tabell 28.



$K_1 = \{1\}$
$K_2 = \{4,5,6\}, K_3 = \{4,5,7\}$
$K_4 = \{14\}$

Tabell 28 - Kuttmengder, oppgradert signal- og ejektorsystem

Installering av en tredje pumpe vil påvirke feiltre negativt. Her vil det tilkomme 10 nye minimale kuttmengder, dersom man ikke også oppgraderer signalsystemet.

8.2.4 Kostnader ved oppgradering av signalsystem

I kapittel 7.1 ble det introdusert en alternativ løsning til dagens flottørbaserte signalsystem, ved bruk av en lasersensor. Denne sensoren har en enhetskostnad på 16 300 kr eks. mva., hvor det må beregnes noe tilleggskostnad ifbm. montering og oppsett. Lasersensoren er ifølge ABB vedlikeholdsfri og uten behov for kalibrering, slik at denne skal fungere pålitelig over en lengre periode, opptil 25 år. Dette betyr at vedlikeholdskostnadene til signalsystemet i teorien reduseres fra 11,20% til 0% av

Implementeringskostnader per lenseanlegg	
Laser	16 300
Tilleggsutstyr	3 000
Installering	20 700
Sum	40 000

Tabell 29 - Implementeringskostnad signalsystem

totalkostnad. Tabell 29 viser estimert implementeringskostnad for denne løsningen, per anlegg. Tabell 30 viser nåverdier av oppgradering av ett lenseanlegg, ved bruk av ulike verdier for VH-aksjoner og antall år.

Antall VH-aksjoner	Kalkulasjonsrente	Antall år	NNV	IRR
1	10 %	2	-22 053	-34,61 %
2			-4 106	2,26 %
3			13 842	35,01 %
1		3	-14 283	-11,71 %
2			11 433	25,63 %
3			37 150	57,83 %
1		4	-7 220	1,35 %
2			25 559	37,05 %
3			58 339	67,77 %

Tabell 30 - Nåverdiberegninger signalsystem, ved oppgradering av ett anlegg

8.2.5 Kostnader ved oppgradering av ejektorsystem

For å fjernstyre hovedventilen som åpner vanngjennomstrømning til ejetor, ble det i 7.0 Potensielle forbedringer presentert en modifisert versjon av dagens vannstyrte aktuator. Denne tar i bruk to magnetventiler, som får signal fra nivåovervåking i lensekummen. Denne oppgraderingen fungerer best i kombinasjon med nivåmåling vha. laser, ettersom det er enkelt å legge inn tilleggsnivåer. Alternativt må to nye flottørbrytere installeres, som øker implementeringskostnaden.

Kostnader forbundet med denne løsningen innebærer to nye magnetventiler, og modifisering av rør- og signalsystem, nøyere beskrevet i 7.2.2 Implementering og kostnader. Tabell 31 viser dette.

Implementeringskostnader per lenseanlegg	
Magnetventil, 2 stk.	4 000
Rørdeler	1 000
Installering	5 000
Sum	10 000

Tabell 31 - Implementeringskostnad ejektorsystem, per lenseanlegg

8.2.6 Kostnader ved implementering av 3 lensepumper

Dersom tilgjengeligheten skal sikres ved å installere en tredje lensepumpe i lensekummen, vil det være flere kostnadsbarrierer. Den største av disse er forbundet til innkjøp av ny Pumpe, som er estimert til å koste om lag 180 000 kroner. Andre kostnader kan forekomme ifbm. montering, modifisering av lensekum og tilkobling. Det er usikkert hvor store disse kostnadene er, men innkjøp av ny lensepumpe vil likevel være den høyeste kostnaden ved en slik forbedring. At totalkostnaden ved implementering av en ekstra lensepumpe er over 200 000 kr, er likevel rimelig å anta.

9.0 Diskusjon

I dette kapitlet vil resultatene fra oppgaven drøftes. Det tas utgangspunkt i delkapitlene i oppgaven, hvor ulike synspunkter, usikkerheter og faktorer settes opp mot hverandre, og validiteten til resultatene vurderes. 8.0 Resultat er delt inn i vedlikehold, tilgjengelighet, feiltre og kostnader. Denne strukturen brukes også i diskusjonen, for å gjøre den oversiktlig.

9.1 Resultatmål 1: Ståstedsanalyse

I ståstedsanalysen ble antall vedlikeholdsaksjoner brukt som utgangspunkt for å gjøre beregninger på for eksempel MTBM på systemene. Målet med oppgaven var å finne tilgjengeligheten til komponentene i lenseanlegget, for deretter å anbefale en oppgradering av anlegget som sikrer total tilgjengelighet, og som samtidig forenkler vedlikehold. Vi oppdaget at det er mangelfull rapportering i IFS, noe vi også fikk bekreftet av vår kontaktperson i TrønderEnergi. Dette har ført til at det er en del usikkerhet knyttet til MTBM, som igjen påvirker beregninger av tilgjengelighet. Som et ledd i validering av oppgaven, har vi diskutert og verifisert beregninger med vår kontaktperson, i tillegg til å inkludere andre faktorer i betraktninger ved valg av forbedring.

Vedlikehold og tilgjengelighet

Vi har valgt å beregne gjennomsnittlig tilgjengelighet for alle lenseanleggene knyttet til KVO. På grunn av manglende tilgang på data, som har ført til utfordringer med utregning av MDT, har vi estimert denne til 40 timer. Det vil si at vi har antatt at en komponent er ute av drift under 2 dager. Dette tallet er en relativt god estimering på lensepumpene, da vi har snakket med kontaktperson i TrønderEnergi for å få hjelp til å vite ca. hvor lenge pumpene er ute av drift når det utføres vedlikehold. På signalsystemet fører dette tallet med seg stor usikkerhet, og operasjonell tilgjengelighet endrer seg mye dersom dette tallet er større enn 40t. Signalsystemet og ejektorsystemet blir i dag kontrollert i starten av hver måned.

Ved utregning av tilgjengeligheten har vi tatt utgangspunkt i at både ejektor- og signalsystem har en kontinuerlig driftstid over 6 år, som tilsier 51 840 timer. Vi bruker dette estimatet for å få frem at det har vært en del problemer med ejektoren, som har blitt oppdaget under stasjonsrunden. Det er også her knyttet mye usikkerhet til estimatene, da det er vanskelig å

vite hvor lenge ejektoren eventuelt har vært ute av drift. I teorien kan problemet ha oppstått kort tid etter forrige kontroll, som videre vil påvirke operasjonell tilgjengelighet. Vi har likevel valgt å bruke disse tallene i oppgaven, for å ha et sammenligningsgrunnlag mellom de tre hovedsystemene; pumpeystem, signalsystem og ejektorsystem. Som nevnt, har vi i tillegg til informasjon hentet fra IFS vært i samtaler med vedlikeholdspersonell på anleggene, i et forsøk på å validere beregningene.

Feiltre

Ved konstruksjon av feiltre, finnes det flere måter å lage feiltreet på, som vil gi topphendelsen. Det kan derfor være enklere, eller mer komplekse måter å sette opp hendelsene som leder til vår topphendelse, drukning, enn hva som er gjort i denne rapporten. Feiltre blir i denne oppgaven brukt for å vise hvordan kompleksiteten til anlegget endres ved ulike modifikasjoner. Det er dermed ikke utslagsgivende for vårt resultat om feiltreet kunne blitt konstruert på en enklere måte, da samme feiltre brukes som utgangspunkt for alle forbedringer. I ståstedsanalysen presenteres et utvalg kjente feilårsaker for pumpe og ejektor. Disse er utelatt fra feiltrærne, ettersom de ville blitt veldig komplekse og lite relevant for oppgavens hovedfokus. Det kunne vært interessant å tallfeste sannsynligheten for topphendelsen, men dette viste seg vanskelig å gjennomføre grunnet mangel på tilgjengelighet på enkelte inngangshendelser. Feiltreet er derfor kun vurdert kvalitativt.

