

Hanne Bredeesen,
Roy Kevin Wang,
Hanna Johannessen Linnebo

Tilstandsovervåkning av børsteslitasje og håndtering av børstestøv i vannkraftgenerator

Bacheloroppgave i Drift- og vedlikeholds teknikk
Veileder: Viggo Gabriel Borg Pedersen
Trondheim, 22.mai 2023

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



Forord

Arbeidet i denne bacheloroppgaven, Tilstandsovervåkning av børsteslitasje og håndtering av børstestøv i vannkraftgenerator er skrevet ved Institutt for maskinteknikk og produksjon, ved NTNU våren 2023. Oppgaven er skrevet i samarbeid med Aneo og tre studenter fra maskin ingeniør med spesialisering i drift og vedlikehold.

Vi vil benytte muligheten til å takke vår faglige veileder ved NTNU, Viggo Gabriel Borg Pedersen. Vi retter stor takk for all oppfølging, tilbakemeldinger og motivasjon gjennomføring av oppgaven.

Videre vil vi takke Aneo og vår kontaktperson Oddvar Bjerkås hos Aneo. Oddvar har vært behjelpelig med informasjon som vi har trengt til å løse oppgaven. I tillegg vil vi takke andre involverte fra Aneo som har bidratt med å stille opp til intervjuer, både personlig, telefon og epost.

Trondheim, 22. mai 2023.

Harald Brøder

Ragnvald Wang

Hans-Henrik

Sammendrag

Denne bacheloroppgaven tar for seg en undersøkelse av mulige oppgraderinger av vedlikeholdet på børste- og sleperingssystemet til vannkraftgenerator på Sokna kraftverk som er eid av Aneo. Oppgaven vil fokusere på å finne en metode for tilstandsovervåkning av børsteslitasje og bedre håndtering av børstestøvet som produseres når børstene slites. Målet med oppgraderingen er å effektivisere vedlikeholdet og redusere risiko for svikt i børstesystemet som følge av børsteslitasje og børstestøv. Dette for å sikre en mer pålitelig strømproduksjon for nærsamfunnet ved at tilgjengeligheten opprettholdes, samtidig som at unødvendige driftskostnader for Aneo elimineres.

Oppgaven tar for seg en ståstedsanalyse der det ble kartlagt gjennomsnittlig 27 forebyggende og en korrigerende vedlikeholdsaksjoner på børste- og sleperingssystemet årlig. Basert på opprinnelig vedlikeholdsform, ble det beregnet tilgjengelighet, vedlikeholdsvennlighet og driftskostnader. Videre ble det gjennomført en FMECA på børste- og sleperingssystemet for å klassifisere de mest kritiske komponentene og feilmodene som kan oppstå av disse. Resultat fra FMECA viste høy kritikalitet for feilmode på børster, børstebro med isolator og sleperingsisolasjon. Det ble derfor aktuelt å se nærmere på overvåkingen av børsteslitasje og finne en metode for håndteringen av børstestøvet.

I oppgaven kommer det frem at den mest gunstige oppgraderingen av vedlikeholdet vil være en kombinasjon av forebyggende og tilstandsbasert vedlikehold. Ved å innføre

tilstandsovervåkning fra Carbex for børsteslitasje samt et avtrekksystem fra Mersen for håndtering av børstestøv kan vedlikeholdet effektiviseres. Samtidig opprettholdes tilgjengeligheten ved at risiko for svikt i børste- og sleperingssystemet reduseres og unødvendige driftskostnader kan forhindres i større grad. Totalt sett vil det sikre en mer optimal og pålitelig drift av vannkraftgeneratoren.

Abstract

This bachelor's thesis investigates potential upgrades to the maintenance of the brush system of the hydroelectric generator at Sokna power plant, which is owned by Aneo. The thesis focuses on finding a method for condition monitoring of brush wear, and improving the handling of the brush dust that is produced when the brushes are worn. The aim of the upgrade is to increase the efficiency of the maintenance and reduce the risk of brush system failure due to brush wear and dust. This ensures a more reliable power source for the local community by maintaining availability while also preventing unnecessary maintenance costs for Aneo.

The thesis includes a point of view analysis, which identified an average of 27 preventive and one corrective maintenance action on the brush system annually. Based on the original maintenance approach, availability, maintainability, and costs were evaluated. Furthermore, an FMECA was carried out on the system, to classify the most critical components and the failure modes. Results from FMECA show a high criticality for the failure modes on the brushes. It therefore became relevant to focus on the monitoring of brush wear, but at the same time look at the handling of brush dust in the generator top.

In the thesis, the group arrives that the most beneficial maintenance upgrade would be a combination of preventive and condition-based maintenance. By implementing Carbox condition monitoring for brush wear, as well as an extraction system from Mersen for

handling the brush dust, maintenance can be made more efficient. At the same time availability is maintained, risk of brush system failure is reduced, and unnecessary costs can be prevented to a greater extent. Overall, it will ensure a more optimal and reliable operation.

Innholdsfortegnelse

Forord	i
Sammendrag	ii
Abstract	iv
Figurliste	x
Tabelliste	xii
Formelliste	xv
Begrepsavklaring	xv
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn og motivasjon	1
1.2 Problemstilling og mål	2
1.3 Avgrensning	3
1.4 Rapportstruktur	3
2 Metode	5
2.1 Intervjusamtaler	5
2.2 Litteraturinnhenting og befarings	6
2.3 Analysemetoder	7

2.3.1	Ståstedsanalyse	7
2.3.2	FMECA	8
3	Teori	9
3.1	Vedlikehold	9
3.1.1	Industri 4.0	9
3.1.2	Vedlikeholdstyper	10
3.1.3	Vedlikeholdsterminologi	13
3.2	Analysemetoder	15
3.2.1	Konsekvensklassifisering	15
3.2.2	FMECA	16
3.3	Økonomiske begreper	19
3.3.1	Nåverdianalyse	19
3.3.2	Internrente	19
3.4	Måleprinsipp	20
3.4.1	Potensiometer	20
3.4.2	Lasertriangulering	21
3.4.3	Emissivitet	21
3.5	Sensorikk	22
3.5.1	Ingress Protection klassifisering	22
3.5.2	Sensorteknologi	22
3.5.3	Måleomformer	23
3.5.4	Målenøyaktighet	23
3.5.5	Signaloverføring	24
4	Generator	25
4.1	Generell oppbygning	25
4.2	Børstesystemet	26
4.3	Vedlikehold og børsteslitasje	28
4.4	Tilstandsovervåking av børstesystemet	32

5	Ståstedsanalyse	34
5.1	Bakgrunn om Sokna vannkraftverk	34
5.1.1	Generator på Sokna	36
5.2	Vedlikehold	38
5.3	Årlige vedlikeholdsaksjoner og tilgjengelighet	39
5.4	Kostnader	41
6	FMECA av børstesystem	44
6.1	Konsekvensklassifisering	44
6.2	FMECA	45
6.2.1	Resultater fra FMECA	45
6.2.2	Analyse av funn	45
7	Forbedringsforslag	50
7.1	Metoder for tilstandsovervåking av børstesystem	50
7.1.1	Wire sensor	51
7.1.2	Laser avstandsmåler	53
7.1.3	IR sensor	55
7.1.4	Termokamera	57
7.1.5	Carbex i-Brush 1.1	59
7.2	Metoder for håndtering av børstestøv	60
7.2.1	Mersen DustCollector	61
7.2.2	Schunk Carbon Dust Extraction	62
7.3	Forbedringsforslag med økonomisk analyse	63
7.3.1	Valgte forbedringsforslag	63
7.3.2	Økonomisk analyse	63
8	Resultater	68
8.1	Ståstedsanalyse	68
8.1.1	Vedlikeholdsaksjoner og tilgjengelighet	68
8.1.2	Vedlikeholdsvennlighet	70

8.1.3	Kostnader	71
8.2	FMECA	73
8.3	Sammenlikning av valgte forslag	74
8.3.1	Vedlikeholdsaksjoner og tilgjengelighet	74
8.3.2	Vedlikeholdsvennlighet	76
8.3.3	Kostnader	78
8.3.4	Ny risikovurdering	79
9	Diskusjon	81
9.1	Resultatmål 1: Ståstedsanalyse	81
9.2	Resultatmål 2: FMECA	84
9.3	Resultatmål 3: Forbedringsforslag	85
9.4	Resultatmål 4: Valg av forslag	89
9.5	Usikkerheter	91
10	Konklusjon	93
10.1	Resultatmål 1: Ståstedsanalyse	93
10.2	Resultatmål 2: FMECA	93
10.3	Resultatmål 3: Forbedringsforslag	93
10.4	Resultatmål 4: Valg av forslag	94
11	Videre arbeid	95
	Vedlegg:	102
	Vedlegg A. FMECA	102
	Vedlegg B. FMECA med ny risikovurdering etter implementering av forbedringsforslag.	103

Figurliste

3.1.1	Figur av vedlikeholdsformer	10
3.2.1	Eksempel på konsekvensklassifiseringsmatrise	15
3.2.2	Eksempel på FMECA skjema, (Rausand, 2014, s.73	17
3.2.3	Eksempel på Frekvensskjema	18
3.2.4	Eksempel på Konsekvensskjema	18
3.2.5	Eksempel på fargekartskjema	18
3.2.6	Eksempel på risikomatrixe	19
3.4.1	Illustrasjon av potensiometer i tre forskjellige faser.	20
3.4.2	Illustrasjon av lasertriangulering.	21
3.5.1	Forklaring av IP klassifisering.	22
3.5.2	Måleomformer funksjon	23
3.5.3	Signaloverføring	24
4.1.1	Illustrasjon av turbin og generator	25
4.2.1	Skisse av magnetiseringsutstyr for statisk magnetisering	27
4.3.1	Bilde hvor det har oppstått børstebrann	31
4.3.2	Kortslutning sleperinger.	31
5.1.1	Hydraulisk system, prinsippskisse av Sokna kraftverk.	34
5.1.2	Skjerm bilde tatt fra NVE atlas som viser vannkraftverkene; Sokna, Håen og Sama.	35

5.1.3 Bilder av generator på Sokna vannkraftverk	36
5.1.4 Generator toppen, laget ut ifra avleste mål fra IFS. Komponenter kartlagt med navn	37
5.1.5 Bilde av avtrekksystem generator på Sokna	37
5.1.6 Bilde av kullbørster i børsteholder	38
5.2.1 Skjerm bildet fra IFS av registrert vedlikehold.	39
7.1.1 Wire-sensor: WDS-300-P60	51
7.1.2 Nøkkelinformasjon for wire-sensor.	51
7.1.3 Framstilling av plassering for Wire-sensor	52
7.1.4 Laseravstandsmåler: ILD 1420-200	53
7.1.5 Nøkkelinformasjon for laseravstandsmåler	53
7.1.6 Framstilling av plassering for laseravstandsmåler	54
7.1.7 IR-sensor: thermometer CT-SF22-C3	55
7.1.8 Nøkkelegenskaper for IR-sensor.	55
7.1.9 Framstilling av plassering for IR-sensor	56
7.1.10 Termokamera: TIM 160S	57
7.1.11 Nøkkelegenskaper for termokamera	57
7.1.12 Framstilling av plassering for Termokamera	58
7.1.13 Komponent oversikt I-Brush 1.1	59
7.2.1 Illustrasjon av utstyrskomponentene til Merson DustCollector	61
7.2.2 Illustrasjon av utstyrskomponentene til Schunk Carbon Dust Extraction	62
8.1.1 Opprinnelig vedlikeholdsfordeling basert på antall vedlikeholdsaksjoner.	69
8.1.2 Opprinnelig vedlikeholdsfordeling basert på nedetid	69
8.1.3 Opprinnelig operasjonell tilgjengelighet for børstesystemet.	70
8.1.4 Årlige driftskostnader fra FV og KV	71
8.1.5 Totale vedlikeholdskostnader over 10 år for opprinnelig vedlikehold og med stor svikt i børstesystemet.	72
8.2.1 Resultater fra risikovurderingen i en risiko matrise	73

8.2.2 Resultatene fra FMECA i tabell	74
8.3.1 Fordeling av antall vedlikeholdsaksjoner for Forslag 1 og 2.	75
8.3.2 Fordeling av vedlikeholdsaksjoner basert på nedetid for Forslag 1 og 2.	75
8.3.3 Sammenlikning av operasjonell tilgjengelighet.	76
8.3.4 Årlige totalkostnader for 10 år frem i tid.	79
8.3.5 Sammenlikning av risikovurdering for opprinnelig, Forslag 1 og Forslag 2	80

Tabelliste

4.3.1 Faktorer som kan påvirke børsteslitasje.	29
4.4.1 Sensorikk for tilstnadsovervåkning.	33
5.3.1 Gjennomsnittlig årlige vedlikeholdsaksjoner på børstesystemet med tilhørende timer for arbeid og nedetid. AT (arbeidstimer), T AT (Totale arbeidstimer), N (Nedetid), T NT (Total nedetid).	40
5.3.2 Utrechnet MTBM, MDT og tilgjengelighet basert på årlig vedlikeholdsaksjoner	41
5.4.1 Kostnader for nedetid per time som følge av FV og KV.	41
5.4.2 Kostnad for vakter.	41
5.4.3 Kostnad for utstyr.	42
5.4.4 Kostnader for forebyggende vedlikehold	42
5.4.5 Kostnader for korrigerende vedlikehold.	42
7.3.1 Reduksjon i vedlikeholdsaksjoner. AT (arbeidstimer), T AT (Totale arbeidstimer), N (Nedetid), T NT (Total nedetid).	64
7.3.2 Driftsbesparelser	65
7.3.3 Utstyrskostnader for Forslag 1	65
7.3.4 Nåverdiberegning for Forslag 1	65
7.3.5 NNV og IRR for Forslag 1	66
7.3.6 Totalkostnad for utstyr for Forslag 2	66
7.3.7 Nåverdiberegning for Forslag 2	67

7.3.8 NNV og IRR for Forslag 2	67
8.1.1 Vurdering av vedlikeholdsvennlighet til opprinnelig vedlikeholdsprogram. .	71
8.3.1 Faktorer for å vurdere vedlikeholdsvennligheten, samt en vurdering.	77

Formler

Formelliste

$$\text{Formel (3.1)} \quad MTBM = \frac{1}{n} \sum (T_i)$$

$$\text{Formel (3.2)} \quad MDT = \frac{1}{n} \sum (D_i)$$

$$\text{Formel (3.3)} \quad Aop.virk = \frac{MTBM}{MTBM + MDT}$$

$$\text{Formel (3.4):} \quad NNV = \sum_{t=1}^n \frac{x_n}{(1+r)^t} - I_0$$

$$\text{Formel (3.5):} \quad \sum_{t=1}^n \frac{x_n}{(1+r)^t} - I_0 = 0$$

$$\text{Formel (3.6):} \quad x = x_{max} \cdot \frac{U_m}{U}$$

Begrepsavklaring

Forkortelser	Beskrivelse
NTNU	Norges Teknisk-Naturvitenskaplige Universitet.
IFS	Industrial and Financial System
FMECA	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis.
IP	Ingress Protection.
IEC	International Electrotechnical Commission.
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat.
NV	Nåverdi.
HMS	Helse, miljø og sikkerhet.
PLS	Programmerbar Logisk Styring.
FV	Forebyggende vedlikehold.
KV	Korrigerende vedlikehold.
IR	Infrarød.

Kapittel 1

Innledning

Denne bacheloroppgaven handler om tilstandsovervåking av børsteslitasje og håndtering av børstestøv i vannkraftgenerator. Vannkraftverk er samfunnskritiske og det er ønskelig med en høyest mulig tilgjengelighet. Børstestøv fremstår som en utfordring i norsk kraftproduksjon hvor problemet er forårsaket av børsteslitasje. Børstestøvet legger seg på isolatorer og kan føre til overslag og havari, samtidig som stor børsteslitasje også fører med seg økt behov for vedlikehold. Dersom det oppstår svikt i børste- og sleperingssystemet, kan det resultere i uplanlagt stans for generatoren, noe som vil gi høye kostnader som følge av nedetid og erstatning av utstyr. I resten av oppgaven vil børste- og sleperingssystemet refereres til som børstesystemet.