Kostnader

Det er noe usikkerhet knyttet til eksisterende vedlikeholdskostnader relatert til signalsystemet. Etter dialog med kontaktperson i TrønderEnergi, har vi estimert de faktiske eksisterende driftsutgifter til 124 000 kr per lenseanlegg. Dette tilsier en kostnad per utrykning på ca. 10 000 kr, som tilsvarer 2 årlige aksjoner. Dette er en nokså drastisk økning fra antall aksjoner loggført i IFS, hvor historikken viser ca. 0,5 årlige utrykninger. Dersom det faktisk er utført flere vedlikeholdsaksjoner på de andre systemene også, kan dette påvirke resultatet. Disse var dog vanskeligere å finne valid informasjon om, og etter samtale med kontaktperson ble det tatt utgangspunkt i tall funnet på IFS for både pumpe- og ejektorsystem.

Ved loggføring i IFS blir kostnader fordelt mellom to kategorier, ekstern og personell. På denne måten kan man skille mellom eksterne kostnader, som innkjøp av utstyr og

reservedeler, og personalkostnader. Under informasjonsinnhentingene viste det seg imidlertid at denne kostnadsfordelingen ikke ble regelmessig brukt, slik at de eksterne kostnadene var svært lave, og i mange tilfeller lik 0. Derfor ble disse eksterne og personalkostnader i ståstedsanalysen slått sammen, som videre betyr at man ikke vet hvor stor del av total kostnadene eksterne og personalkostnader står for. Dersom dette hadde vært korrekt loggført, kunne man brukt informasjon om personalkostnad og kostnad per ansatt per time til å beregne hvor lange de ulike VH-aksjonene har vært. Dette kunne gitt en god indikasjon på den reelle MDT til de ulike systemene.

9.2 Resultatmål 2: Forbedringsforslag

9.2.1 Oppgradering av signalsystem

Vedlikehold og tilgjengelighet

Resultatene presentert relatert til vedlikehold viser totalt 13 vedlikeholdsaksjoner, som betyr ca. 3 aksjoner per lenseanlegg. Ved oppgradering av signalsystemet i et lenseanlegg vil signalsystemet i teorien bli vedlikeholdsfritt, og vi har derfor sagt at antall vedlikeholdsaksjoner reduseres til 0. Dette vil videre føre til at tilgjengeligheten til anlegget øker til 100%. Dette er gjort selv om vi er klar over at det er mye usikkerhet knyttet til dette, og at det skal mye til for at en enhet er vedlikeholdsfri. Vi har likevel valgt å bruke MTBF på 25 år, ettersom dette er påstander fra produsent og leverandør ABB, og at vi ikke har en måte å verifisere dette, uten å selv implementere og teste laseren.

Feiltre

Ved å oppgradere signalsystemet, reduseres antall minimale kuttmengder til 5. Dette er en direkte konsekvens av at man reduserer antall komponenter som kan svikte i systemet. Endringen gjør også at man får to nye kuttmengder av 2. orden. Resultatet blir altså en reduksjon av antall måter topphendelsen kan inntreffe, men også en potensielt kortere vei til svikt på grunn av de nye kuttmengdene. Det kan diskuteres om signalsystemet blir mindre pålitelig av den grunn.

Basert på tidligere hendelser ser man at det eksisterende signalsystemet krever en del vedlikehold pga. svikt i flottørbrytere. Installering av en vedlikeholdsfri laser vurderes til å være mer pålitelig enn originalt system, ettersom den har en oppgitt MTBF på 25 år. Dersom det vurderes at systemet blir for lite pålitelig, kan man velge å installere en ekstra laser for å

få et redundant system. Vi har ikke tatt med dette i våre resultater, men det kan undersøkes nærmere, dersom det er et behov for dette.

Kostnader

Signalsystemet er i seg selv en antatt mindre investering på rundt 40 000 kr. Ettersom det var spredning mellom loggført historikk og opplevd vedlikeholdshyppighet for TrønderEnergis vedlikeholdspersonell, ble det presentert nåverdiberegninger ved bruk av ulike vedlikeholdsaksjoner og antall år. Dette ble gjort for å gjøre det mulig å vurdere den kortsiktige lønnsomheten ved implementering av en slik løsning. Det ble kun gjort nåverdiberegning for oppgradering av signalsystemet, ikke for modifisering av ejektorssystem eller implementering av en tredje lensepumpe. Grunnen til dette er svært usikre kostnadsestimater, ettersom det som nevnt er vanskelig å kommentere eventuelle besparelser ved forbedringene uten å gjennomføre testing av disse. For modernisering av signalsystem har vi fått oppgitt en MTBF på 25 år, som i teorien betyr at det ikke trengs vedlikehold på signalsystemet, slik at alle eksisterende kostnader bortfaller. Antagelsen om investeringskostnad er forsøkt validert gjennom samtaler med produsent, men kan også vise seg å være unøyaktig.

9.2.2 Oppgradering av ejektorsystem

Vedlikehold og tilgjengelighet

Resultatene viser at det ikke er mye å hente på å oppgradere ejektorsystemet alene, da man i første omgang vil redusere antall vedlikeholdsobjekter i form av ventiler, men må legge til to ekstra flottører i eksisterende signalsystem for å kommunisere med magnetventilene. Vi ser derfor at det er hensiktsmessig at oppgradering av ejektorsystemet skjer parallelt med, eller etter oppgradering av signalsystemet. Denne typen oppgradering vil uten et moderne signalsystem tilføre ekstra kostnader og flere vedlikeholdsobjekter, som er uønsket. Vi har også sagt at det er stor sannsynlighet for at vi reduserer vedlikehold knyttet til at systemet står i en posisjon lenge, og vedlikehold knyttet til den mekaniske testingen av dagens løsning, med forbehold om feil antagelser. Dette er også avhengig av at det i PLS-enheten blir programmert inn automatiske sekvenser for testing av ejektorsystemet. Dette vil føre til at ejektorsystemet blir mer vedlikeholdsvennlig, som vil redusere sannsynligheten for personskader tilknyttet vedlikehold i kum. Det er loggført 44 vedlikeholdsaksjoner på ejektorsystemene i KVO, som betyr i gjennomsnitt ca. 9 aksjoner per kraftverk. I beste fall

kan vedlikeholdet på ejektorsystemet i et lenseanlegg reduseres med 4 aksjoner, som tilsvarer 47% av totalt vedlikehold på dette systemet. Dette må dog verifiseres gjennom fysisk testing. Om en slik modifisering av ejektorsystemet vil redusere vedlikeholdsfrekvensen så drastisk som 47%, er vanskelig å bestemme uten å gjennomføre omfattende tester. Det vil likevel være fordeler med en slik løsning, da man har mulighet til å fjernstyre åpning til ejetor, gitt at oppkobling til PLS og driftssentralen ikke viser seg å være for utfordrende.

Kostnad

Om man velger å oppgradere ejektorsystemet parallelt med signalsystemet, vil det sannsynligvis medføre en ekstrakostnad på ca. 10 000 kr per anlegg. Ved automatisering av vedlikeholdsrutiner vil det være mulig å redusere antall vedlikeholdsaksjoner, som igjen vil redusere driftskostnader. Vi ser fra resultatene at kostnadene knyttet til vedlikehold på ejektorsystemene i KVO tilsvarer ca. 220 000 kr, hvilket betyr en gjennomsnittlig kostnad på 44 000 kr på hvert anlegg. Med en vedlikeholdsreduksjon på 47%, tilsvarer dette en teoretisk besparelse på 20 680 kr per anlegg over 6 år.