1.1 Bakgrunn og motivasjon

Bachelor oppgaven ble valgt ut fra samtlige oppgaveforespørsler som emneansvarlig har fått fra industrien. Av de foreslåtte forslagene var oppgaven innenfor vannkraft i samarbeid med Aneo av størst interesse for gruppen. Dette på bakgrunn av gruppens ønske om å fordype seg innenfor vannkraft, samtidig som Aneo er en bedrift vi ønsker å få bedre kjennskap til. Det ble videre avtalt et introduksjonsmøte med bedriftskontakt fra Aneo og veileder, hvor det ble framlagt ulike problemstillinger som ville ha verdi både for bedrift og oss studenter.

Aneo er et konsern etablert av Trønderenergi og investeringsfondet HitecVision. Aneo har mulighet til å kombinere lang industriell erfaring fra kraftbransjen med tilgang på privat og kompetent kapital. Dette resulterer i et nordisk fornybarkonsern med innvesterings-, innovasjons- og gjennomføringskraft (Aneo, 2023).

I 2022 oppstod det brann i maskintoppen ved et av Aneo sine vannkraftverk. Brannen blusset opp grunnet gnistring i børstestøvet. Dette resulterte i lang nedetid og store inntektstap på grunn av produksjonsbortfall. En slik situasjon viser at børstesystemet i maskintoppen er kritisk utstyr. På bakgrunn av dette er det ønsket en oppgave som fokuserer på hvordan funksjonen til utstyret kan sikres. Dette utføres ved å undersøke ulike metoder for tilstandsovervåking av børstene, og se på muligheter for håndtering av børstestøvet.

1.2 Problemstilling og mål

Børstesystemet i en vannkraftgenerator anses som kritisk utstyr. Slitasje av børstene produserer børstestøv som legger seg på isolerende overflater og kan føre til kryptrømmer og overslag. Dette resulterer i uplanlagt stans og høye kostnader for vannkraftindustrien. For oppgaven er det valgt å se på en generator i Sokna vannkraftverk.

Målet med denne oppgaven er å foreslå en forbedring av Aneo sin nåværende vedlikeholdsform på børstesystemet, og trekke frem gevinster dette kan føre med seg. Det er ønskelig å gå fra en korrigerende og forebyggende vedlikeholdsform og over til en mer tilstandsbasert vedlikeholdsform. Oppgaven vil gå ut på å kartlegge dagens vedlikehold, og utføre en FMECA på børstesystemet for å vurdere feilmøder og kritikaliteten av systemets komponenter. Videre identifiseres forbedringsforslag for å kunne overvåke tilstanden til børstene og avdekke hvilken fase slitasjen er kommet til, samt se nærmere på metoder for håndtering av børstestøvet som dannes ved børsteslitasjen. For å utføre dette arbeidet er det satt opp følgende resultatmål;

1. Gjennomføre en ståstedsanalyse for børstesystem på generator på Sokna vannkraftverk.
2. Utføre FMECA av børstesystemet på generator.
3. Identifisere forbedringsforslag for håndtering av børstestøv og for tilstandsovervåking av børstesystem.
4. Foreslå forbedringsforslag og begrunne valg av disse.

1.3 Avgrensning

Gruppen har i oppgaven valgt å se på børstesystemet som en helhet, og på vedlikeholdet som utføres på dette delsystemet av generatoren. I forhold til børstesystemet er det flere relevante områder som det er aktuelt å undersøke nærmere. Etersom vi er studenter på drift og vedlikehold, har vi i denne oppgaven valgt å se på forslag for forbedring av børstesystemets opprinnelige vedlikehold og gevinstene som følger med dette. Det er mye som kan gjøres for å forbedre vedlikeholdet, og denne oppgaven går inn på noen aktuelle tiltak. I forbedringsforslagene ser vi på følgende aspekter; Vedlikeholdsaksjoner, tilgjengelighet, vedlikeholdsvennlighet, drift og vedlikeholdskostnader og risiko. Siden vi kun ser på et delsystem av generatoren, er det viktig å merke seg at beregningene som er gjort i oppgaven også kun baseres på dette, og ikke hele generatoren. Videre har vi valgt å ikke fordype oss innen databehandling og dataanalyser ved tilstandsovervåking. Oppgaven utdyper mer rundt systemer og sensorer med tilhørende prinsipp, implementering og kostnader.

1.4 Rapportstruktur

Rapportens struktur tar utgangspunkt i oppbygging i standard oppbygging for akademiske oppgaver ved NTNU, for å gi leseren en god oversikt over problemstillingen og metoder i prosjektet. Den er avgrenset med informasjon som anses relevant for å besvare problemstillingen.

Kapittel 1 Innledning tar for seg oppgavens motivasjon, mål og problemstilling og avgrensninger.

Kapittel 2 Metode gir leseren et innblikk i fremgangsmåtene for rapportens innhold.

Kapittel 3 Teori om vedlikehold, hvor gruppen forklarer begreper og metoder som inngår ved tilnærming til drift- og vedlikehold.

Kapittel 4 Beskrivelse av vannkraftgenerator med tilhørende børstesystem tar for seg en generell beskrivelse av generatorens oppbygning.

Kapittel 5 Ståstedsanalyse tar for seg ståstedsanalysen, med fokus på vedlikeholdstruktur, tilgjengelighet og kostnader.

Kapittel 6 FMECA tar for seg gjennomført FMECA.

Kapittel 7 Forbedringsforslag ser på ulike metoder for håndtering av børstestøv og ulike metoder for tilstandsovervåkning av systemet

Kapittel 8 Resultater oppsummerer oppgavens resultater og funn, samt presenterer en sammenlikning av disse.

Kapittel 9 Diskusjon tar for seg drøfting av resultater, validitet og feilkilder.

Kapittel 10 Konklusjon vil gi leseren svar på problemstillingen.

Kapittel 2

Metode

Kapittel 2 tar for seg de ulike metodene som er benyttet i rapporten. En metode er en fremgangsmåte man benytter for å finne ny kunnskap og/eller løse et problem (Dalland, 2020, s.53). Det redegjøres for hvordan gruppen har jobbet, og de mest sentrale verktøyene og kildene som er benyttet vil bli nevnt.

2.1 Intervjusamtaler

I arbeidet med oppgaven har gruppen gjennom intervjuer innhentet mye relevant informasjon. For å sikre validiteten på informasjonen har vi vært i kontakt med flere aktuelle personer. Vi har gjennomført en rekke samtaleintervjuer med personer fra Aneo og leverandørindustrien. Videre har vi konsultert emneansvarlig for industriell instrumentering ved NTNU, samt ansatte ved fakultetet for informasjonsteknologi og elektronikk for å tilegne oss bedre kunnskap for valg av sensorer. Vi har også vært i kontakt med leder for service kraftproduksjon hos ABB for å innhente teori og informasjon om generatorer. Intervjuene har vært utført personlig, via Teams, epost og telefon.

Videre har gruppen vært i dialog med leverandørene; Carbex, Mersen, Micro-epsilon og Schunk. Kontakten er gjennomført via telefon og epost for detaljerte opplysninger om deres utstyr og kompatibiliteten til vårt bruksområde. Våre utfordringer ble presentert

sammen med fotografier og eksemplarer av børsteholder og karbonbørste. Dette bidro til mye innhenting av informasjon, og styrker validiteten for begrunnelsen av sensorforslagene våre.

Før intervjuene er det blitt gjort gode forberedelser ved å skrive ned spørsmålsliste og sørge for å sende denne ut til alle deltakere før møtet. Dette er gjort for at både vi og personer som deltar i møtet skal kunne forberede seg best mulig. Dette hjelper med å holde tiden i møtet og å innhente korrekt informasjon.

2.2 Litteraturinnhenting og befaring

Ved bruk av litteratur i oppgaven er det vesentlig å vurdere dens troverdighet og relevans til oppgavens problemstilling (Trygstad Dalland, 2020, s.152). Underveis i arbeidet med oppgaven har gruppen innhentet og studert relevant litteratur. For å finne aktuell litteratur er det benyttet ulike databaser og søkeord. Databasen Oria, Google Scholar og Standard Norge ble hovedsakelig brukt. De mest sentrale søkeordene som er brukt er; børsteslitasje i generator, børstestøv i generator, tilstandsovervåkning og vedlikeholdsterminologi. Det var stor variasjon i mengden treff som kom opp, og det var få treff som handlet spesifikt om vår problemstilling. I noen tilfeller benyttet vi avgrensning for å filtrere søkene, som for eksempel tidsspenn etter år 2010 for å fokusere på nyere datert forskning på de ulike områdene. Det ble også benyttet en filtrering på søkeordene for å finne frem til tidligere relevante studentoppgaver for inspirasjon til oppsett av vår bacheloroppgave. Videre tok vi i bruk snøballmetoden, som er å se igjennom litteraturlisten til aktuelle artikler og bøker som kan være relevant for vår oppgave (Trygstad Dalland, 2020, s.151).

I innhenting av informasjon om sensorer og avtrekkssystemer er kildene fra ulike produsenters nettsider og tilhørende datablad om aktuelt utstyr. For å finne aktuelle sensorer for tilstandsovervåkning av børstesystemet var det mye relevant litteratur og treff på søk. Sensorinformasjonen er hentet fra Micro-epsilon, som produserer og selger

følere. Imidlertid var det færre treff på relevante metoder for håndtering av børstestøv og avsugssystemer for generatorer.

I november 2022 ble det gjennomført en befaringsreise til Sokna vannkraftverk. Gruppen fikk da en bedre oversikt over kraftverket og fikk se på generatoren og børstesystemet. Dette gav en god start på samarbeidet med bedriftskontakt. Videre har gruppen ved flere anledninger besøkt kraftverket for intervjuer, men også for å ta egne mål av børstesystemet.

2.3 Analysemetoder

Vi har valgt å gjennomføre analysemetodene ståstedsanalyse og FMECA. I gjennomføringen av alle analysene ble det i første omgang gjennomført møter digitalt over Teams i samarbeid med senioringeniør fra Aneo. Her ble mesteparten av informasjonen innhentet. I etterkant ble mer informasjon utvekslet via epost og telefon med driftspersonale som har god kjennskap til Sokna vannkraftverk.

2.3.1 Ståstedsanalyse

En ståstedsanalyse er et verktøy for å kartlegge den nåværende situasjonen til en virksomhet. Ståstedsanalyse har som mål å danne en refleksjon over virksomhetens praksis, og ta for seg områder man vil prioritere i utviklingsarbeid. I denne oppgaven vil ståstedsanalysen kun basere seg på begrensede områder som er relevante for problemstillingen.

Informasjonen innhentet i ståstedsanalysen er basert på både kvalitative og kvantitative data. Kvalitativ data brukes ved innsamling og analyse av data som vanligvis foreligger i form av skriftlig eller muntlig tekst, mens kvantitative data uttrykkes i form av tall (Grønmo, 2023).

- Kvalitative data: Relevante erfaringer og kompetanse fra senioringeniør hos Aneo,

og driftspersonell som har erfaringer med vedlikehold av børstesystemet.

- Kvantitative data: Nødvendige tallbaserte data fra IFS og senioringeniør. Dette er historiske data fra vedlikeholdsaksjoner, arbeidstimer, nedetid og kostnader, i tillegg til vurderinger og statistiske sammenhenger.

Utvalget av data som er brukt i ståstedsanalysen innhentet fra IFS omfatter tidsrommet fra 2012 til 2023. Dataen har store mangler i dokumentert informasjon, og muligens feil på tallene som er oppgitt for tid for utført vedlikehold og kostnader. Resterende nødvendig informasjon er basert på estimater fra senioringeniør og driftspersonale.

2.3.2 FMECA

I forkant av oppgaven er det gjennomført en konsekvensklassifisering for å synliggjøre børstesystemets kritiske rolle. Det er da naturlig å utføre en FMECA for å se dypere inn på systemet og kartlegge de mest kritiske komponentene og feilmodene for disse. Den gjennomførte FMECA i oppgaven baserer seg på standarden NEK IEC 60812:2018 (Standard Norge, 2018). Analysen identifiserer de ulike feilmodene til komponentene i børstesystemet for å vurdere de mest kritiske, samt frekvens og konsekvens av disse for resten av børstesystemet (delsystemet) og for generatoren (hele systemet). Analysen ble valgt på bakgrunn av at det er en internasjonal standard og en mye brukt og anerkjent metode.

Kapittel 3

Teori

Dette kapittelet har som hensikt å gi leseren en forståelse for teorien som ligger til grunn for innholdet i oppgaven.

3.1 Vedlikehold

Vedlikehold defineres i vedlikeholdsstandarden NS-EN 13306:2017 som «en kombinasjon av alle tekniske, administrative og ledelsesrelaterte tiltak gjennom en enhets livssyklus som har til hensikt å opprettholde den i eller gjenopprette den tilstand der den kan oppfylle krevd funksjon» (Standard Norge, 2019). Vedlikehold kan være inspeksjoner, rengjøring, reparasjon eller utskifting av utstyr, hvor alle har som formål å forhindre havari, redusere nedetid og opprettholde levetiden til utstyret. En investering i vedlikehold kan føre til å øke lønnsomhet og bedre driftssikkerhet (Norsk Industri, 2023).

3.1.1 Industri 4.0

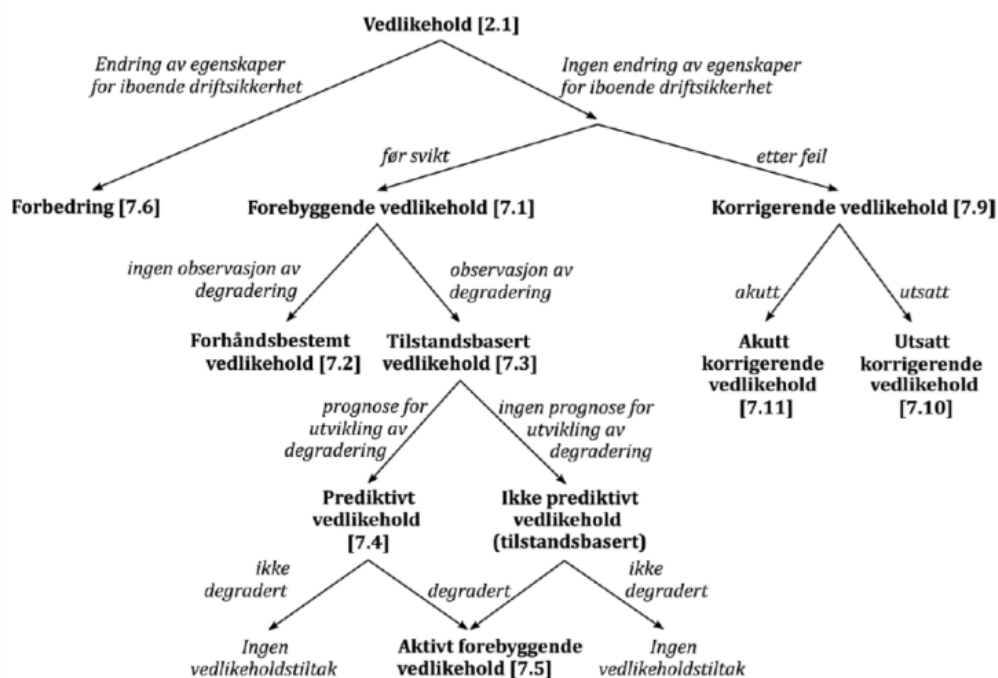
Industri 4.0 er anerkjent som den fjerde bølgen av teknologiske fremskritt som allerede har en betydelig innvirkning på samfunnet. Industri 4.0 er kjent som en økende integrasjon mellom den fysiske og teknologiske verden, hvor det skjer en interaksjon mellom mennesker, maskiner, datamaskiner og kunstig intelligens. Dette har åpnet opp for nye muligheter, og blant disse er bruken av sensorer for å samle inn og utveksle informasjon (Ravnå og

Schjølberg, 2016).