Feiltre

Når man ser på oppgradering av både signal- og ejektorsystem, vil den minimale kuttmengden reduseres til 4. Man vil da betrakte åpning av ejetor som en del av signalsystemet, da aktuator vil være automatisk styrt og avhengig av signalsystemet for å utøve krevd funksjon. Vi har valgt å ikke presentere feiltreet til ejektorsystemet isolert, da dette vil ha en negativ påvirkning på kuttmengder og komplisere systemet betraktelig. Vi ser det som nevnt ikke hensiktsmessig å oppgradere ejektorsystemet alene.

9.2.3 Oppgradering av pumpesystem

Vedlikehold og tilgjengelighet

Velger man løsningen hvor det installeres en ekstra pumpe, vil det oppstå flere vedlikeholdsobjekter. Dette vil mest trolig også øke antall vedlikeholdsaksjoner på pumpene, fra 73 til 109. Per kraftverk vil dette bety en økning fra 15 til 23 vedlikeholdsaksjoner. På bakgrunn av vedlikeholdshistorikk registrert i IFS ser vi at vedlikeholdet på pumpesystemet i dag er jevnt fordelt mellom de to eksisterende pumpene. Vi har derfor antatt at man kan forvente tilsvarende mengde vedlikehold på en tredje pumpe, dersom det er samme type pumpe. Det er også mulig at man grunnet mindre driftstid på hver pumpe vil se en reduksjon i

vedlikeholdsaksjoner på hver pumpe, men totalt vil det likevel være rimelig å anta at antall aksjoner øker.

Selv om man fra et vedlikeholdsperspektiv ikke ser de åpenbare fordelene ved å installere en ekstra pumpe, så er det implementering av en ekstra pumpe som gir størst utslag på tilgjengeligheten til de tre systemene. Tilgjengeligheten til pumpesystemet vil øke fra 99,2 % til 99,9%, som er en økning på 0,7%. Dette tallet er dog noe misvisende, da det betrakter total systemtilgjengelighet for pumpesystemet. Siden vi nå har 3 pumper som står i redundans, vil det være mer som skal til for at pumpesystemet i sin helhet skal havarere. Tilgjengeligheten til hver enkelt lensepumpe vil imidlertid være den samme som før oppgradering, og altså kreve like mye vedlikehold.

Kostnader

Oppgradering av pumpesystemet er den oppgraderingen som har de høyeste implementeringskostnadene, på rundt 200 000 kr per kraftverk. Dette tilsvarer hva TrønderEnergi årlig bruker på å vedlikeholde alle de 5 anleggene i KVO. Dette tallet fører med seg en hel del usikkerhet. Vi har fått bekreftet at en ny pumpe koster rundt 180 000 kr. Det er imidlertid stor usikkerhet knyttet til de andre kostnadene. Dette gjelder eksempelvis signalsystem til denne, mulige behov for modifikasjon av lensekum, tilkobling til strømmett osv. Det er ikke gjort forsøk på å estimere disse verdiene, da den høye kostnaden for innkjøp av ny pumpe er høy nok til å vise at en slik løsning vil være ulønnsom, selv om påliteligheten til anlegget øker.

Feiltre

Implementering av tre lensepumper vil ha en negativ effekt på feiltreet. Det er uansett oppsett av et nytt feiltre sikkert at det vil bli mer komplekst enn originaltreet, siden det blir nødvendig å introdusere nye flottørbrytere. Dette kunne blitt løst ved å kombinere modernisering av signalsystem og bruk av 3 pumper, men basert på store investeringskostnader, fant vi dette unødvendig å vise.

9.3 Resultatmål 3: Risikovurdering

Risikovurderingen i denne oppgaven tar utgangspunkt i konsekvensen drukning av anlegg. Vanligvis vil man i en slik vurdering analysere mulige hendelser, mulige konsekvenser, og deres sannsynligheter. Denne analysen undersøker kun mulige hendelser og gjør en vurdering på deres sannsynligheter, ettersom konsekvensen er predefinert. Grunnen til at man har tatt utgangspunkt i denne konsekvensen, er fordi drukning innebærer havari av alle systemene i lenseanlegget. Alle delsystemene har samme hensikt, og om en skulle svikte, er det som regel et delsystem som er klar for å ta over jobben. Det er i grunnen ikke noen store konsekvenser ved havari av enkelt system, men om flere svikter vil sannsynligheten for drukning øke.

Forenklingen av risikovurderingen har hatt en effekt på risikomatrisen, som setter sannsynligheten og konsekvensen til hendelsene i en tabell. Ettersom man kun ser på konsekvensen drukning, vil alle hendelser få samme konsekvensnivå, og av den grunn være i samme kolonne. Det er også viktig å være klar over at risikomatrisen er en forenkling, da det benyttes enkle graderinger som lav, moderat og høy i en 3x3 matrise. Ofte bruker man også graderinger som veldig lav og veldig høy, men dette ble vurdert som unødvendig, ettersom alle hendelsene knyttes til samme konsekvens. Dette fører til at man mister detaljnivå i matrisen. Det er også viktig å være klar over utformingen av matrisen. Fargene som indikerer risikoen knyttet til hendelsene er forskjellige fra matrise til matrise. Fargekombinasjonen som ble valgt vurderes som mest passende for risikoen man vil beskrive. Figur 68 viser fargekombinasjonene som ble vurdert for risikomatrisen. Alternativet til høyre inneholder mange røde felt, som indikerer uakseptabel risiko. Konfigurasjonen endrer risikonivået ved lav sannsynlighet og lav konsekvens til gult, og dette er ikke passende. Gult indikerer at tiltak bør vurderes nærmere, men dette stemmer ikke med vurderingen som er gjort av systemet.



Figur 68 - Alternative risikomatriser

For å kunne identifisere alle relevante sviktmoder som kan føre til drukning, må man forhøre seg med eksperter. Man må ha en gjennomgående forståelse av systemet og alle komponentene som inngår, i tillegg til å ta for seg vedlikeholdshistorikken. Sviktmoder er derfor drøftet med kontaktperson i TrønderEnergi. Bjerkås har 15 års erfaring som

vedlikeholdsingeniør, og erfaringen han sitter på er viktig å ta til betraktning. Vurderinger rundt sannsynligheten for svikt av delsystemer er også diskutert.

9.4 Resultatmål 4: Valg av forbedring

Å gi et forslag til hvordan anleggets vedlikeholdsvennlighet kan økes, samtidig som anleggets tilgjengelighet opprettholdes eller økes, inneholder mange usikre faktorer. Det er vanskelig å vurdere både lønnsomhet og hvor enkelt installasjon av forbedringer er, grunnet prosjektgruppens mangel på erfaring. Eksempelvis reduksjon av VH-aksjoner på ejektor som følge av fjernstyring vil være umulig å forutse hvor effektivt er på forhånd. Vi har derfor brukt verdier fra et beste tilfelle, hvor alle aksjoner som prosjektgruppen anser kan løses ved fjernstyring, har blitt tatt med i kostnadsvurderingen av denne. Det er i praksis vanskelig å løse denne utfordringen uten å fysisk teste ved implementering. Denne oppgaven er ment å gi en indikasjon på hvordan vedlikehold på lenseanlegget kan forenkles og effektiviseres, og den kan som følge av mangel på erfaring inneholde uriktige beregninger og estimater. Vi vil derfor vurdere forbedringene fra et helhetlig perspektiv, og inkludere andre aspekter enn kun kostnader og VH-aksjoner.

Basert på fremlagt informasjon om vedlikeholdsaksjoner og tilhørende kostnader, kan det virke ulogisk å ikke ta for seg forbedring av tilgjengeligheten til lensepumpene, som står for den største delen av vedlikehold og kostnader. I løpet av oppgaven ble det gjort flere forsøk på å kontakte selskapet som utfører reparasjon på lensepumpene. Det ble imidlertid klart at selskapet ikke var interessert i å dele dokumenter som inneholdt kostnader og hvilke reparasjoner som ble utført, slik at en detaljanalyse av forbedringspotensial til lensepumpene ble vanskelig. I tillegg vil en slik forbedring i beste fall hjelpe TrønderEnergi indirekte, dersom selskapet hadde valgt å bruke eventuelle forbedringspotensialer vi hadde funnet vedr. lensepumpene.

Basert på våre vurderinger ser vi det derfor som mest hensiktsmessig å oppgradere signalsystemet, og eventuelt ejektorsystemet. Vi har kommet frem til at signalsystemet er utdatert, og det gjør fremtidige moderne integrasjoner vanskelig å implementere. Ved oppgradering av signalsystemet vil man ha kontinuerlig overvåking av nivået i lensekummen, man vil oppnå en kraftig reduksjon i vedlikehold, og spare selskapet for unødvendige kostnader i forbindelse med utrykning. I tillegg til dette, vil man senke

sannsynligheten for at systemet ikke virker som det skal. Dersom det skulle være feil med systemet, vil kontrollrommet få beskjed om at signalsystemet ikke virker som det skal, og de kan tilkalle personell etter behov. Dette er en klar forbedring fra å oppdage feil tilfeldig under inspeksjoner, eller ved at pumpene ikke starter. Kostnader relatert til denne oppgraderingen er omtrent 40 000 kr per anlegg, noe som kan ansees som høyt, men hvis tar med vurderinger av nåverdi og driftsbeparelser vil dette være inntjent etter 3 år, dersom våre antagelser om 2 årlige vedlikeholdsaksjoner holder fast.

Når man først har tatt kostnadene ved å oppgradere signalsystemet, er det en mindre kostnad på 10 000 kr per anlegg som skal til for å gjennomføre oppgradering av ejektorsystemet. Ved å også gjennomføre denne oppgraderingen, kan man automatisere store deler av vedlikeholdet relatert til ejektorsystemet, og man kan testkjøre de ulike komponentene i lenseanlegget hyppigere, uten at det er behov for driftspersonell til stede. Dette vil forenkle vedlikehold og vedlikeholdsvennlighet knyttet til lenseanlegget betraktelig.

9.5 Feilkilder

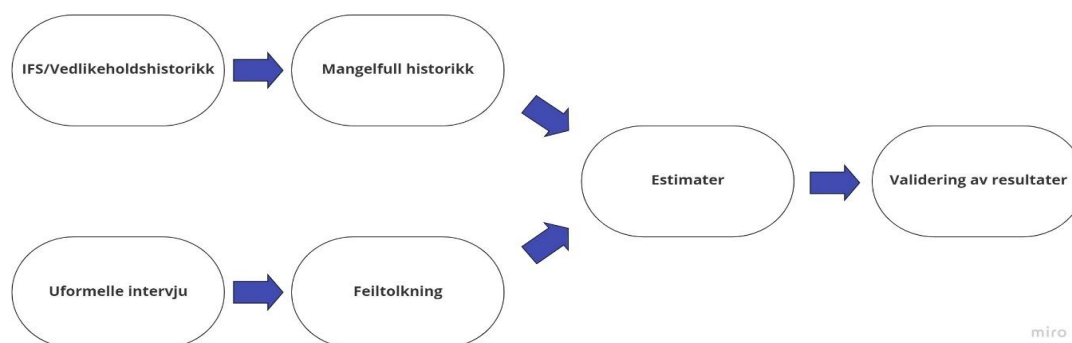
Det er i ståstedsanalysen gjennomført informasjonssinnhenting av store mengder data. Denne dataen har blitt analysert, organisert og behandlet av prosjektgruppen, og den kan derfor inneholde flere feil og mangler. Eventuelle feil kan gjøre utslag på oppgavens resultat, og det tas derfor forbehold om uriktige beregninger og tolkninger av loggførte arbeidsordre. Selv om verdier er diskutert med og validert av kyndig personell, kan den fortsatt være uriktig. Tabell 32 viser en oversikt over ulike feilkilder i oppgave, med tilhørende beskrivelse av hvordan denne feilkilden har påvirket oppgaven.

Feilkilde	Beskrivelse
Feiltolkning og gal informasjon	Vannkraftverkene i KVO er gamle anlegg, og som følge av dette er ikke alle funksjonsbeskrivelser og andre dokumenter digitalisert. Det er også vanskelig å innhente informasjon om modifiseringer som er gjort på anleggene, slik at noen av antakelsene og tolkningene gjort i oppgaven kan være direkte feil. Det har vært gjennomført flere møter med kontaktperson og andre i TrønderEnergi for å få forklart ulike aspekter ved anleggene, men det kan fortsatt forekomme feil i oppgaven, som kan ha innvirkning på resultatet.

Mangelfull og usikker data	Vedlikeholdshistorikken i IFS bærer preg av varierende struktur og detaljgrad, som betyr at innhenting og analyse av data er krevende. Det er bekreftet tilfeller hvor IFS inneholder gal informasjon, noe som svekker validiteten til TrønderEnergis CMMS. For å være sikker på at hentet informasjon ikke er fullstendig uriktig, er det gjennomført uformelle samtaler med vedlikeholdspersonell, for å bekrefte/avkrefte våre tall og beregninger.
Estimater	Som følge av mangelfull og usikker data, ble det gjort estimater på ulike verdier. Å være avhengig av estimater er en stor feilkilde, ettersom estimatene kan være uriktige, som igjen har stor innvirkning på andre deler av oppgaven. I likhet med data fra IFS, har estimatene blitt diskutert og validert med kyndig personell, for å redusere risikoen for gale verdier.
Ekspertvurdering	Risikovurderingen er avhengig av drøfting med kontaktperson. Lenseanlegg er komplekse, og det krever erfaring for å kunne identifisere relevante sviktmoder. Resultatet er ikke vurdert av andre eksperter enn Bjerkås, og dette kan ansees som en svakhet. For å styrke resultatene, bør man forhøre seg med andre eksperter på området.

Tabell 32 - Feilkilder

Grunnet noe mangelfull data kan oppgavens interne gyldighet stilles spørsmål ved. Prosjektgruppen mener imidlertid at oppgaven har tilstrekkelig gyldighet grunnet validering og estimeringsprosessen vist i Figur 69. Det er empirisk grunnlag for konklusjoner som blir trukket, men oppgaven kunne med fordel ha blitt utfordret av kyndig personell, hatt flere intervjuobjekter og inkludert flere kvantitative beregninger for å forsterke oppgavens interne gyldighet.



Figur 69 - Validasjonsprosess

10.0 Konklusjon

For å konkludere oppgaven, vil de viktigste funnene fra de fire resultatmålene presentert i 1.2 Oppgavens mål oppsummeres.

10.1 Resultatmål 1: Ståstedsanalyse

I forbindelse med resultatmål 1, ble det gjennomført en ståstedsanalyse av lenseanleggene i Kraftverkene i Orkla. Hovedfunn fra ståstedsanalysen viste at lensepumpene var både mest vedlikeholds- og kostnadskrevende, men at signalsystemet kun hadde fått utført korrektivt vedlikehold, grunnet uforutsett svikt. Det ble også funnet at arbeid i lensekum medførte stor risiko, grunnet glatte overflater og arbeid i stiger, noe som er nødvendig ved korrektivt vedlikehold av signalsystemet.

10.2 Resultatmål 2: Forbedringsforslag

På bakgrunn av ståstedsanalysen, handlet resultatmål 2 om mulige forbedringer man kan implementere i lenseanlegget. Forbedring 1 omhandler bruk av lasersensor til nivåmåling. Dette vil eliminere vedlikeholdsaksjoner ifbm. signalsystemet, og er en klar forbedring fra dagens løsning. Forbedring 2 modifiserer den vannstyrte aktuatoren til å kunne åpnes og lukkes automatisk, slik at det ikke er behov for utrykning ved åpning til ejetor. Forbedring 3 innebærer bruk av 3 lensepumper, for å sikre tilgjengeligheten til anlegget.