Industri 4.0 sin visjon inkluderer også optimal drift og vedlikehold av utstyr. I takt med den økende teknologikunnskapen er målet å digitalisere og automatisere prosesser. Det er et vedvarende fokus på å integrere prediktivt vedlikehold og digitale vedlikeholdssystemer i produksjon og vedlikehold. Dette oppnås i stor grad ved bruk av for eksempel sensorer som ved hjelp av algoritmer kan overvåke og rapportere om utstyrets tilstand (Ravnå og Schjølberg, 2016).

3.1.2 Vedlikeholdstyper

Vedlikehold deles inn i 2 hovedtyper, forebyggende vedlikehold og korrigerende vedlikehold. Figuren viser at ved et korrigerende vedlikehold stanser vedlikeholdsutviklingen brått i to underkategorier, akutt og utsatt. Ved forebyggende vedlikehold er det flere muligheter som åpner seg, blant annet tilstandsbasert vedlikehold som er avgjørende for denne oppgaven.



Figur 3.1.1: Vedlikeholdsformer fra standard for vedlikeholdsterminologi NS-EN 13306 (Standard Norge, 2019).

Korrigerende vedlikehold er vedlikeholdet som utføres etter at en feil er oppstått. Hensikten er å gjenopprette utstyret tilbake til en tilstand som gjør det mulig å fortsette å utføre en krevd funksjon (Bye, 2009). Korrigerende vedlikehold kan være forutsett – svikt i utstyr man har regnet med på forhånd og har beredskap for å reparere, eller uforutsett – akutt svikt i utstyr, som kan forårsake ytterligere konsekvenser eller skader (Norsk Industri, 2023).

NS-EN 13306:2017 definerer korrigerende vedlikehold som: *Vedlikehold som utføres etter at en feil er funnet, og som har som formål å gjenopprette en enhet til en tilstand der den kan oppfylle krevd funksjon* (Standard Norge, 2019).

En annen type vedlikehold er *forebyggende vedlikehold*. Forebyggende vedlikehold utføres før en funksjonssvikt, hvor hensikten er å forhindre, utsette eller minimere sjansen for svikt og samtidig sikre at utstyret fungerer optimalt (Bye, 2009). Forebyggende vedlikehold utføres som regel etter fastsatte intervaller eller kriterier (Jernbanedirektoratet, 2023).

NS-EN 13306:2017 definerer forebyggende vedlikehold som: *Vedlikehold som utføres for å vurdere og /eller minske degradering og redusere sannsynligheten for svikt i en enhet* (Standard Norge, 2019).

Tilstandsbasert vedlikehold er vedlikehold som gjennomføres enten kontinuerlig (målinger), periodisk (inspeksjon/kontroll, målinger, funksjonstest) eller ved behov (Bye, 2009). Hensikten er å avgjøre om det er problemer med utstyret, og alvorlighetsgraden av problemet og hvor lenge utstyret kan kjøres før det feiler. Metoden kan også bidra til å identifisere problemer hos spesifikke komponenter i utstyret som svekkes (Moblely, 2002).

NS-EN 13306:2017 definerer tilstandsbasert vedlikehold som: *Forebyggende vedlikehold som omfatter vurdering av fysisk tilstand, analyse og mulige påfølgende vedlikeholdstiltak* (Norsk standard, 2019).

For at tilstandsbasert vedlikehold kan benyttes bør følgende kriterier være oppfylt ifølge Hansen (2016):

- Det må være mulig å detektere redusert sviktmotstand for en spesifikk feilmode.
- Det må være mulig å definere en potensiell svikttilstand som kan bli detektert av en eksplisitt aksjon.
- Det må være et rimelig konsekvent aldersintervall mellom tiden fra en potensiell svikt til en funksjonell svikt oppstår.

Tilstandsovervåkning vil være sentralt ved *tilstandsbasert vedlikehold*. Tilstandsovervåkning handler om å overvåke og måle utstyrsparementer for å kunne identifisere endringer som kan indikere en kommende feil. Tilstandsovervåkning innebærer ikke faktiske reparasjoner, men er nyttig for å varsle behovet for reparasjoner eller vedlikehold, og vil bidra til å øke driftssikkerhet (Petersen, 2015)

Prediktivt vedlikehold er en form for tilstandsbasert vedlikehold hvor hensikten er å utføre vedlikehold på bakgrunn av utstyrets estimerte tid til svikt. Estimater kan for eksempel komme fra analyse av sensordata gjennom maskinlæring. Mulighetene for innhenting og analyse av data har økt betraktelig de siste årene gjennom blant annet sensorteknologi, hvor metodene bidrar til at man kan oppnå høyere nøyaktighet på denne typen prediksjoner enn tidligere (Prevas, 2022).

NS-EN 13306:2017 definerer prediktivt vedlikehold som: *Tilstandsbasert vedlikehold som utføres etter en prognose utledet av gjentatt analyse eller kjente egenskaper og evaluering av de vesentlige parameterne for degradering av enheten* (Standard Norge, 2019).

3.1.3 Vedlikeholdsterminologi

MTBM

Mean time between maintenance (MTBM) er gjennomsnittlig driftstid mellom vedlikehold. Beregningen brukes for vedlikeholdsaksjoner som både er korrigerende og forebyggende. Formelen er gitt ved formel 3.1, hvor T_i er oppetid, og n er antall stopp (Bye, 2009).

$$MTBM = \frac{1}{n} \sum (T_i) \quad (3.1)$$

MDT

Mean Down Time (MDT) beregner tiden en vedlikeholdsaksjon tar fra start til slutt. Beregningen inkluderer all nedetid som følge av korrektivt vedlikehold, forebyggende vedlikehold og ventetid. Formelen er gitt ved formel 3.2, hvor D_i er nedetid og n er antall stopp (Bye, 2009).

$$MDT = \frac{1}{n} \sum (D_i) \quad (3.2)$$

Tilgjengelighet

Tilgjengelighet defineres i vedlikeholdsstandarden NS-EN 13306 som “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, 2019). For denne oppgaven er det valgt å regne på operasjonell tilgjengelighet som er tilgjengelighet oppnådd med hensyn på korrigerende og forebyggende vedlikehold, administrasjon og ventetid. Formelen for virkelig operasjonell tilgjengelighet er gitt ved formel 3.3 (Bye, 2009).

$$Aop.virk = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} \quad (3.3)$$

Vedlikeholdsvennlighet

Vedlikeholdsvennlighet defineres i vedlikeholdsstandarden NS-EN 13306 som «enhetens evne under gitte bruksforhold til å opprettholde eller gjenopprette sin tilstand slik at den kan utføre krevd funksjon, når vedlikeholdet utføres under gitte forhold og med gitte prosedyrer og ressurser.» (Standard Norge, 2019).

En begrepsmerknad som står om vedlikeholdsvennlighet, er at det kan kvantifiseres ved å bruke hensiktsmessige mål eller indikatorer og kalles da for «evnen til å la seg vedlikeholde» (Standard Norge, 2019). I denne oppgaven er det valgt å måle vedlikeholdsvennligheten på fire faktorer:

- tilgang til komponentene
- enkel montering/demontering
- kompleksitet på systemet
- tydelig og detaljert dokumentasjon

Eksempelvis, en samlet karakter på 5, som er høyeste karakter, vil bety slik at tilgangen er god, det er enkelt å montere/demontere, kompleksiteten er lav, og systemet er tydelig og detaljert dokumentert.

3.2 Analysemetoder

3.2.1 Konsekvensklassifisering

Table C. 1 - Example of consequence classification matrix

Consequence category	C1	C2	C3
Safety	No potential for injuries. No effect on safety systems.	Potential for injuries requiring medical treatment. Limited effect on safety systems.	Single/multiple fatality or serious personnel injuries. Render safety critical systems inoperable.
Environment	No/minor spill	Medium discharge	Major discharge
Production	No production loss	Delayed effect on production (no effect in x days) or reduced production	Down time loss of production DT > X days
Other	No operational or asset cost consequences Cost < X (USD)	Moderate operational or asset cost consequences X < Cost < Y (USD)	Significant operational or asset cost consequences Cost > Y (USD)
Containment	Non-flammable media Non-toxic media Natural/normal pressure /temperature media	Flammable media below flashpoint Moderately toxic media High pressure/ temperature media (>100 bar/80 °C)	Flammable media above flashpoint Highly toxic media Extremely high pressure /temperature media

Figur 3.2.1: Eksempel på konsekvensklassifiseringsmatrise (NORSOK Z-008:2017)

Konsekvensklassifisering er en metode for å klassifisere kritikalitets nivået for systemer og utstyr og vil fungere som et verktøy for å skille kritiske og ikke kritiske komponenter (Seterdal, Andersen Heimstad 2018). Hensikten med en konsekvensklassifisering er å få bedre kontroll på kritisk utstyr, gi føringer på hvilket utstyr som skal ha forebyggende vedlikehold, forenkle prioritering av korrigerende vedlikeholdsordre og utøve reservedelsstyring basert på kritikalitet (Fordal, 2021).

Standard NORSOK Z-008:2017

NORSOK-standarder er utviklet av norsk petroleumsindustri og gjelder for forberedelse og optimalisering av vedlikeholdsaktiviteter for alle anlegg, systemer og utstyr (Standard

Norge, 2019). Standarden NORSOK Z-008:2017 danner grunnlaget for gjennomføring av konsekvensklassifisering av utstyr (Fordal, 2021).

NORSOK Z-008:2017 har laget en egen konsekvensklassifiseringsmatrise, vist i figur 3.2.1 som kan brukes til å definere konsekvensklassen til et utstyr (C1, C2 eller C3, der C3 representerer de mest alvorlige konsekvensene). Under sorteringsprosessen kan det være lurt å undersøke utstyret som havner under kategorien C3 først, hvor det også kan være nødvendig med en FMECA.

3.2.2 FMECA

FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis) er en strukturert metode som er brukt til å vurdere effekten på et system av hver potensielle komponentfeil. FMECA utføres ved å analysere hver komponent i systemet for å identifisere hvordan den kan svikte (feilmode) og hva som kan være konsekvens av en slik feil i systemet (feileffekt) (Rausand, 2014).

Målene for en FMECA er:

- Identifisere feilmode
- Bestemme årsakene til feilmodene
- Identifisere effektene hver feilmode kan ha på resten av systemet
- Beskrive hvordan feilmodene kan oppdages
- Bestemme hvor ofte hver feilmode oppstår (frekvens)
- Finne ut hvor alvorlig de ulike feilmodene er (konsekvens)
- Vurdere risiko knyttet til hver feilmode
- Identifisere risikoreducerende tiltak

(Rausand, 2014)

Analysen er nyttig for å lage et diagnosesystem som gjenkjenner mønstre, og der et sett med tilstander overvåkes kontinuerlig. Når en feilmode blir identifisert, kan den noteres sammen med mønsteret til de overvåkede tilstandene og benyttes for fremtidig referanse (Williams, Davies Drake, 1994, s.123).

Standard IEC 60812:2018

IEC 60812:2018 er en av flere standarder utformet av International Electrotechnical Commission. Standarden forklarer hvordan FMEA og FMECA planlegges, utføres, dokumenteres og vedlikeholdes. FMECA analysen er vanligvis dokumentert i et spesifikt FMECA skjema som vist i figur 3. Skjemaet som blir fulgt i denne rapporten er hentet fra Martin Rausand sin bok System Reliability Theory og følger IEC 60812:2018.

System: _____ Performed by: _____
 Ref. drawing no.: _____ Date: _____ Page: of _____

Description of unit			Description of failure			Effect of failure		Failure rate	Severity ranking	Risk reducing measures	Comments
Ref. no	Function	Operational mode	Failure mode	Failure cause or mechanism	Detection of failure	On the subsystem	On the system function				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)

Figur 3.2.2: FMECA skjema, (Rausand, 2014, s.73)

Frekvens og konsekvens

FMECA-skjemaet i IEC 60812:2018 standarden skiller mellom frekvens og konsekvens, som begge er underkategorier innenfor risiko. Frekvens refererer til hyppigheten av feil, mens konsekvens beskriver den potensielle påvirkningen en feil kan ha på enheten (Rausand,

2014).

Figur 3.2.3 viser et frekvensskjema brukt for å klassifisere frekvens hver komponent ble vurdert til.

Klasser	Sannsynlighet	Frekvens
1.	Svært lite sannsynlig	Mindre enn 1 gang pr. 1 000 år
2.	Lite sannsynlig	1 gang pr. 100–1 000 år
3.	Sannsynlig	1 gang pr. 10–100 år
4.	Ganske sannsynlig	1 gang pr. 1–10 år
5.	Svært sannsynlig	Mer enn 1 gang pr. år

Figur 3.2.3: Frekvensskjema (Pedersen, 2021)

Konsekvensskjemaet presentert i figur 3.2.4 er brukt til å tallfeste konsekvensnivået hver komponent ble vurdert til.

Konsekvens	For mennesker	For materielle verdier	For miljø
1. Liten	Små personskader	Mindre enn 0.2 mill kr.	Lite omfang kort restitusjonstid
2. Middels	Alvorlige personskader	0.2–2 mill kr.	Stort omfang kort restitusjonstid
3. Stor	1–2 døde	2–20 mill kr.	Noe omfang lang restitusjonstid
4. Svært stor	3–10 døde	20–200 mill kr.	Stort omfang lang restitusjonstid
5. Katastrofal	Mer enn 10 døde	Mer enn 200 mill kr.	Stort omfang varig skade

Figur 3.2.4: Konsekvensskjema (Pedersen, 2021)

Figur 3.2.5 viser en fargetabell som er benyttet for å gi en indikasjon på frekvens og konsekvens.

Kategori	1 - Neglisjerbar	2 - Lav	3 - Medium	4 - Høy	5 - Ekstrem

Figur 3.2.5: Fargekartskjema

Risikomatrise

En måte å vurdere risiko på er å benytte en risikomatrise, som vist i figur 3.2.6. Dette er et verktøy som brukes innenfor risikostyring hvor matrisen ofte illustrerer risikoen i

to dimensjoner; konsekvens og frekvens. Risiko kan da uttrykkes som produktet av de to, det vil si sannsynlighet multiplisert med mulig konsekvens. Produktet vil bli et tall som videre kan plasseres i matrisen. Tallet og plasseringen vil gi en bedre indikasjon på alvorlighetsgraden til feilen (Aven, 2007).