10.3 Resultatmål 3: Risikovurdering

Resultatmål 3 var å gjennomføre en risikovurdering for drukning av et vannkraftverk, som følge av svikt i lenseanlegget. Denne risikoen anses å være svært lav, ettersom det er installert flere sikkerhetssystemer og barrierer for å unngå svikt av anlegget. Antall historiske hendelser understreker at risikoen for drukning er lav, da det kun er notert mindre ulykker og hendelser de siste 20 årene.

10.4 Resultatmål 4: Valg av forbedring

Et forslag til hvordan anleggets vedlikeholdsvennlighet kan økes, samtidig som total tilgjengelighet opprettholdes eller økes, er ved å både oppgradere signalsystem og modifisere ejektorsystem samtidig. Dette vil gjøre anlegget mer moderne, og gi mulighet for mer kontinuerlig overvåkning av lensekummen. I tillegg kan man lage regelmessige vedlikeholdsprogram for testkjøring av ejektor. Grunnet eksisterende PLS i lenseanlegget, kan signalsystemet kobles rett opp til denne, som forenkler implementering. Implementering av en tredje lensepumpe ble vurdert ugunstig, grunnet sin høye investeringskostnad, samt introduksjon av nye, kostbare vedlikeholdsobjekter.

11.0 Videre arbeid

Det finnes mange faktorer å ta hensyn til ved investering i nye prosjekter i vannkraftindustrien. Oppgraderingen av signal- og ejektorsystemet i lenseanleggene er prosjekter som vil ha kostnader i det lavere sjiktet sammenlignet med andre prosjekter, men dersom dette skal implementeres i alle fem vannkraftverk i KVO, vil totalkostnaden være av en ikke-neglisjerbar størrelse. Det finnes som alltid fordeler og utfordringer ved et slikt prosjekt, hvor et utdrag av de viktigste punktene er nevnt og beskrevet i Tabell 33.

	Fordel	Forklaring
1.	Færre vedlikeholdskrevende objekter	Ved å implementere en slik løsning, vil man ha netto færre vedlikeholdsobjekter, som fører til at man kan fokusere på å opprettholde et godt vedlikeholdsprogram på det mest kritiske utstyret.
2.	Modernisering av anlegg	Ettersom den nye løsningen benytter seg av sensorer og IOT, vil man bidra til modernisering av utstyret i vannkraftstasjonen. Ved å fortsette med slik modernisering av utstyr, vil man som en bieffekt bli en mer attraktiv arbeidsplass for yngre arbeidstakere, som stiller seg svært positiv til bruk av teknologi til å drifte og vedlikeholde. Mangel på rekruttering er en kjent problemstilling for vedlikeholdspersonell hos TrønderEnergi, og implementering av en slik lasersensor kan være et steg i riktig retning.
3.	Større kontroll og bedre oversikt over anlegget, mulighet for fjernstyring	Den nye løsningen innehar alle de samme funksjonene som finnes i eksisterende løsning, vedr. sikkerhet ved strøbrudd osv. Dette vil altså være en minst like god metode for nivåovervåkning, hvor man i tillegg har mulighet til å hente ut sanntidsdata, og eventuelt fjernstyre anlegget.
4.	Kan lede til lengre VH-intervall	Ved å fjernstyre anlegget, kan man kjøre regelmessige testkjøringer, som et forebyggende tiltak. Målet med testkjøringen er å skylle ut sedimenter, som er en stor kilde til vedlikehold på ejektorsystemet.
5.	Mindre utslipp av klimagasser, og mindre risiko for ulykker	Som nevnt, vil det i eksisterende anlegg være behov for utrykning til anlegg for å stenge aktuator. Dersom prosessen automatiseres, slipper man slitasje på kjøretøy, utslipp av klimagasser ifbm. kjøring, samt sparer tid. Det er også svært høy risiko for ulykker forbundet til bilkjøring, slik at man ved en automatisering reduserer risikoen for ulykker blant TrønderEnergis ansatte.

	Utfordring	Forklaring
1.	Krever en ikke-neglisjerbar investeringskostnad	Investeringskostnaden må vurderes opp mot kostnadsbesparelser, fremtidige inntekter osv.
2.	Usikkerhet knyttet til hvor enkelt oppkobling til sentralbord er, og kontroll på målekjeden	Prosjektgruppen har ikke lyktes i å innhente informasjon om hvordan oppkobling til PLS og sentralbord kan gjøres. Det er derfor usikkerhet knyttet til dette, som må vurderes nærmere før TrønderEnergi bestemmer seg for å implementere denne kostnaden. Det er også en viktig forutsetning at målekjeden er pålitelig, og at verdiene dermed kan stoles på.
3.	Umiddelbar åpning til ejektor ved totalt bortfall av strøm	I dagens løsning vil ikke aktuatoren åpne til ejektor før vannet i lensekummen når et visst nivå. Ved totalt bortfall av strøm vil oppgraderingen umiddelbart åpne til ejektor, uavhengig av nivå i lensekum. Om dette er ønskelig eller ikke, må vurderes av TrønderEnergi.

Tabell 33 - Vurderingsaspekter ved oppgradering

For å vurdere om den nye løsningen faktisk er mer vedlikeholdseffektiv, kan man gjennomføre et pilotprosjekt. Dette kan gjennomføres ved å f.eks. montere en lasermåler fra ABB i et av anleggene, og koble opp denne til kontrollboksen. Deretter kan laseren programmeres til å gi signal rett før de respektive flottørbryterne slås av eller på. På denne måten opprettholder man sikkerheten til anlegget ved å ha flottørbryterne aktive, mens man tester hvor godt lasermåleren fungerer til formålet. Dersom lasermåleren ikke fungerer, vil flottørbryterne fortsatt starte lensepumpene. Hvis det er usikkerhet rundt hvor pålitelig målekjeden er, er det mulig å installere to lasermålere, for å sikre pålitelige resultater. Dette øker imidlertid kostnader.

Dersom lasermåleren viser seg å være driftssikker, kan man implementere løsningen på permanent basis, og fjerne flottørbryterne. Hvis det viser seg at laseren måler pålitelig, vil det være under dette arbeidet man modifierer rørsystemet inn til aktuatoren, slik at denne kan fjernstyres.

12.0 Referanseliste

Andersen, P. B. (2020) Digital-analog-omformer, *Store Norske Leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/digital-analog-omformer> (Hentet 1. mai 2022)

Arbeidstilsynet (u.å). *Arbeid i høyden* Tilgjengelig fra: <https://www.arbeidstilsynet.no/tema/arbeid-i-hoyden/> (Hentet 03. april 2022)

Braut, G.S. (2019) Nøyaktighet, *Store medisinske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://sml.snl.no/n%C3%B8yaktighet#:~:text=N%C3%B8yaktighet%20er%20i%20hvilken%20grad,er%20mest%20brukt%20om%20laboratorieunders%C3%B8kelser> (Hentet 11. mai 2022)

Bye, P.L. (2009) *Vedlikehold og driftssikkerhet*. Trondheim: s.n.

Cato, W. W. (2002) *Computer-managed maintenance systems in process plants : a step-by-step guide to effective management of maintenance, labor, and inventory in your operation*. Houston, TX: Gulf Pub. Co.

Daleng, J. (1994) *Tilstandskontroll av vannkraftverk : håndbok - vannvei, kjølevannsanlegg/tømme- og lenseanlegg*. Lysaker: Energiforsyningens fellesorganisasjon
Tilgjengelig fra: https://www.nb.no/items/URN:NBN:no-nb_digibok_2015071709021?page=13 (Hentet: 03. mai 2022).

Dincer, C., Bruch, R., Costa-Rama, E., Fernández-Abedul, M. T., Merkoçi, A., Manz, A., Urban, G. A. og Güder, F. (2019) *Disposable Sensors in Diagnostics, Food, and Environmental Monitoring*. Tilgjengelig fra <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.201806739> (Hentet 01. mars 2022)

Gillis, A. S. (2022) *What is the internet of things (IoT)?* Tilgjengelig fra: <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/Internet-of-Things-IoT> (Hentet 02.02.2022)

Jacobsen, D.I. (2018) *Hvordan gjennomføre undersøkelser?* Oslo: Cappelen Damm

Norges vassdrags- og energidirektorat, NVE (2020) *Ulykke eller uønsket hendelse - melding til NVE*. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/energi/tilsyn/damsikkerhet/ulykke-eller-uonsket-hendelse-melding-til-nve/> (Hentet 20.04.2022)

Norsk olje og gass. (2017) *Anbefalte retningslinjer for felles modell for sikker jobb analyse (SJA)*. Tilgjengelig fra: <https://www.norskoljeoggass.no/contentassets/d1dea04d994c4c56bd2639f5696c4274/090---anbefalte-retningslinjer-for-felles-modell-for-sikker-jobb-analyse.pdf> (Hentet 24. april 2022)

Norges vassdrags- og energidirektorat, NVE (2022) *Vannkraft*. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/energi/energisystem/vannkraft/> (Hentet 13.04.2022)

Paonessa, S og McDuffee, D. (2014). *Back to Basics: The Fundamentals of 4-20 mA Current Loops*. Tilgjengelig fra <https://www.predig.com/indicatorpage/back-basics-fundamentals-4-20-ma-current-loops> (25. april 2022)

Pedersen, V.G.B. (2021) *Tilstandskontroll/Måleteknikk*. Tilgjengelig fra: <https://ntnu.blackboard.com> (Hentet 10. mai 2022)

Pedersen, V.G.B. (2021) *Turbiner*. Tilgjengelig fra: <https://ntnu.blackboard.com> (Hentet 10. mai 2022)

Pedersen, V.G.B. (2021) *Komponenter i rørsystem*. Tilgjengelig fra: <https://ntnu.blackboard.com> (Hentet 10. mai 2022)

Råvnå, R. og Schjøberg, P. (2016) *Industry 4.0 and Maintenance*. Lysaker: Norsk Forening for Vedlikehold (NFV)

Standard Norge (2018) *NS-EN 13306 Vedlikehold - Vedlikeholdsteminologi*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1022000> (Hentet: 03. januar 2022).

Standard Norge (2021) *NS 5814 - Krav til risikovurderinger*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1352200> (Hentet 15. mars 2022)

Tan, L. og Jiang, J. (2019) *Digital Signal Processing Fundamentals and Applications*. New Mexico: Elsevier Science Publishing Co

Nesse, N. (2018) Magnetventil, *Store Norske Leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/magnetventil> (Hentet 10. mai 2022)

Berg, T. (2021) *Grunnleggende økonomistyring*. Oslo: Cappelen Damm

TrønderEnergi (u.å.) *Kraftverk*. Tilgjengelig fra <https://tronderenergi.no/produksjon/kraftverk> (Hentet: 03. april 2022).

Vijzelaar, J. H. og Lynglund, M. (2020) PLS: hva er det, og hvordan er det oppbygd? *Nasjonal digital læringsarena*. Tilgjengelig fra: <https://ndla.no/nb/subject:1:8c5a9fdd-4fa4-456b-9afe-34e7e776b4e7/topic:ce841519-de73-4349-870f-2240e5276bc0/resource:3eca6f64-0408-46bc-aa3c-827c7ead3352> Hentet 10. mai 2022)

Seubert, C. (2017) *How Do Laser Distance Meters Work?* Tilgjengelig fra: <https://sciencing.com/ultrasonic-sensors-work-4947693.html> (Hentet 11. mai 2022)

Bilder:

ABB. (2022) *Måleprinsipp laser* [Bilde] Tilgjengelig fra: https://library.e.abb.com/public/b759638110334a1a99aa8698d1716a5b/AA012909-01_Rev%20E_LL100%20HART%20User%20Guide.pdf (Hentet 11. mai 2022)

ABB. (u.å.) *ABB LLT100* [Bilde] Tilgjengelig fra: <https://new.abb.com/products/measurement-products/level/laser-level-transmitters/llt100> (Hentet 11. mai 2022)

ABB. (2020) *Feilmontering laser* [Bilde] Tilgjengelig fra: https://library.e.abb.com/public/d06c95ade0d54d3699482f5e1cc256b3/DS_LL100-EN_H_A4.pdf?x-sign=T0Pm4qlxlhDCqM9rXF2tengunBA2ph9owQMfBBpm5LmUeVxJe9FY8cIr/EvY8Bfe (Hentet 11. mai 2022)

Binder GmbH. (u.å.) *Pressure tank with sight glass*. [Bilde] Tilgjengelig fra: <https://www.binder-behaelterbau.de/en/company/exhibitions/achema-2018/pressure-tank-with-sight-glass.html> (Hentet 11. mai 2022)

Daleng, J. (1994) *Lenseejektor* [Bilde]. Tilgjengelig fra:https://www.nb.no/items/URN:NBN:no-nb_digibok_2015071709021?page=13 (Hentet: 03. mai 2022).

Disibeint Electronic. (u.å.) *Flytskjema flottørbryster* [Bilde]. Tilgjengelig fra:https://arxiu.disibeint.com/productes/pdf/eng/inmr_eco-i.pdf (Hentet 11. mai 2022).

Garlock. (u.å.) *Rack and Pinion* [Bilde]. Tilgjengelig fra:<https://legacy.garlock.com/fr/node/1352> (Hentet: 03. mai 2022).

Gustafsson, U. I. (u.å.) *Rørgate* [Bilde]. Tilgjengelig fra:<https://www.riksantikvaren.no/fredninger/sauda-iii-kraftverk/> (Hentet 11. mai 2022).

Massa, D. P. (2018) *Avoiding False Echoes from Fixed Structures When Using Ultrasonic Sensors for Water Level Measurement*. Tilgjengelig fra: <https://www.massa.com/wp-content/uploads/2018/06/Massa-Whitepaper-2-DPM-160512.pdf> (Hentet: 13. mai 2022)

Mjønerud, I. (2017) *Vannkraftverk* [Bilde]. Tilgjengelig fra: <https://xn--strm-ira.no/vannkraft> (Hentet 12. mai 2022)

Monolithicpower. (u.å) *Analog Signal* [Bilde]. Tilgjengelig fra:<https://www.monolithicpower.com/en/analog-vs-digital-signal> (Hentet: 03. mai 2022).

Monolithicpower. (u.å) *Digital Signal* [Bilde]. Tilgjengelig fra:<https://www.monolithicpower.com/en/analog-vs-digital-signal> (Hentet: 03. mai 2022).

Store Norske Leksikon, SNL. (2019) *Peltonturbin* [Bilde]. Tilgjengelig fra:<https://snl.no/peltonturbin> (Hentet: 03. mai 2022).

Store Norske Leksikon, SNL. (2019) *Francisturbin* [Bilde]. Tilgjengelig fra:<https://snl.no/francisturbin> (Hentet: 03. mai 2022).

U.S. Department of Energy, DOE. (2016) *Pumpekraftverk* [Bilde]. Tilgjengelig fra:<https://www.hydro.org/waterpower/pumped-storage/> (Hentet: 11. mai 2022).