Konsekvens	5	5	10	15	20	25
	4	4	8	12	16	20
	3	3	6	9	12	15
	2	2	4	6	8	10
	1	1	2	3	4	5
		1	2	3	4	5
		Frekvens				

Figur 3.2.6: Risikomatrixe

3.3 Økonomiske begreper

3.3.1 Nåverdianalyse

Ved å utføre en nåverdianalyse kan man se på verdien av en investering ved å diskontere fremtidige kontantstrømmer tilbake til nåverdien (UiO, 2023). Formelen for nåverdianalyse er gitt ved formel 3.4, hvor x_n er konstantstrøm i periode n , I_0 er investeringsbeløpet, r er avkastningskravet og t er antall perioder.

$$NNV = \sum_{t=1}^n \frac{x_n}{(1+r)^t} - I_0 \quad (3.4)$$

3.3.2 Internrente

Internrente er en nyttig metode for å evaluere om et prosjekt er verdt å investere i eller ikke. Dersom internrenten er høyere enn den forventede avkastningen på investeringen kan

prosjektet være en god investering. Hvis internrenten er lavere enn forventet avkastning kan det være bedre å vurdere andre investeringsalternativer (UiO, 2023). Internrenten til en kontantstrøm er diskonteringsrenten der dens nettonåverdi er lik 0 (Johnstone, 2010). Formelen for internrente er gitt ved formel 3.5, hvor x_n er konstantstrøm i periode n , I_0 er investeringsbeløpet, r er avkastningskravet og t er antall perioder.

$$\sum_{t=1}^n \frac{x_n}{(1+r)^t} - I_0 = 0 \quad (3.5)$$

3.4 Måleprinsipp

3.4.1 Potensiometer

Et potensiometer, som er vist i figur 3.4.1, kan benyttes som en form for posisjonsmåler. En konstant spenning påtrykkes en motstandsbane som kan være lineær eller sirkulær, og en børste glir langs denne banen. Formel 3.6 for å finne posisjonen x til børsten, hvor U_m tilsvarer børstens spenning, U er påtrykt spenning og x_{max} er det maksimale utslaget (Olsen, 2020, s.84)

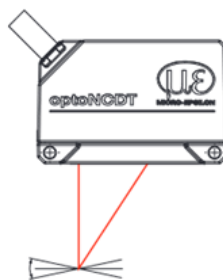


Figur 3.4.1: Illustrasjon av potensiometer i tre forskjellige faser (Kjell & Company, 2017).

$$x = x_{max} \cdot \frac{U_m}{U} \quad (3.6)$$

3.4.2 Lasertriangulering

En annen form for posisjonsmåling er lasertriangulering. I lasertriangulering som vist i figur 3.4.2, dannes tre hjørner av en trekant av en koherent lyskilde, overflaten på målobjektet og deteksjonssystemet som inneholder fotodetektoren. Det er viktig at overflaten på målet eller deler av overflaten er reflekterende. Laserstrålen treffer målet og reflekteres fra det. Det reflekterende lyset samles opp av fotodetektoren, som kan være en hvilken som helst type fotodiode avhengig av bruksområdet. Enhver bevegelse av målet resulterer i en endring i intensiteten av det fokuserte lyspunktet på fotodetektoren. Ved å bruke denne variasjonen i intensiteten kan avstanden til objektet måles (Sutar, 2021).



Figur 3.4.2: Illustrasjon av lasertriangulering (MICRO-EPSILON, 2023).

3.4.3 Emissivitet

Emissivitet er evnen et materiale har til å avgi termisk stråling. Emissivitet betegnes som ϵ og har en verdi mellom 0 og 1. Emisjonsfaktoren blir funnet ved å bruke et svart legeme som har emissivitet 1, men som egentlig ikke finnes, til å finne den virkelige strålingen et objekt har. Emisjonsfaktoren er da forholdet mellom strålingen som objektet hadde gitt ut om det hadde vært et svart legeme, i forhold til hva som egentlig stråler ut av legemet. Emissiviteten til et objekt kan variere med forskjellige faktorer som overflatestruktur, overflateform, målevinkel, grad av oksidasjon på metallet og temperatur. Legemets emisjonsfaktor gir informasjon om hvor reflekterende strålingene fra legemet er. Om emisjonsfaktoren er høy vil det si at refleksjonen av strålinger er lav og at temperaturen som IR-sensoren viser er riktig. Mye av disse strålingene er da egenutstrålinger (Pedersen, 2022).

3.5 Sensorikk

3.5.1 Ingress Protection klassifisering

NEK IEC 60529:1989+A1:1999+A2:2013 er en standard som benyttes til å beskrive og klassifisere beskyttelsesevnen til beholdere/dekslene til elektroniske komponenter. I figur 3.5.1 presenteres en forklaring på IP klassifisering. Eksempelvis vil IP klasse 65 være et deksel som er støvtett med evnen til å motstå spyling av vann (Standard Norge, 2013).

Element	Numerals or letters	Meaning for the protection of equipment
Code letters	IP	–
First characteristic numeral	0 1 2 3 4 5 6	Against ingress of solid foreign objects (non-protected) ≥ 50 mm diameter ≥ 12,5 mm diameter ≥ 2,5 mm diameter ≥ 1,0 mm diameter dust-protected dust-tight
Second characteristic numeral	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	Against ingress of water with harmful effects (non-protected) vertically dripping dripping (15° tilted) spraying splashing jetting powerful jetting temporary immersion continuous immersion High pressure and temperature water jet

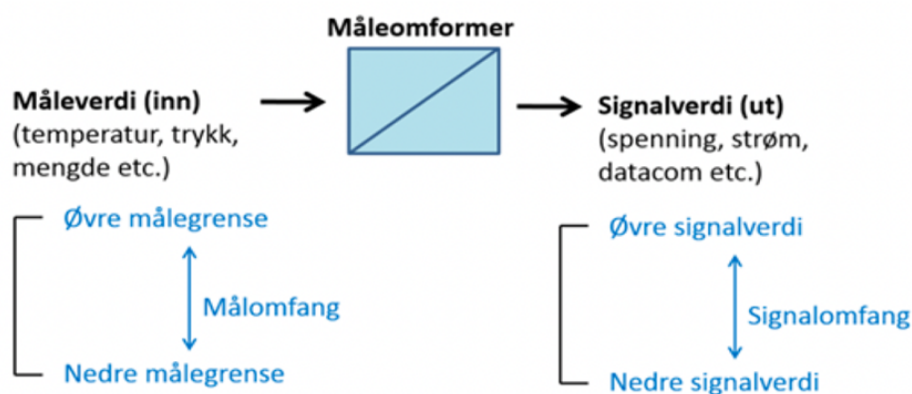
Figur 3.5.1: Forklaring av IP klassifisering (Standard Norge, 2013).

3.5.2 Sensorteknologi

Grunnlaget for digitalisering og automatisering er sensorteknologi. En sensor er en komponent som kan måle et fysisk fenomen eller en tilstand, og omforme denne informasjonen til et elektrisk signal. Signalet kan videre leses og behandles av en elektronisk enhet som for eksempel en datamaskin. For at en sensor skal fungere effektivt må den være følsom for det fysiske fenomen som skal måles. Det er også viktig at den ikke blir forstyrret av andre fysiske fenomener som igjen kan påvirke målenøyaktigheten (UiO, 2013).

3.5.3 Måleomformer

En sensor registrerer den fysiske størrelsen. En måleomformer, også kalt transmitter, omformer den fysiske størrelsen til et standard elektrisk signal. Det finnes en nedre og øvre målegrense for hvilken verdi måleomformerer kan håndtere. Figur 3.5.2 viser måleverdi inn som håndterer et måleomfang mellom nedre og øvre målegrense til for eksempel temperatur eller trykk. Måleomformerer gjør så om signalverdi der målegrense blir definert ved øvre eller nedre signalverdi til for eksempel strøm (vanligvis 4-20 mA) eller spenning (vanligvis 0-10V) (Norsk Industri, 2013).



Figur 3.5.2: Måleomformer funksjon (Norsk Industri, 2013).

3.5.4 Målenøyaktighet

Med målenøyaktighet menes hvor nærme den målte verdien er den faktiske verdien. Vi skiller mellom dynamisk og statisk nøyaktighet (Norsk Industri, 2013).

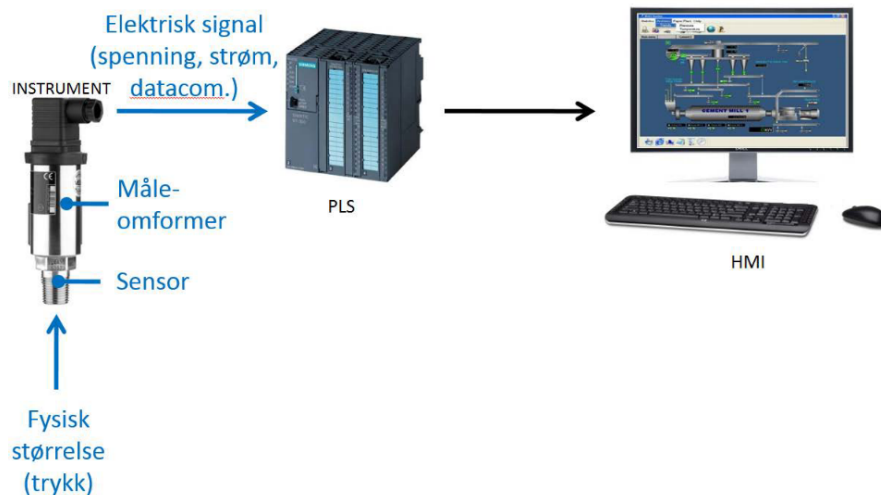
Dynamisk nøyaktighet er hvor raskt måleren klarer å henge med på variasjonen til målevariabelen. Det vil si at måleren har en viss treghet og at hvis endringer i målevariabelen foregår hurtig, vil man i et øyeblikk få unøyaktige målinger. Om endringen foregår sakte, vil det dynamiske avviket påvirke målingene i liten grad (Norsk Industri, 2013).

Statisk nøyaktighet inntreffer først når de dynamiske forholdene har stabilisert seg. Denne nøyaktigheten kan finnes ved å se på oppløsningsevne, repetebarehet, reproduserbarhet, hysteres, linearitet, aldring og avvik (Norsk Industri, 2013).

For denne oppgaven er avvik av størst betydning og kan observeres i de tekniske databladene til instrumentene. Et avvik vil være like stort over hele måleområdet. For de fleste måleinstrumenter vil avviket variere over måleområdet, selv om dette er oppgitt som et fast tall.

3.5.5 Signalovertføring

Det elektriske signalet fra måleomformereren overføres via en analog til digital konverter, og overføres til et styresystem ofte lokalisert i et kontrollrom som vist i figur 3.5.3. Disse styresystemene omtales som programmerbar logisk styring (PLS). Fra PLS overføres signalet til en skjerm, og disse skjermene blir ofte kalt Human Machine Interface (HMI) (Norsk Industri, 2013).



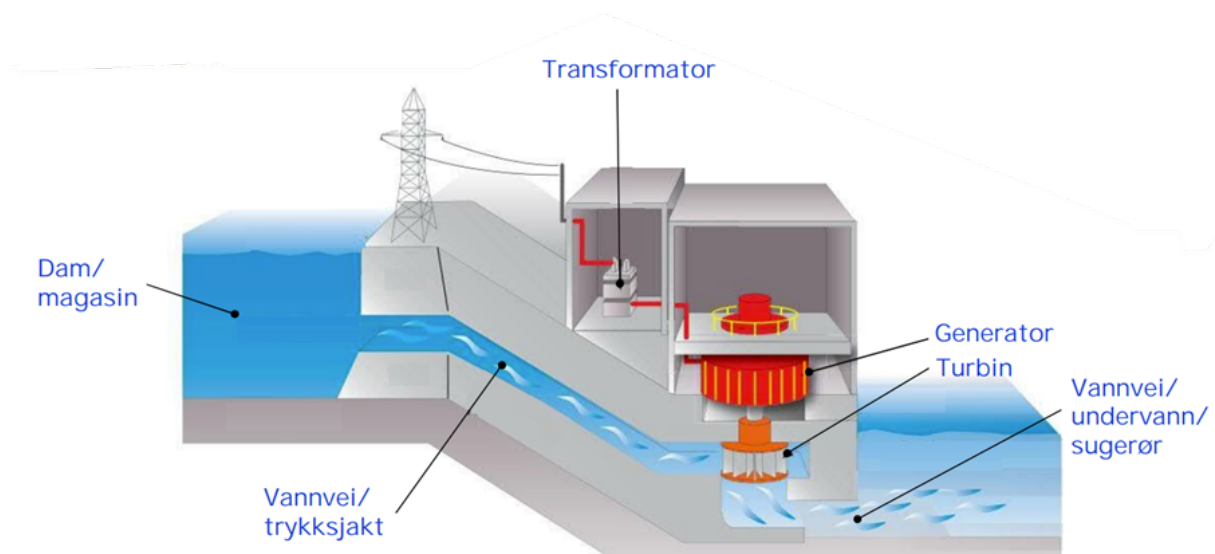
Figur 3.5.3: Signalovertføring (Norsk Industri, 2013).

Kapittel 4

Generator

Kapittel 4 tar for seg en kort beskrivelse av oppbygningen til en generator og beskrivelse av børstesystemet. Videre tar kapittelet for seg børsteslitasje og utfordringer ved dette, samt utfordringer ved implementering av tilstandsovervåkning i børstesystemet.

4.1 Generell oppbygning



Figur 4.1.1: Illustrasjon av turbin og generator (ABB, 2021).

En generator er en maskin som konverterer mekanisk energi til elektrisk energi. Prinsippet er basert på Faradays lov om induksjon, som sier at når en elektrisk leder beveger seg gjennom et magnetfelt vil det induseres en spenning i lederen. Generatoren består av en rotor som er koblet til en turbin, og en stator som er festet til et fundament og står stille, se figur 4.1.1. Rotor mates med elektrisk strøm og setter opp et magnetfelt. Når turbinen roterer vil den drive rotoren rundt, og magnetfeltet fra rotor vil bevege seg over statorspolene og produsere elektrisk strøm i disse (Hofstad, 2020).

4.2 Børstesystemet

Magnetiseringssystem

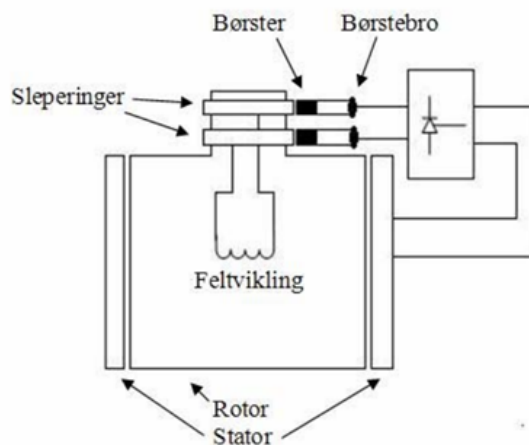
Den tradisjonelle måten å magnetisere på har vært via børster og sleperinger. Her finnes det to alternativer. Det ene alternativet er å ha en egen magnetiseringsmaskin, også kalt en DC-generator, som plasseres på toppen av akslingen. Denne genererer likestrøm som mates inn i rotorens magnetiseringssystem via børster og sleperinger. En annen måte, mye brukt i større vannkraftverk, er det statiske magnetiseringssystemet. Her overføres DC-strømmen direkte via børster og sleperinger til rotorens magnetiseringssystem. Dette systemet er vanligere i større anlegg, og gir en enklere og mer pålitelig magnetisering sammenlignet med egen magnetiseringsmaskin (Sivertsen, 2009).

Magnetisering av maskiner uten børster kan gjøres ved å bruke en ytterpolmaskin som genererer en vekselstrøm i rotor, og som likerettes i en roterende diodelikeretter på akselen. Dette betyr at det ikke trengs børster som har kontakt med rotorakselen. Imidlertid kan denne metoden gi en treg regulering av generatoren sammenlignet med et statisk magnetiseringssystem med børster. Videre har Statnett, som er det systemansvarlige selskapet for kraftsystemet i Norge, en begrensning på 25 MVA for børsteløs magnetisering av generator (Skjølberg, 2006).

Komponenter i et statisk magnetiseringssystem

I et statisk magnetiseringssystem inngår ulike komponenter, som vi i denne oppgaven

definerer ved et børstesystem. Et utvalg av komponentene i børstesystemet er; børster, børstebro, børsteholder og sleperinger som vist i figur 4.2.1.



Figur 4.2.1: Skisse av magnetiseringsutstyr for statisk magnetisering (Brodtkorb, 2006).