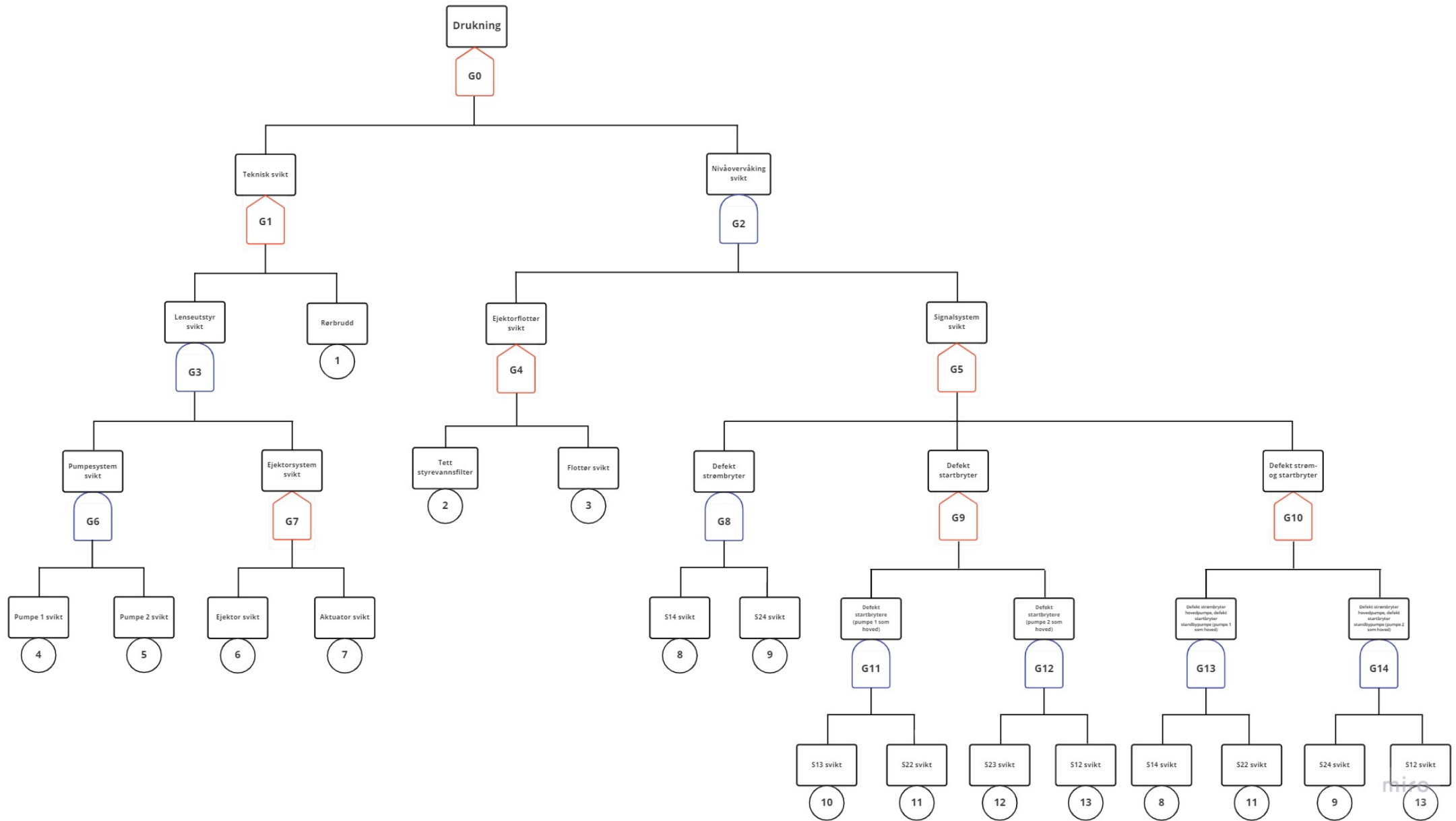
Xylem Vue. (u.å.) *Flygt Flygt N-Technology N 3171 Pump* [Bilde]. Tilgjengelig fra:<https://www.xylem.com/en-us/products--services/pumps-packaged-pump-systems/pumps/submersible-pumps/wastewater-pumps/n-technology-pumps/n-3171/> (Hentet: 11. mai 2022).

Your electrical guide. (u.å.) *Solenoid Valve Working Principle* [Bilde]. Tilgjengelig fra:<https://www.youelectricalguide.com/2017/12/solenoid-valve-working-principle.html> (Hentet: 10. mai 2022).

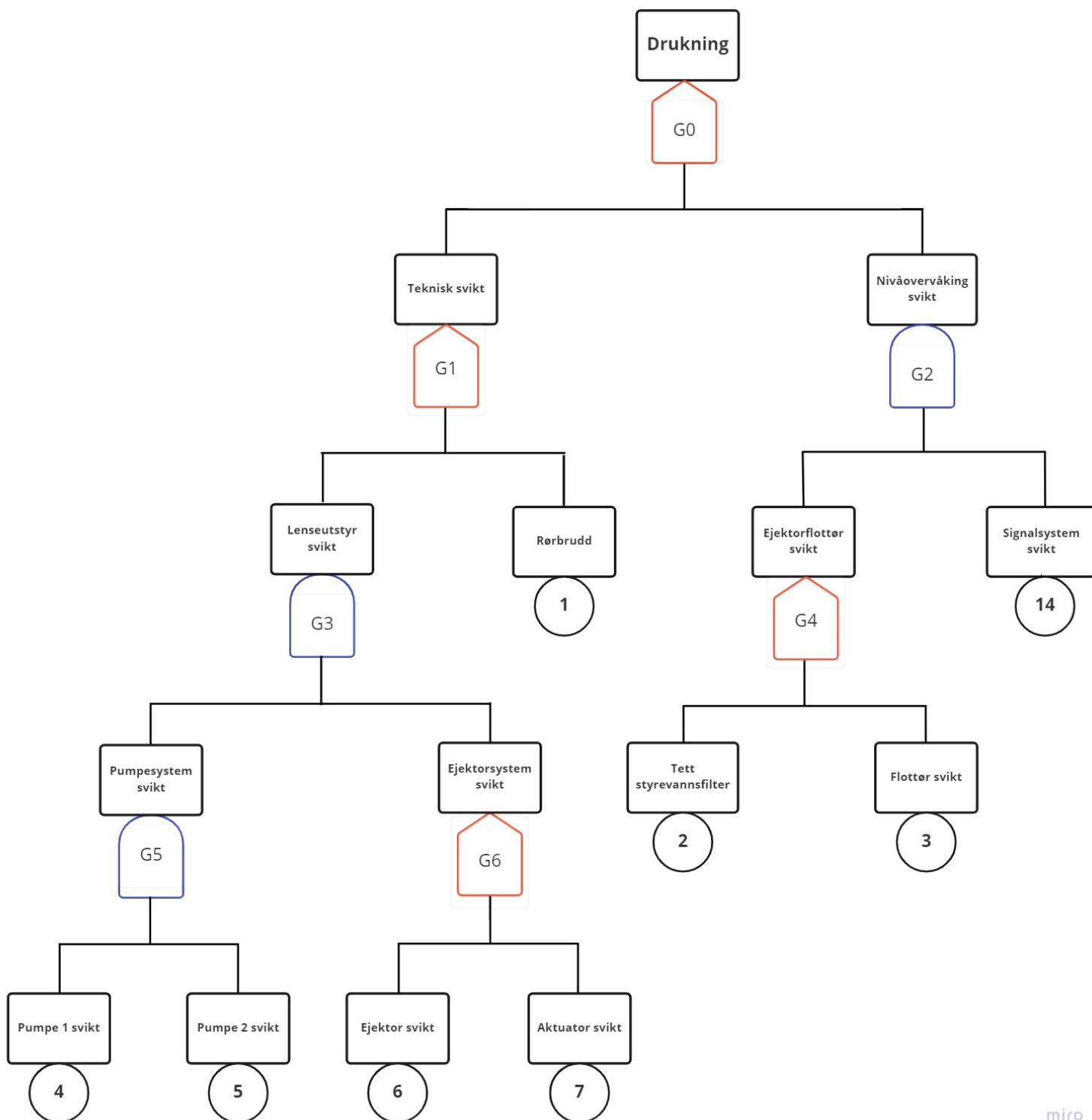
Øien, K., Sklet, S., Hauge, S., og Schjøberg, P. (2018) *Vedlikeholdsstyringsløsningen*. [Bilde]. Tilgjengelig fra:https://www.ptil.no/contentassets/6819ad82ec2d41379a724cf0225b43fc/rapport-aktorenes-tilstandsvurdering_2018.pdf (Hentet 11. mai 2022)

13.0 Vedlegg

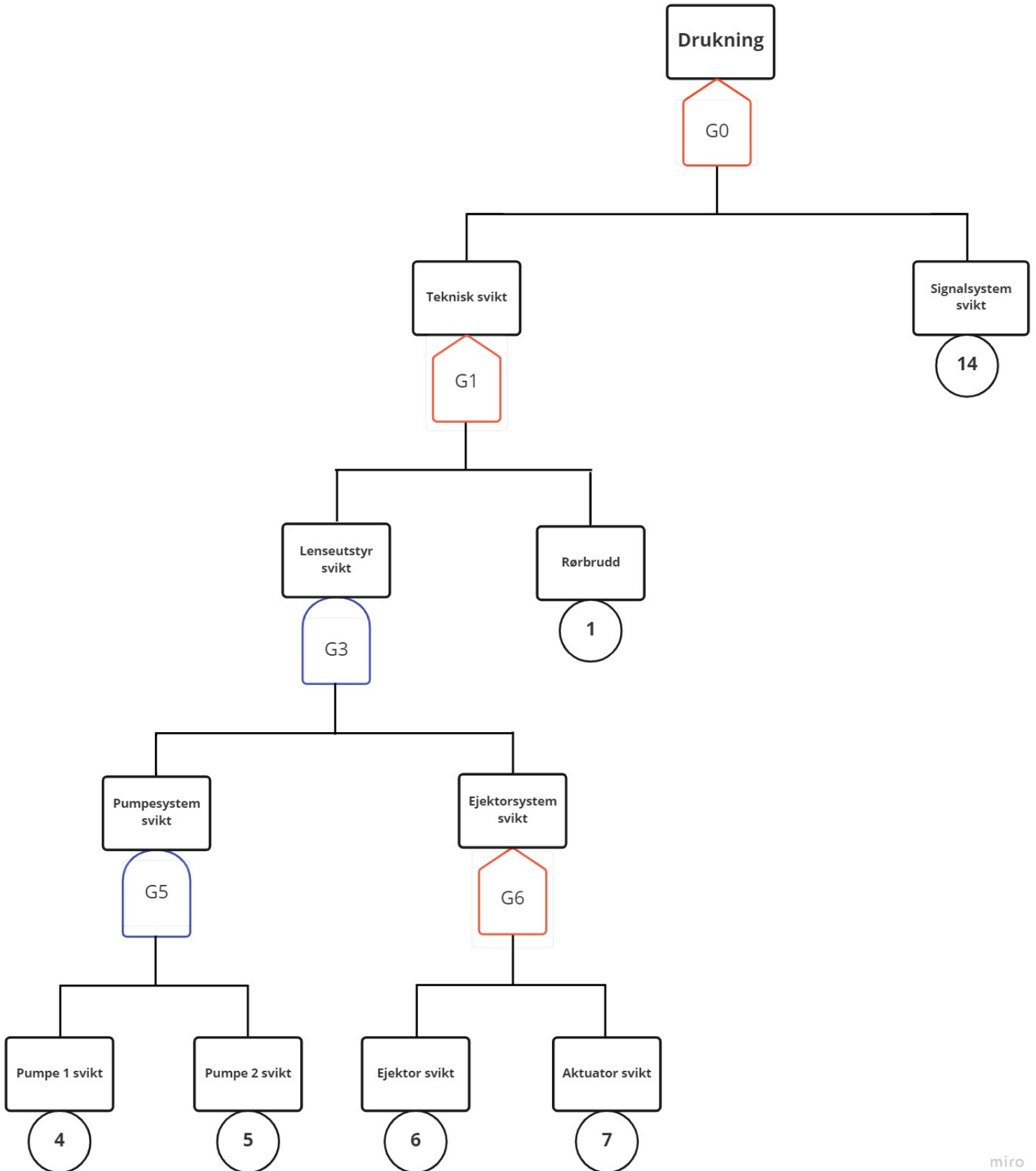
Vedlegg A - Originalt feiltre



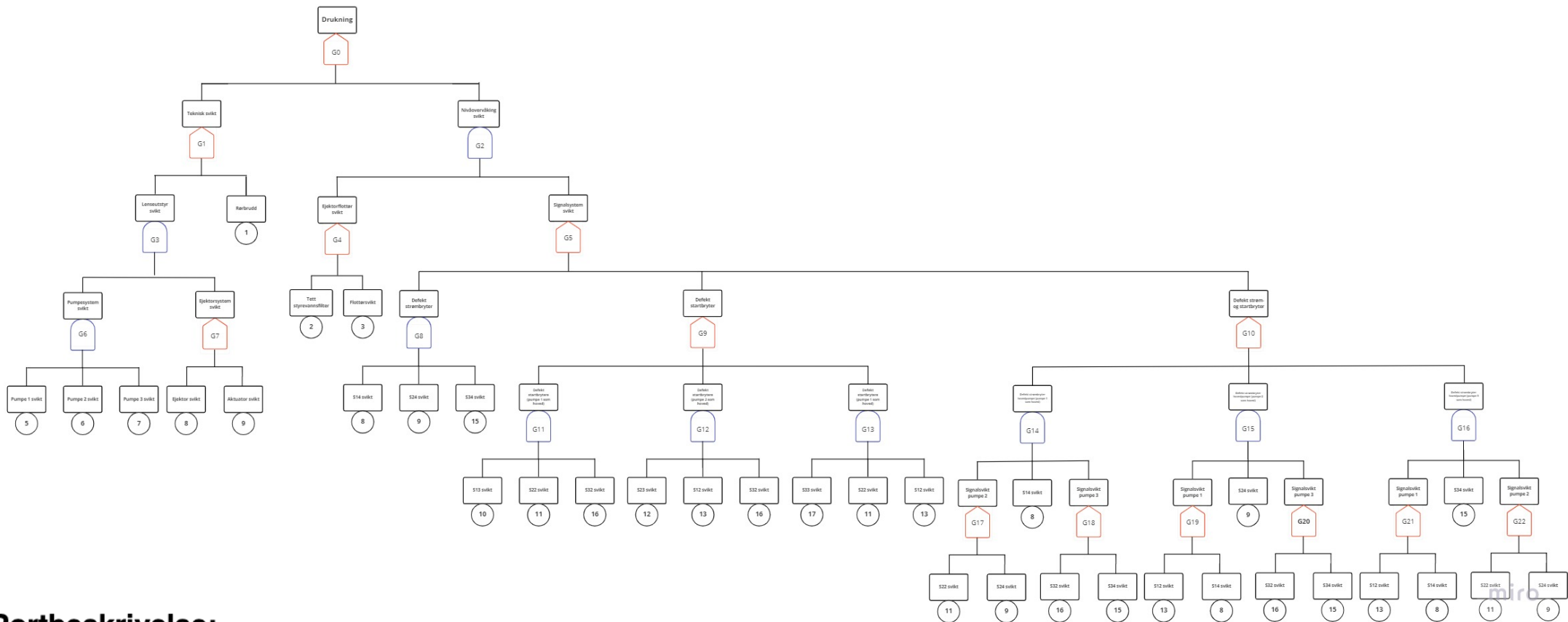
Vedlegg B - Oppgradert signalsystem



Vedlegg C - Oppgradert signal- og ejektorsystem



Vedlegg D - Tre lensepumper



Portbeskrivelse:

G11 - Defekte startbrytere (Pumpe 1 som hovedpumpe)

G12 - Defekte startbrytere (Pumpe 2 som hovedpumpe)

G13 - Defekte startbrytere (Pumpe 3 som hovedpumpe)

G14 - Defekte strømbryter hovedpumpe (Pumpe 1 som hovedpumpe)

G15 - Defekte strømbryter hovedpumpe (Pumpe 2 som hovedpumpe)

G16 - Defekte strømbryter hovedpumpe (Pumpe 3 som hovedpumpe)