Børstene har som oppgave å overføre elektrisk strøm fra det stasjonære magnetiseringsutstyret til de roterende sleperingene i generatoren (Skjølberg, Ohma Runde, 2009). Børstene sitter i børsteholdere, som skal holde børstene på plass med riktig trykk mot sleperingen. For å sikre kontakten med sleperingene er børstene typisk fjærbelastede, og det er viktig at de er riktig justert for å holde en jevn elektrisk kontakt. Dersom børstene ikke har kontakt med sleperingene, vil ikke strømmen kunne overføres (Skjølberg, Ohma Runde, 2009).

Sleperingene sitter rundt rotorakselen og roterer sammen med rotor. En slepering er laget av metaller med høy ledningsevne og god motstand mot korrosjon og slitasje, som oftest stål eller messing. Overflaten på sleperingene er som regel polert og glatt for å sikre best mulig kontakt mot børstene (Skjølberg, 2006). Sleperingene er videre koblet til polviklingens positiv pol og negativ pol via en ledende vei gjennom akselen. Som vist i figur 14 illustrerer det en feltvikling som har ulik polaritet opp fra rotor til kontakt med hver av sleperingene. Det er flere måter å føre feltviklingen til sleperingene gjennom akslingen; det er normalt å benytte enten kabler eller kobberskinner (Sivertsen, 2019).

Elektriske isolatorer

Elektriske isolatorer er en gjenstand bestående av et dielektrikum med en lav elektrisk ledningsevne for å hindre en strømgjennomgang (Hofstad, 2020). I generatoren brukes en isolator for å hindre elektrisk strøm fra å gå gjennom uønskede baner eller kretser.

4.3 Vedlikehold og børsteslitasje

En utfordring som oppstår i børstesystemet er oppsamling av børstestøv som dannes når kullbørstene slites. Slitasjen blir til når sleperingene roterer og de stillestående kullbørstene presses inn mot denne. Når børstene slites ned dannes det elektrisk ledende børstestøvet, delvis svevende i luften, og dette kan legge seg rundt i generatortoppen. Børstestøvet kan legge seg på overflaten av isolatorer og danne egne ledende baner for krypstrømmer. Dette gir økt risiko for havari og overslag, og kan resultere i uplanlagt stans. Børsteslitasje kan også føre til feil i andre elektroniske komponenter som medfører ineffektivitet og ujevn strømovertføring (Skjølberg, 2006).

En generator vil som oftest gjennomgå en stor revisjon med total demontering av rotor med et tidsintervall på 15 – 25 år. I forbindelse med stor revisjon vil som oftest hele rotor og stator rengjøres, blant annet på grunn av børstestøv. Dette er en omfattende rengjøringsjobb som kan ta 3 – 5 dager med minimum 2 – 3 personer. I noen tilfeller kan problemet med forekomst av børstestøv i generatoren bidra til at intervallet mellom store revisjoner må kortes inn, spesielt der det er forekomst av oljedamp fra lagrene i tillegg, men dette er individuelt fra generator til generator.

Faktorer som påvirker børsteslitasje

Det er flere faktorer som påvirker slitasje på børstene i en generatortopp. Tabell 4.3.1 lister noen eksempler.

Tabell 4.3.1: Faktorer som kan påvirke børsteslitasje.

Luftfuktighet
Temperatur
Strømtetthet
Børstetrykk
Overflate slepering
Vibrasjon på børstene
Kjemiske bestanddeler i luften

Luftfuktighet under stillstand kan føre til korrosjon av børster og sleperinger, noe som resulterer i nedbrytning av slepering og økt børsteslitasje. Det er anbefalt med en luftfuktighet over $4.9\text{g}/\text{m}^3$. Børsteslitasjonen kan øke dersom luftfuktigheten underskrider $2.3\text{g}/\text{m}^3$ (Brodtkorb, 2006).

Ved svært høy *temperatur* i kontaktpunktene mellom børste og slepering kan karbon begynne å fordampe. Når karbonet fordamper og legger seg på sleperingen, kan det dannes smuss. Dersom smussnivået blir høyere enn det børstene klarer å rense bort, vil smusset bygge seg opp og resultere i økt børsteslitasje (Brodtkorb, 2006).

Strømtetthet kan økes ved å redusere antall børster, eller reduseres ved å øke antall børster. Overvåkning av elektriske parametere som børstespenningsfall og strøm kan gi innsikt i børstenes tilstand. En økning i disse parametrene utover normale driftsverdier kan indikere økt børsteslitasje eller dårlig børstekontakt, noe som kan være indikasjon på forestående børstebytte (Brodtkorb, 2006).

Hvis *børstetrykket* er for lavt, vil det føre til dårlig elektrisk kontakt og økt elektrisk slitasje. Ved økende børstetrykk, vil den mekaniske slitasjonen øke. Det anbefales å opprettholde et børstetrykk på $150 - 285\text{ g}/\text{cm}^2$. Videre bør det være en begrensning på maksimalt 1% variasjon i børstetrykket mellom børstene på samme slepering for å

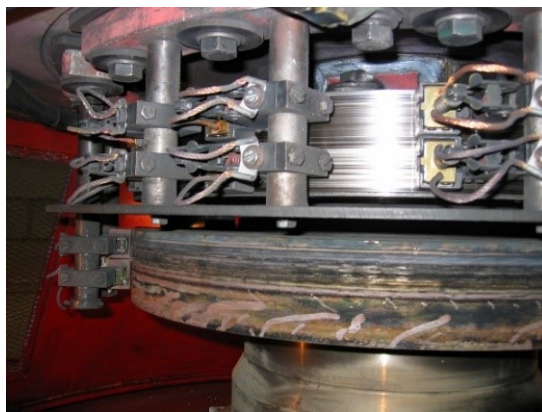
unngå ujevn strømfordeling (Brodtkorb, 2006).

Ujevn overflate på slepering i form av sporing, altså synlige og følbare riper, vil forplante seg over til kullbørstene som videre fører til økt børsteslitasje. For å unngå dette anbefales det å ha høy strømtetthet, lite oljedamp og velge riktig type kullbørster (Brodtkorb, 2006).

Et dårlig design av børsteholderne kan føre til *vibrasjoner* som gir økt slitasje. Overvåkning av vibrasjonsnivåer i generatoren kan også gi informasjon om børsteslitasje. Høye vibrasjonsnivåer kan indikere ujevn børsteslitasje eller ustabilitet i børstene, og dette bør fikses. Ved å bruke børsteholdere som gir børstene en viss vinkel i forhold til sleperingenes radius, kan man eliminere muligheten for at børstene beveger seg fritt (Brodtkorb, 2006).

Tilstedeværelsen av *kjemiske bestanddeler i luften* nær slepering og børster kan forårsake økt børsteslitasje. Spesielt skadelig er silikon og oljedamp. Disse stoffene inneholder flyktige molekyler som kan legge seg på slepering og børster. Når silikon for eksempel kommer i nærheten av børstene, kan det redusere børstenes levetid fra år til noen få uker. Oljedamp oppstår vanligvis fra generatorens bærelager og øvre styrelager. Olje er elektrisk isolerende og vil skape vanskeligheter for strømovertøringen dersom den legger seg på sleperingen. Videre kan oljen polymeriseres i kontaktflaten, og danne lange molekylkjeder. Dette gjør oljen mer viskøs og resulterer i utfordringer med å oppnå mekanisk og elektrisk kontakt (Brodtkorb, 2006).

For å unngå slitasje på børstene er det viktig å sikre at de vedlikeholdes regelmessig. Vedlikeholdet inneholder som oftest en visuell inspeksjon hvor slitasjelengden måles og børstene sjekkes for skader og justeres korrekt. Over tid anbefales en regelmessig utbytting før de slites helt ned eller har fått skade. Figur 4.3.1 og 4.3.2 viser situasjoner hvor en eller flere av de førnevnte parametrene ikke er blitt detektert, og som resulterte i uønskede korrektive hendelser.



Figur 4.3.1: Bilde hvor det har oppstått børstebrann: Anonymisert av sender.



Figur 4.3.2: Kortslutning sleperinger: Anonymisert av sender.

HMS ved børstestøv

Inhalering av børstestøv kan forårsake luftveisproblemer som hoste, tungpustethet og kortpustethet, og ved langvarig eksponering kan det føre til mer alvorlige luftveissykdommer. Børstestøvet kan også inneholde skadelige kjemikaler, og inhalering av disse stoffene kan over lang tid forårsake helseproblemer (FHI, 2023). Partiklene av børstestøv er også antennelige, og børstestøv kan derfor representere en brann- og eksplosjonsfare. For å minimere helsefarene for vedlikeholdspersonale er det også viktig å håndtere og fjerne støvet på riktig måte, bruke verneutstyr og sørge for god ventilasjon i generatortoppen.

4.4 Tilstandsovervåkning av børstesystemet

Tilstandsovervåkingssystemer eller sensorer kan gi sanntidsdata om børsteslitasje. Disse systemene kan inkludere sensorer som måler slitasjelengde, temperatur, strømtetthet eller andre relevante parametere, og kan gi automatiske varsler når børsteslitasjen når en forhåndsbestemt terskel. Ved å implementere slike systemer for tilstandsovervåkning kan man hindre at uønskede korrektive hendelser forekommer.

Utfordringer

I og rundt børstesystemet kan det være stor elektromagnetisk interferens (EMI). Dette kan være uønsket type forstyrrelser eller støy som påvirker den elektriske kretsen (Andersen, 2018). Det vil også være høye temperaturer.

Grunnet elektromagnetiske forstyrrelser og høy temperatur er det flere hensyn å ta når en skal velge sensorer for tilstandsovervåkning av børstesystemet. Først vil det være avgjørende å velge sensorer som kan utføre målinger med god avstand til måleobjektet slik at føleren ikke taper nøyaktighet og/eller funksjon. Det er også avgjørende at sensorens objekter ikke kommer i kontakt med måleobjektet på bakgrunn av at objektet leder strøm, som kan skade føleren. I tillegg er det viktig å sørge for at sensorene ikke reduserer vedlikeholdsvennligheten. Sensorene bør derfor ikke monteres for nære måleobjektet eller være så store at de bruker opp plassen man trenger for å utføre vedlikeholdet.

Som beskrevet er det et støvete miljø i maskintoppen: Fukt kan også oppstå, spesielt under renhold av denne. Det er derfor avgjørende at sensorene som presenteres har minimum IP klasse 65. Tallet 6 står for komplett beskyttelse mot støvgjennomtrenging og tallet 5 står for at spyling mot kapsling ikke skal ha skadelig virkning (Norsk Standard, 2013).

Aktuelle metoder for tilstandsovervåkning av børstesystem

I tabell 4.4.1 presenteres noen sensorer som er aktuelle å vurdere for å overvåke de nødvendige målevariablene, og det er antatt at de tar hensyn til de nevnte utfordringene. De aktuelle parametrene gruppen ønsker å fokusere på er avstand og temperatur. Disse sensorene blir nærmere presentert i kapittel 7.

Tabell 4.4.1: Sensorikk for tilstnadsovervåkning.

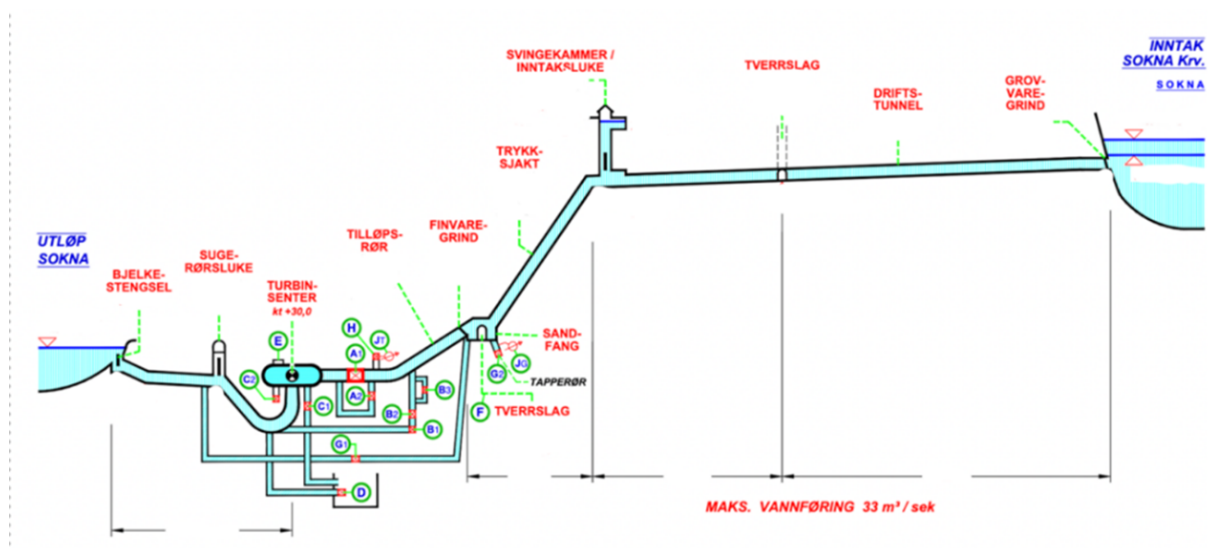
Målevariabel	Måleprinsipp
Avstand	Wire-sensor
Avstand	Laseravstandsmåler
Temperatur	IR-sensor
Temperatur	Termografisk kamera

Kapittel 5

Ståstedsanalyse

Kapittel 5 inneholder informasjonen samlet inn fra gjennomført ståstedsanalyse. Den har som hensikt å gi leseren en oversikt over hvordan generatoren på Sokna vannkraftverk driftes og vedlikeholdes i dag, og skal synliggjøre utfordringer på børstesystemet. Den tar for seg bakgrunn, eksisterende vedlikehold, IFS og kostnader.

5.1 Bakgrunn om Sokna vannkraftverk



Figur 5.1.1: Hydraulisk system, prinsippkisse av Sokna kraftverk.



Figur 5.1.2: Skjerm bilde tatt fra NVE atlas som viser vannkraftverkene; Sokna, Håen og Sama.

Sokna vannkraftverk er et mindre kraftverk i Melhus kommune i Trøndelag. Kraftverket utnytter et fall på rundt 181 meter. Vannet er fra elven Sokna og renner ut i elven Gaula etter å ha passert turbinen, se figur 5.1.1. Kraftverket har en installert effekt på 30MW når det går for fullt og en årlig produksjon på 155GWh (Trønderenergi, 2023).

Sokna kraftverk har som rolle å tilby nærsamfunnet en pålitelig strømkilde og defineres dermed som samfunnskritisk. Elektrisiteten som produseres sendes til distribusjonsnett, og Bane Nor henter også kjørestrom til Dovrebanen fra kraftverket. Via distribusjonsnett vil kraftverket støtte hjem, lokale bedrifter, infrastruktur og andre tjenester i områdene rundt.

I en situasjon hvor Sokna kraftverk må stanses er det ikke ønskelig å kjøre Sama og Håen kraftverk som ligger ovenfor Sokna (se figur 5.1.2 over). Dette er fordi det vil resultere i et vanntap. I spesielle tilfeller kan Sama og Håen bli pålagt å kjøre av staten for å tilføre energi til strømmettet. I dette tilfellet vil vannet som går igjennom disse produsere energi, men når vannet kommer ned til Sokna vil det gå til spille, og vannet vil renne over og

ut i elven slik at man ikke får produsert energien. En slik situasjon med varighet 1 uke, vil dette koste tilnærmet 4,1 millioner. Dette er bekreftet av produksjonsavdelingen til Aneo.

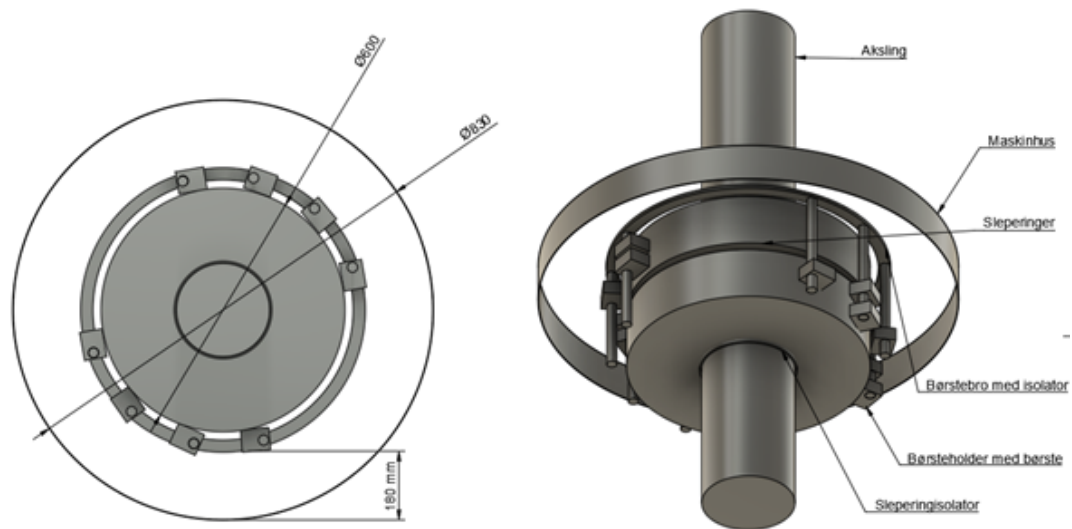
5.1.1 Generator på Sokna



Figur 5.1.3: Bilder tatt av generator på Sokna vannkraftverk (2023).

Sokna kraftverk har en trefaset generator. Det er ingen redundans for generatoren. Generatoren har to sleperinger som har kontakt med seks kullbørster hver. Figur 5.1.3 viser bilder av maskintoppen.

Størrelsen på maskintoppen er relativt liten, noe som påvirker børstesystemets vedlikeholdsvennlighet. Tilgangen til børstesystemet er enkel, og personale kommer til ved å åpne luker rundt toppen. Det er ikke mye plass der inne, noe som gjør renholdet mindre omfattende, men kan samtidig gi utfordringer for rengjøring i små sprekker og områder hvor børstestøv legger seg. Dette kan føre til at enkelte områder kan bli oversett, og det samles opp børstestøv. Avstanden fra sleperingene til børsteholder er målt til å være ca. 18 cm, diameteren på sleperingene er på ca. 60 cm og diameteren på maskintoppen i området rundt sleperingen er på ca. 83 cm. Se mål i figur 5.1.4.



Figur 5.1.4: En enkel sammenstilling av generatortoppen, laget ut ifra avleste mål fra IFS. Komponenter kartlagt med navn (Eget bilde av forfatter, 2023).

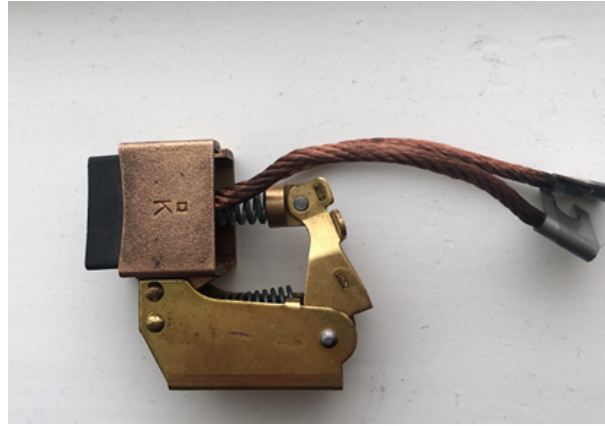
Generatoren har en installert vifte med filter som fungerer som et avtrekkssystem og som suger til seg deler av børstestøvet. Denne er installert på luken til huset som vist i figur 5.1.5.



Figur 5.1.5: Bilde av avtrekkssystem generator på Sokna (Eget bilde av forfatter, 2023).

Kullbørstene som benyttes på børstesystemet heter Egor og er levert av Kymar, se figur 5.1.6. Børstene koster 600kr pr. stk. og børsteholderne koster 5 000kr pr. stk.. Det er en

leveringstid på 5 uker for børstene. Aneo bestiller store kvantum i perioder, og utstyret vil alltid være tilgjengelig i lagerbeholdningen.



Figur 5.1.6: Bilde av kullbørster i børsteholder (Eget bilde av forfatter, 2023).

HMS på sokna

I et tilfelle hvor det skulle oppstå brann som resultat av problemer på generator vil som regel faren bli eliminert så fort som mulig gjennom umiddelbar frakobling og stans av generator, og iverksettelse av slukkesystemer. Sokna kraftverk har også effektive brannforebyggings- og slukningstiltak på plass. Sjansen for en større spredning er derfor liten, og trussel for miljø og mennesker vil være minimal.

5.2 Vedlikehold

Aneo benytter seg av IFS som deres vedlikeholdsstyringssystem, og her genereres arbeidsordrer og gjennomført vedlikehold loggføres. Når det opprettes arbeidsordre i IFS legger vedlikeholdspersonalet for Aneo inn disse under ulike kategorier. Historikk i IFS viser at vedlikehold som har blitt loggført tidligere kategoriseres som planlagt korrektivt vedlikehold, uplanlagt korrektivt vedlikehold eller driftsoppgaver, se figur 5.2.1. Uplanlagt korrigerende vedlikehold er vedlikeholdet som utføres etter en feil er oppstått, planlagt korrigerende vedlikehold tilsvarer forebyggende vedlikehold, som utføres for å forhindre eventuelle feil, og driftsoppgaver inkluderer både korrigerende og forebyggende

vedlikehold.

UPLANLAGT KORREKTIVT VH	
Driftsoppgaver	
Driftsoppgaver	
UPLANLAGT KORREKTIVT VH	
UPLANLAGT KORREKTIVT VH	
PLANLAGT KORREKTIVT VH	

Figur 5.2.1: Skjermbildet fra IFS av registrert vedlikehold.

5.3 Årlige vedlikeholdsaksjoner og tilgjengelighet

Under intervjuet fortalte senioringeniør på Sokna kraftverk at de hele tiden fokuserer på kontinuerlig forbedring og en så høy tilgjengelighet som mulig. Det ønskes minst mulig nedetid for utført vedlikehold.

Vedlikeholdsaksjoner

Ved Sokna vannkraftverk gjennomføres det en månedlig stasjonsrunde som en form for forebyggende vedlikehold. Stasjonsrunden utføres av 1-2 personer hvor det følges en standard prosedyre med sjekkliste. Her inngår en visuell inspeksjon av børstesystemet hvor slitaselengde og mengde børstestøv blir observert. Runden foregår mens generatoren er i drift, som vil si ingen nedetid. Skulle det observeres at børster har behov for utskifting på denne runden, vil dette bli gjort ved neste planlagte stans, eller en stans må planlegges for bytting så snart som mulig. Bytteintervallet på børstene er ulikt og byttes etter individuell vurdering av vedlikeholdspersonalet. Det blir gjennomsnittlig årlig byttet 10 børster, og hvert bytte resulterer i stans på 0,75 timer.

En annen type forebyggende vedlikehold som gjennomføres er rengjøring av maskintoppen. Dette er en vedlikeholdsaksjon med stans, det vil si nedetid for produksjon. Stansen tar i gjennomsnitt 2,5 timer. Her blir blant annet børstene tatt ut for å støvsuges,

vaskes og tørkes, noe som også gir vedlikeholdspersonalet et nærmere inntrykk av hvordan fjærtrykket og slitasjen på børstene er.

Det trengs også å bytte filteret tilhørende viften i maskintoppen en gang årlig, men stans er ikke nødvendig.

Siste form for forebyggende vedlikehold er stans av aggregatet hvert 2. år. I denne stansen inngår rengjøring av enkelte deler av generatoren samt sjekk av alle komponentene. Dette er en stans på 7,75 timer.

Korrigerende vedlikehold gjennomføres gjennomsnittlig en gang årlig grunnet rotorjord som er forårsaket av børstestøv.

Basert på denne informasjonen, som er hentet fra IFS og via samtale med senioringeniør og driftspersonale, er det satt opp et estimat av årlige vedlikeholdsaksjoner på børstesystemet som er listet i tabell 5.3.1. Stans av aggregatet skjer med 2 års intervall, men for kartleggingen er det benyttet et gjennomsnitt for denne vedlikeholdsaksjonen.

Stasjonsrunde, utbytting av børster, renholdsrunde, filter og stans av aggregat tilsvarer FV og rotorjord tilsvarer KV.

Tabell 5.3.1: Gjennomsnittlig årlige vedlikeholdsaksjoner på børstesystemet med tilhørende timer for arbeid og nedetid. AT (arbeidstimer), T AT (Totale arbeidstimer), N (Nedetid), T NT (Total nedetid).

Vedlikeholdsaksjon	Antall	AT (t)	T AT(t)	NT (t)	T NT (t)
Stasjonsrunde	12	0.5	6	0	0
Utbytting av børster	10	0.25	2.5	0.75	7.5
Renholdsrunde	3	3	9	2.5	7.5
Filter	1	1	1	0	0
Stans av aggregat	1	4	4	3.875	3.875
Rotorjord / Børstestøv	1	3	3	2	2
Sum	28		25.5		20.875

MTBM, MDT og Tilgjengelighet

For børstesystemet er det gjort beregninger av MTBM og MDT for å finne en tilnærmet operasjonell tilgjengelighet for børstesystemet som vises i tabell 4.

Tabell 5.3.2: Utregnet MTBM, MDT og tilgjengelighet basert på årlig vedlikeholdsaksjoner

Utstyr	MTBM (t)	MDT (t)	Tilgjengelighet
Børstesystem	311.826	1.031	0.9967

5.4 Kostnader

I IFS til Aneo er det loggført historikk med tilhørende kostnader for utført vedlikeholdsaksjon. Informasjonen som er dokumentert er kun kostnader for personell og eksternt. Dokumentasjonen i IFS kan også kategoriseres under materiell og utstyr/verktøy, men dette blir ikke benyttet. Kostnadene oppgitt i tabellene er basert på ståstedsanalyseintervju med bedriftskontakt.

Tabell 5.4.1: Kostnader for nedetid per time som følge av FV og KV.

	Strømpris (kr/MWh)	Årsproduksjon (GWh)	Prod. Tap (MW)	Tap (kr/h)
FV	200	155	28	5600
KV	1000	155	28	28000

Tabell 5.4.2: Kostnad for vakter.

Vakt	Kostnad (kr/t)
Dagtid	1000
Kveld/natt	1333
Helg	2333

Tabell 5.4.3: Kostnad for utstyr.

Utstyr	Kostnad (kr/stykk)
Børster	600
Vaskemiddel	100

Tabell 5.4.4: Kostnader for forebyggende vedlikehold

Kategori	Tap (kr/t)	Tap (kr/år)
Nedetid	5600	105700
Personell	1000	22500
Utstyr		6100
Totalt		134300

Tabell 5.4.5: Kostnader for korrigerende vedlikehold.

Kategori	Tap (kr/t)	Tap (kr/år)
Nedetid	28000	56000
Personell	1833	5499
Utstyr		100
Totalt		61599

Årlige driftskostnader fra forebyggende og korrigerende vedlikehold

For utregning av driftskostnader vedrørende nedetid for det forebyggende vedlikeholdet, er det tatt utgangspunkt i en lav strømpris i Trøndelag på 200 kr/MWh som vist i tabell 5.4.1. For personell er det beregnet med dagtidsvakt for arbeidstimene. For utstyr inngår 10 børster og vaskemiddel, hvor priser er oppgitt tabell 5.4.3. Totalt årlig driftskostnader fra forebyggende vedlikehold er estimert til 134 300 kr, se tabell 5.4.4.

For utregning av driftskostnader vedrørende nedetid for det korrigerende vedlikeholdet, er det tatt utgangspunkt i en høy strømpris i Trøndelag på 1000 kr/MWh. For personell er

det tatt et gjennomsnitt av påkalling ved kveld/natt og helg for kostnad per arbeidstime. Totalt årlig driftskostnader fra korrigerende vedlikehold er estimert til 61 599 kr, se tabell 5.4.5.

De gjennomsnittlige totale driftskostnadene for korrigerende og forebyggende vedlikehold kommer på 195 899 kr årlig.

Kapittel 6

FMECA av børstesystem

Dette kapittelet tar for seg en FMECA for å øke forståelsen til leseren om hvorfor det er aktuelt med tilstandsovervåkning av børsteslitasje i vannkraftgenerator. Det ble lagt til grunn en konsekvensklassifisering av problemstillingen, og dermed videre avgjort å utføre en FMECA.

6.1 Konsekvensklassifisering

Ved bruke konsekvensklassifiseringsmatrisen gitt i standarden til NORSOK Z-008, se figur 3.2.1, klassifiseres

konsekvensene. Ved å se på børstesystemet klassifiseres kategoriene som følgende;

Sikkerhet - C3
Miljøet - C1
Produksjon - C3
Andre - C3
Barriere/inneslutning - C2

Som nevnt i kapittel 3.2.1 kan det være nødvendig å videre undersøke utstyr som havner under kategorien C3, ved å foreta en FMECA. Etersom flere av kategoriene for børstesystemet havnet under C3 ble det avgjort å videre gjennomføre en FMECA for børstesystemet.

6.2 FMECA

I dette underkapittelet tar vi for oss analyse av resultatene fra utført FMECA på børstesystemet til generatoren ved Sokna vannkraftverk, se vedlegg 1, FMECA følger standarden IEC 60812:2018 som utdypet i kapittel 3.2.2. Analysen inneholder beskrivelse av enhet og feil, effekt av feil og risikoreduserende tiltak for hver komponent i systemet. Risikovurderingen er utført i samarbeid med senioringeniør ved avdeling driftstøtte for Aneo og vurdert basert på tidligere historikk fra Sokna vannkraftverk.

Ifølge senioringeniør har det ikke tidligere oppstått en situasjon med fare for person eller miljø. Konsekvensverdien for mennesker og miljø er vurdert til grønn (klasse 1) for alle komponentene. Konsekvens av overslag og havari forårsaket av børstesystemet er størst i form av materiell verdi, og dette er vektlagt.

6.2.1 Resultater fra FMECA

Se vedlegg A, for resultatene fra utført FMECA.

6.2.2 Analyse av funn

Her utdypes det om funnene fra FMECA. De ulike komponentene blir hver for seg redegjort for funksjon, feilmode(r), risikoklassifisering og risikoreduserende tiltak.

Børster

En børste er statisk og har som oppgave å overføre elektrisk strøm til/fra en roterende slepering.

Første mulig feilmode er slitasje på børstene. Dette kan forårsakes av luftfuktighet, for høy eller lav temperatur, ujevn overflate på slepering/sporing, vibrasjon på børstene, feil strømtetthet eller feil vinkel. På delsystemet kan slitasje av børstene føre til et større

forbruk av børster enn nødvendig. Utskifting av børster er tidkrevende, og fører med seg hyppigere rengjøring av både maskintopp og hele generatoren, samt at generatoren kan få redusert isolasjonsmotstand. Kraftig slitasje kan også føre til overslag og havari i både delsystemet og hele generatoren. Slitasje av børstene er blitt vurdert til oransje (klasse 4) under frekvensskjemaet og gul (klasse 3) i konsekvensskjema. En kan oppdage slitasje på børstene ved å manuelt måle slitasjelengde eller at det registreres mye børstestøv i maskintoppen. Videre risikoreduserende tiltak vil være en form for tilstandsovervåkning for å overvåke slitasjelengden på børstene, slik at man bedre kan beregne når børstene trengs å skiftes.

En annen feilmode er at børstene kan henge seg opp. Dette kan skje som følgende av for trang pasning eller svak fjær, og kan føre til at de andre børstene får en høyere strømbelastning. At børstene henger seg opp, er blitt vurdert til oransje (klasse 4) under frekvensskjema og gul (klasse 3) i konsekvensskjemaet. En kan oppdage at børstene har hengte seg opp ved å dra i lissen og sjekke at børsten fremdeles glir lett i holderen. Videre risikoreduserende tiltak vil være en form for tilstandsovervåkning for å holde oversikt over slitasje på børsten. Om slitasjelengden på børsten ikke har minket i løpet av en gitt tid i drift kan dette indikere at børsten har hengt seg opp og ikke fungerer optimalt.

Siste feilmode på børstene er gnistring som følge av vibrasjon på børstene eller feil vinkel. Dette kan føre til ekstra slitasje på børster og sleperinger. Gnistring på børstene er blitt vurdert til gul (klasse 3) under frekvensskjemaet og lys grønn (klasse 2) i konsekvensskjemaet. En kan oppdage gnistring av børstene ved visuell kontroll under drift. Videre risikoreduserende tiltak kan være temperaturovervåkning. Forskjellig temperatur kan indikere at det ikke er optimal kontakt mellom børste og slepering, noe som kan resultere i gnistring.

Børsteholder

Børsteholderene er statisk og har som oppgave å holde børstene på plass med riktig trykk

mot sleperingen.

Første mulig feilmode på børsteholder er løs innfestning som følge av løs festebolt. Dette kan føre til svakere børstefunksjon, som igjen kan føre til høyere strømbelastning på de andre børstene. Løs innfesting er blitt vurdert til oransje (klasse 4) under frekvensskjemaet og grønn (klasse 1) i konsekvensskjemaet. Løs innfestning kan oppdages ved å sjekke bolt og fasthet manuelt. Videre risikoreduserende tiltak kan være å installere temperaturovervåkning. Store temperaturvariasjoner kan tyde på forskjellig strømbelastning på børstene som kan forårsakes av løs festebolt. Et annet tiltak er å aktivt sjekke innfestning ved vedlikeholdsrunder.

En annen feilmode som kan oppstå på børsteholder er feil fjærtrykk forårsaket av feil fjær eller brudd i fjær. Dette fører til et større forbruk av børster, og hyppig og tidkrevende utskifting. Dette medfører også hyppigere rengjøring av både maskintopp og hele generatoren, samt kan resultere i overslag og havari av både delsystem og system. Feil fjærtrykk er blitt vurdert til oransje (klasse 4) under frekvensskjemaet og grønn (klasse 1) i konsekvensskjemaet. En kan oppdage feilen ved å måle med fiskevekt. Videre risikoreduserende tiltak kan være å installere temperaturovervåkning.

Store temperaturvariasjoner kan indikere forskjellig fjærtrykk på ulike børster. Et annet tiltak er å aktivt måle fjærtrykket med en fiskevekt ved vedlikeholdsrunder.

Børstebro med isolator

Børstebro med isolator er statisk og har som oppgave å holde børsteholderen på plass, og lede og fordele strømmen til børstene.

En feilmode som kan oppstå er kryptstrøm og overslag som følge av børstestøv alene, børstestøv sammen med oljedamp eller brudd i isolator. Dette kan føre til overslag og havari av delsystemet og resultere i uplanlagt stans for generatoren. Børstebro med isolator ble vurdert til oransje (klasse 4) under frekvensskjemaet og gul (klasse 3) i

konsekvensskjemaet. Feilmoden kan oppdages ved å måle isolasjonsmotstand med megger eller visuelt kontrollere alle isolerende overflater for ledende belegg eller sprekker. Videre risikoreduserende tiltak kan være å installere et avtrekksystem på børstesystemet for å redusere børstestøvet.

Sleperinger

Sleperingene er roterende og sørger for å ta imot strøm fra børstene og sende den videre til polviklingen.

Første feilmode som kan oppstå på slepering er korrosjon på grunn av fuktighet under stillstand. Dette kan videre føre til nedbryting av slepering og høy børsteslitasje. Korrosjon ble vurdert til lys grønn (klasse 2) under frekvensskjemaet og grønn (klasse 1) i konsekvensskjemaet.

En annen feilmode er riper på sleperingene på grunn av harde partikler i glideflaten eller fullstendig nedslitte børster. Dette kan videre føre til nedbryting av slepering og høy børsteslitasje. Riper ble vurdert til oransje (klasse 4) under frekvensskjemaet og grønn (klasse 1) i konsekvensskjemaet.

En tredje feilmode er brennmerker forårsaket av strømutladning etter stans. Dette kan videre føre til nedbryting av slepering og høy børsteslitasje. Brennmerker ble vurdert til lys grønn (klasse 2) under frekvensskjemaet og grønn (klasse 1) i konsekvensskjemaet.

En siste feilmode er at det kan oppstå ovalitet som følge av feil sentrering av sleperingene. Dette kan videre føre til unødig nedbryting av slepering og gnistring. Ovalitet ble vurdert til oransje (klasse 4) under frekvensskjemaet og grønn (klasse 1) i konsekvensskjemaet.

Korrosjon, riper, brennmerker og ovalitet kan observeres under visuell inspeksjon. Alt er med på å bidra til høyere børsteslitasje. Ved å innføre tilstandsovervåkning på børstene

som et videre risikoreduserende tiltak, og man registrerer høy børsteslitasje, kan det være lurt å sjekke for en av disse feilmodene. Ovalitet kan også oppdages ved å måle kast med måleur under sakte rotasjon.

Sleperings-isolator

Sleperingsisolator er roterende og har som oppgave å isolere sleperingene fra aksel og jordpotensiale.

En feilmode er kryptstrøm og overslag som følge av børstestøv alene, børstestøv sammen med oljedamp eller sprekk i isolasjonshylse. Dette kan føre til overslag og havari av delsystemet og resultere i uplanlagt stans for hele generatoren. Sleperingsisolator ble vurdert til oransj (klasse 4) under frekvensskjemaet og gul (klasse 3) i konsekvensskjemaet. En kan oppdage feilen ved å måle isolasjonsmotstand med megger eller visuelt kontrollere alle isolerende overflater for ledende belegg eller sprekker. Videre risikoreduserende tiltak kan være å installere et avtrekksystem på børstesystemet for å redusere børstestøvet.

Forbedringsforslag

Kapittel 7 presenterer forbedringsforslag til børstesystemet. Det fokuseres på to ulike områder for forbedring; 1) Tilstandsovervåking av børstesystem og 2) håndtering av børstestøv. Herunder identifiseres ulike metoder hvor det i korthet ses på prinsipp, vedlikehold, implementering og kostnader for hver. Til slutt presenteres en økonomisk analyse av to forbedringsforslag.

7.1 Metoder for tilstandsovervåking av børstesystem

Ved valg av sensorer for tilstandsovervåking ble det i kapittel 4.4 nevnt noen utfordringer som er verdt å ta hensyn til. Det er dermed tatt høyde for at sensorene som trekkes frem er non-intrusive, som betyr at de ikke krever fysiske endringer av selve børstesystemet. Videre skal de også ha nøkkelegenskapene; måleavstand over 150mm, målenøyaktighet på avstandssensorene med minimum 1mm, driftstemperaturer som tåler 0 – 50 °C, liten dimensjon, lav vekt og minimum IP klassifisering 65. Denne informasjonen presenteres i tabell for hver enkelt sensor.

Sensorinformasjonen er hentet fra Micro-epsilon, som produserer og selger følere. Pris for montering, programmering og funksjonstesting av sensorene er hentet fra Caverion med forbehold om at kabelføringsveier er tilgjengelige.

7.1.1 Wire sensor

Wire sensoren som er vist i figur 7.1.1, benytter en tråd og i prinsippet transformeres en lineærbevegelse til en endring i motstand ved rotasjon. Måletråden er laget av et fleksibelt rustfritt stål som vikles på en trommel ved hjelp av en fjærmotor. Trommelen er koblet aksialt til et potensiometer, som er utdypet i kapittel 3.4.1 (MICRO-EPSILON, 2019, s.61).



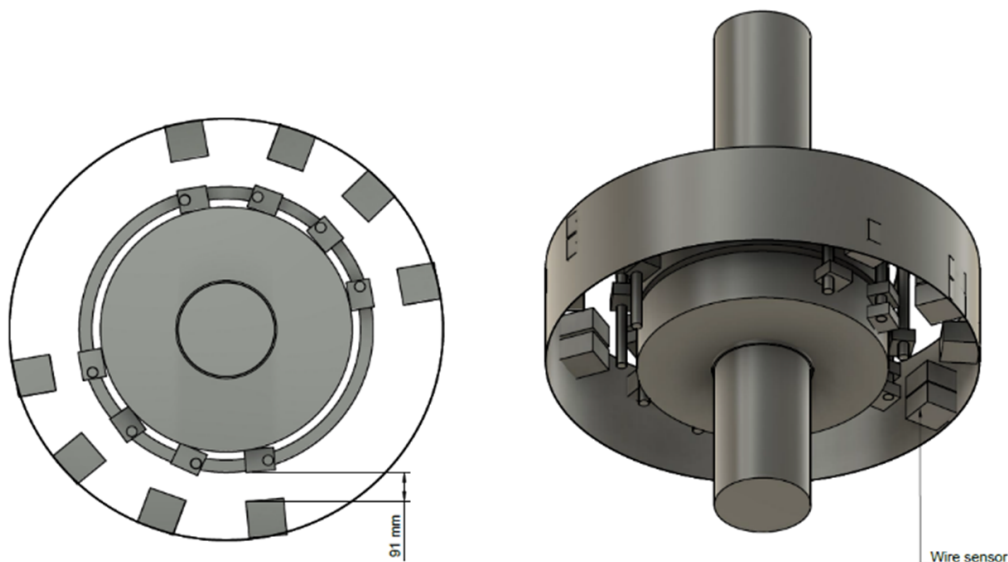
Figur 7.1.1: Wire-sensor: WDS-300-P60 (MICRO-EPSILON, 2019).

Modell	WDS-300-P60
Måleavstand [mm]	300
Målenøyaktighet [mm]	± 0.5
Drifts temperatur [°C]	-20 – 80
Dimensjon [mm] [l*b*h]	89 * 60 * 89.8
Vekt [g]	290
Beskyttelsesklasse	IP65
Pris [kr/stk]	3 259

Figur 7.1.2: Nøkkelinformasjon for wire-sensor (MICRO-EPSILON, 2019).

Det er tenkt at wire-sensoren skal festes til maskinhuset i maskintoppen, som vist i figur 7.1.3. Avstanden mellom sensoren og måleobjektet er maksimalt 91mm, og selve tråden skal festes i den bevegelige armen på børsteholderen. Det er verdt å merke seg at

dette og størrelsen på sensoren påvirker vedlikeholdsvennligheten til børstesystemet. Det er avgjørende at festet mellom tråden og børsteholderen er av et ikke-ledende materiale for å ivareta sensorens funksjon. Det er tidligere nevnt at tråden er viklet på en fjærmotor for å holde måletråden spent, og det er dermed rimelig å anta at denne kraften vil påvirke fjærkraften til børsteholderen i motsatt retning. For total tilstandsovervåking av børsteslitasje vil det bli nødvendig med tolv sensorer, som hver måler sin respektive børste. Trådsensorene genererer et målesignal på 4-20 mA, som kan integreres i eksisterende PLS-system.



Figur 7.1.3: Framstilling av plassering for Wire-sensor (Eget bilde av forfatter, 2023).

I manualen framkommer ingen vedlikeholdsoppgaver tilknyttet sensoren (MICRO-EPSILON, 2019, s.92).

For total tilstandsovervåking av børsteslitasje med WDS-300-P60 vil det koste 39 108 kr for sensorene og tilnærmet 40 000 kr for montasje, programmering og funksjonstesting. Total kostnad kommer på ca. 79 000 kr.

7.1.2 Laser avstandsmåler

Laser avstandsmåleren som er vist i figur 7.1.4, utfører målinger basert på lasertriangulering, som er utdypet i kapittel 3.4.2. En signalprosessor i sensoren beregner avstanden mellom lyspunktet på måleobjektet til sensoren ved hjelp av utgangssignalet til mottakeroptikken. Avstandsverdien blir dermed lineær, og utgitt i form av et analogt signal (MICRO-EPSILON, 2023).



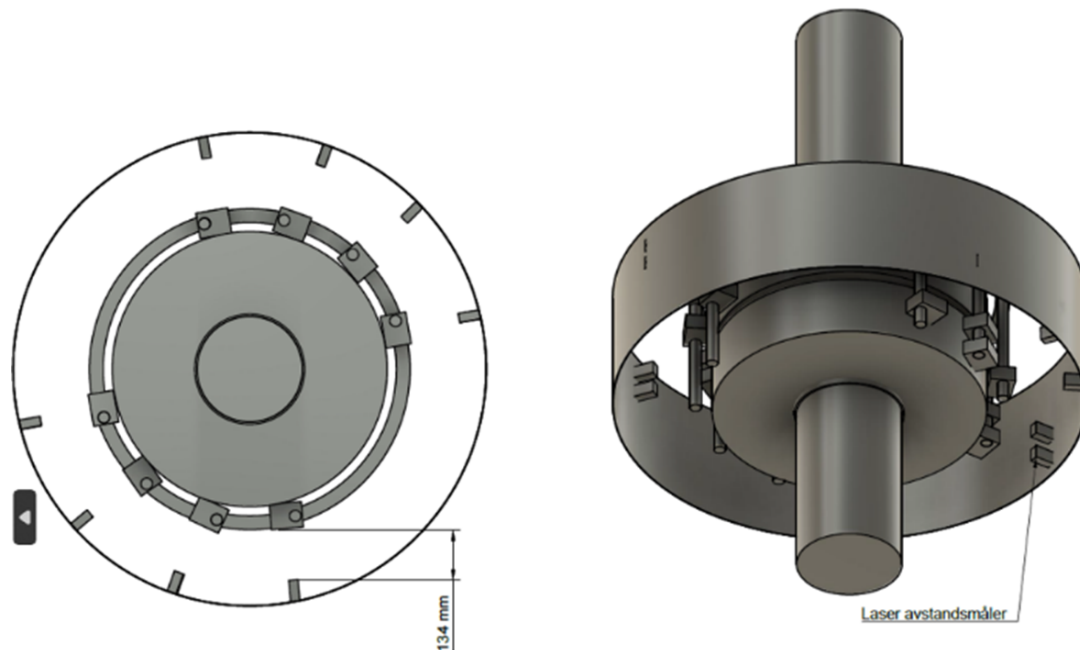
Figur 7.1.4: Laseravstandsmåler: ILD 1420-200 (MICRO-EPSILON, 2023)

Modell	ILD 1420-200
Måleavstand[mm]	60-200
Målenøyaktighet [mm]	± 0.16
Drifts temperatur [°C]	0 - 50
Dimensjon [mm] [l*b*h]	46*20*30
Vekt [g]	60
Beskyttelsesklasse	IP65
Pris [kr/stk]	16 744

Figur 7.1.5: Nøkkelinformasjon for laseravstandsmåler (MICRO-EPSILON, 2019).

Det er tenkt å feste sensoren på maskinhuset, som vist i figur 7.1.6, slik at laseren vil treffe børsten. Avstanden mellom sensoren og børsten vil være maksimalt 134mm. Dimensjonen på sensoren er relativt liten, men vil uansett påvirke vedlikeholdsvennligheten til

børstesystemet. Det er nødvendig med en sensor per børste for å kunne oppnå full overvåkning av børsteslitassen. Laseravstandsmåleren vil levere et lineært analogt signal i form av 4-20 mA, som gjør den egnet til å integreres i eksisterende PLS-system.



Figur 7.1.6: Framstilling av plassering for laseravstandsmåler (Eget bilde av forfatter, 2023)..

I manualen framkommer rengjøring av beskyttelsesdekslet for sender og mottaker som et vedlikeholdspunkt. Det er anbefalt at dette blir gjort periodisk (MICRO-EPSILON, 2023, s.89).

For total tilstandsovervåkning av børsteslitasje med ILD1420-200 vil det koste 200 928 kr for sensorene og tilnærmet 40 000 kr for montasje, programmering og funksjonstesting. Total kostnad kommer på ca. 241 000 kr.

7.1.3 IR sensor

Det infrarøde termometeret som er vist i figur 7.1.7, er en optoelektronisk sensor. Sensoren beregner overflatetemperaturen på grunnlag av emissiviteten objektet sender ut, som er utdypet i kapittel 3.4.3. Den avgitte infrarøde radiasjonen blir deretter omgjort til et elektrisk signal (MICRO-EPSILON, 2023, s.11).



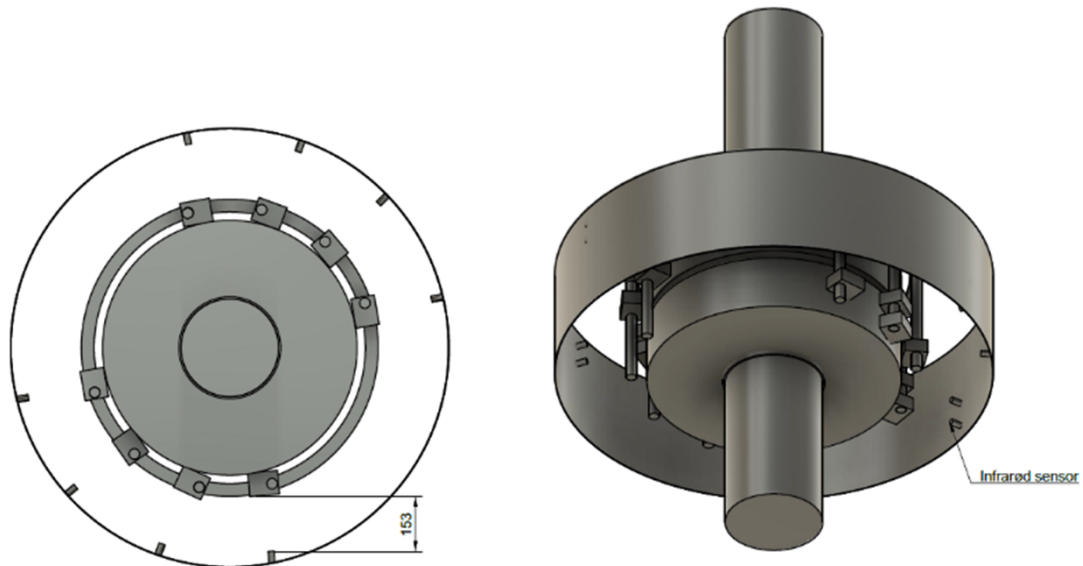
Figur 7.1.7: IR-sensor: termometer CT-SF22-C3 (MICRO-EPSILON, 2023)

Modell	<u>thermoMETER</u> CT - SF22 – C3
Måleavstand[mm]	1100
Målenøyaktighet [°C]	± 1
Drifts temperatur [°C]	-20 - 180
Dimensjon [mm] [Ø *l]	14 * 28
Vekt [g]	40
Beskyttelsesklasse	IP 65
Pris [kr/ <u>stk</u>]	3 560

Figur 7.1.8: Nøkkelegenskaper for IR-sensor.(MICRO-EPSILON, 2019).

Den infrarøde sensoren vil monteres i maskinhuset, som vist i figur 7.1.9, og siktes inn på børsten. Avstanden mellom den infrarøde sensoren og børsten vil maksimalt være 153mm. Dimensjonen til IR-sensoren er svært liten, og vil i liten grad påvirke vedlikeholdsvennligheten til børstesystemet. Det er verdt å merke seg at temperaturen vil bli målt på baksiden av børsten og ikke i slitesonen. Det er nødvendig med en sensor per børste for å overvåke temperaturen. IR-sensoren kan levere et analogt målesignal på

4-20 mA, og er godt egnet til å integreres i eksisterende PLS-system.



Figur 7.1.9: Framstilling av plassering for IR-sensor (Eget bilde av forfatter, 2023).

I manualen framkommer rengjøring av linsen som et vedlikeholdspunkt. Det er anbefalt at det blir gjort periodisk (MICRO-EPSILON, 2023, s.84).

For total tilstandsovervåkning av temperatur vil det koste 42 720 kr for sensorene og tilnærmet 40 000 kr for montasje, programmering og funksjonstesting.

Totalpris kommer på ca. 83 000 kr.

7.1.4 Termokamera

Termokameraet, vist i figur 7.1.10, kalkulerer overflatetemperaturen basert på den infrarøde emisjonen fra et objekt, som er utdypet i kapittel 3.4.4. Den todimensjonale detektoren tillater at målingene av et område blir vist som et termografisk bilde (MICRO-EPSILON, 2023, s.10).

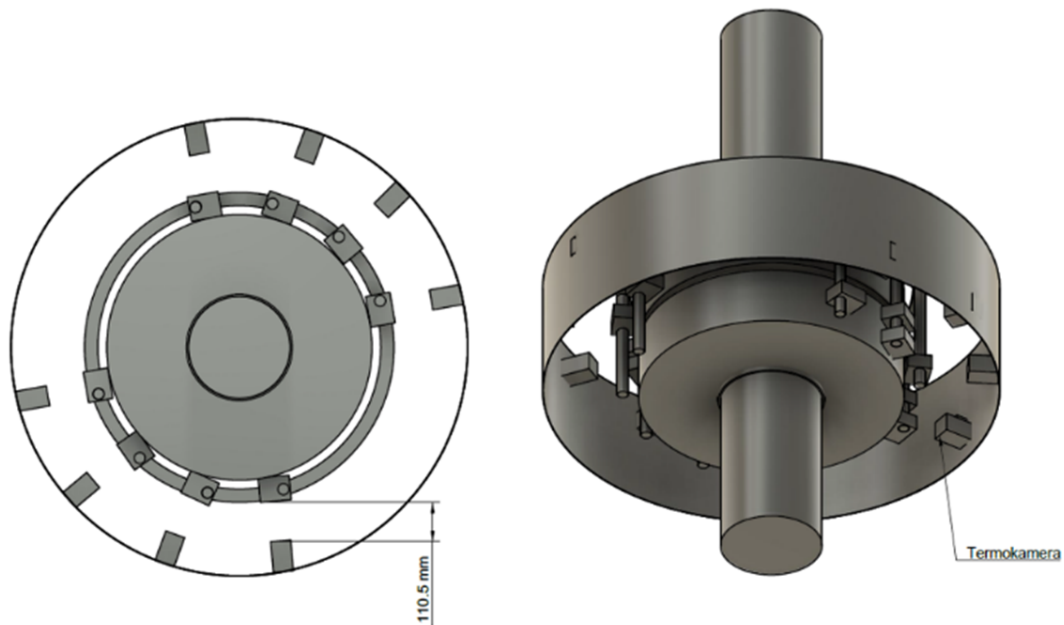


Figur 7.1.10: Termokamera: TIM 160S (MICRO-EPSILON, 2023)

Modell	TIM 160S
Drifts temperatur [°C]	0 - 50
Målenøyaktighet [°C]	± 2
Dimensjon [mm] [l*b*h]	62-77 * 45 * 45
Vekt [g]	195
Beskyttelsesklasse	IP 67
Pris [kr/stk]	41 123

Figur 7.1.11: Nøkkelegenskaper for termokamera (MICRO-EPSILON, 2019).

Kameraet vil festes til maskinhuset, som vist i figur 7.1.12, og rettes mot børsten. Avstand mellom sensorene og børstene vil maksimalt være 110.5mm. De termografiske bildene som blir generert kan ved hjelp av programvaren TIM connect analyseres. I dette tilfellet vil åtte kamera være nok til å overvåke temperaturen til de tolv børstene. Kameraene kan tilkobles eksisterende PC i kontrollrommet og benyttes med TIM connect.



Figur 7.1.12: Framstilling av plassering for for Termokamera (Eget bilde av forfatter, 2023).

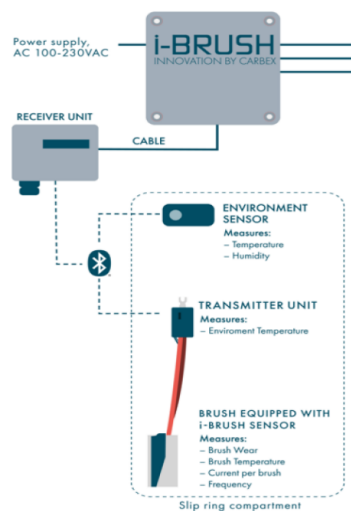
I manualen framkommer rengjøring av linsen som et vedlikeholdspunkt. Det er anbefalt at det blir gjort periodisk (MICRO-EPSILON, 2023, s.48).

For total tilstandsovervåkning av temperatur vil det koste 328 984 kr for kameraene og tilnærmet 40 000 kr for montasje, programmering og funksjonstesting. Totalkostnad kommer på ca. 369 000 kr.

7.1.5 Carbex i-Brush 1.1

Carbex i-Brush 1.1 er et system som kan overvåke børstens lengdereduksjon, strømtetthet og temperatur ved hjelp at et sensorkort montert inne i børsten. Kortet er koblet til en trådløs transmitter som benytter Bluetooth til å sende informasjonen til en mottakerenhet, som videre sender målingene til i-Brush sin hovedenhet via en kabel. Hovedenheten vil samle inn data fra mottakeren og sende videre til databehandling. Det følger også med en strekkodeleser for parring av børster og en miljøsensor for å måle temperatur og fukt i maskintoppen.

Sensorkortet monteres inn i kundens eksisterende børster. Den trådløse senderen er montert på børsten og kan gjenbrukes i minimum 5 år. Mottakeren monteres utenpå maskinhuset eller på noe stabilt i nærheten av generatoren. Hovedenheten monteres på samme måte, i nærheten av mottakeren, da denne er kablet til hovedenheten. Kabler trekkes deretter fra hovedenhet til kontrollrommet og blir integrert i PLS. Børstene monteres som vanlig i børsteholderne.



Figur 7.1.13: Komponent oversikt I-Brush 1.1 (Carbex, 2023).

Carbex har verksted i Sverige, og sender ferdige børster derfra. Teknisk ansvarlig for

systemet har informert om at det ble testet for første gang i 2019, og har siden blitt implementert flere steder i Sverige og USA med positive tilbakemeldinger. Vedlikeholdet som framkommer er flytting av senderenhet fra gammel til ny børste, dette blir utført ved hvert skifte av børstene. Hvert 5. år er det antatt at denne senderen må byttes.

For det totale systemet med ett børstesett på 12 stykk, tilstandsovervåkning av børsteslitasje, temperatur, amper, overvåkning av temperatur og fuktighet i maskintoppen, samt montering, er en estimert total kostnad på ca. 149 500 kr.

7.2 Metoder for håndtering av børstestøv

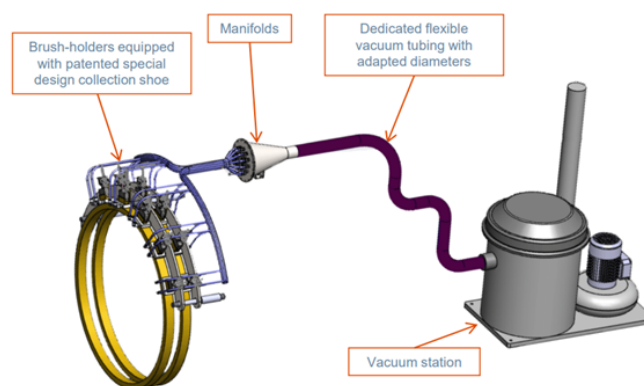
For håndtering av børstestøv er det diskutert to avtrekkssystem som benytter en industristøvsuger og en filterenhet; Mersen Dustcollector og Schunk Carbon Dust Extraction. Det er valgt å kun se på systemer med punktavsug ved hver børste. Det finnes mange rimelige systemer for generelt avsug med filter fra hele maskintoppen. Disse er relativt effektive for å hindre at børstestøv kommer ut i maskinsalen, men har i praksis vist seg lite effektive med hensyn til renhet i maskintoppen.

Begge avtrekksugene har som funksjon å samle opp børstestøv. Børstestøvet suges ved kilden for å hindre stor spredning av støv i maskinen. Dette bidrar til optimalisering av produksjon, økt effektivitet, mindre rengjøringsarbeid og lengre vedlikeholdsintervaller, samt forbedret kvalitet og arbeidssikkerhet under drift.

Slanger, børsteholdere og filterholder har som oftest en levetid på 30 år, men støvsugermotoren trengs å skiftes etter 7-10 år.

7.2.1 Mersen DustCollector

Aneo har informert om at de tidligere har implementert Merson DustCollector på et vannkraftverk, med gode resultater. Utstyret er designet for en enkel ettermontering på vannkraftgeneratorer opp til 900MW. Systemet har en kompakt størrelse som gjør det ideelt for maskiner med begrenset plass (Mersen, 2023).

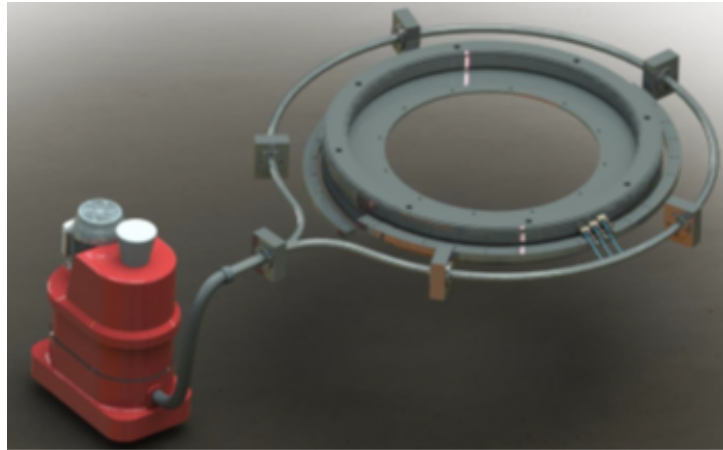


Figur 7.2.1: Illustrasjon av utstyrskomponentene til Merson DustCollector (Mersen, 2023).

Som vist i figur 7.2.1, kobles det til en spesialtilpasset oppsamlingsko rundt hver enkelt børsteholder og plasseres nesten helt inntil sleperingen. Det blir dermed tilkoblet to avtrekksslanger på hver side av oppsamlingskoden. Videre blir avtrekksslangene samlet i en manifold, som fungerer som en overgang til støvsugerslangen. Denne er koblet til en oppsamlingsbeholder med filter, og en viftemotor trekker støvet gjennom avtrekkssystemet.

Totale kostnader for utstyret er 500 000 kr. Dette inkluderer montering av utstyret samt testing gjennomført av Mersen Team. Vedlikehold av avtrekksuget innebærer å sjekke filteret og tømme av dette en gang årlig.

7.2.2 Schunk Carbon Dust Extraction



Figur 7.2.2: Illustrasjon av utstyrskomponentene til Schunk Carbon Dust Extraction (Schunk Carbon Technology, 2023).

Schunk Carbon Dust Extraction har ulike design og tilbyr flere løsninger. Figur 7.2.2 viser løsning for punktavsug. Her blir det montert en sirkulær avtrekksbane rundt sleperingene og børstene. I dette tilfellet vil det bli nødvendig å bytte ut børsteholderne til spesiellagde børsteholdere som det monteres avtrekkslanger i, helt inne ved sleperingen. Slangene føres ut og monteres i den sirkulæreavtrekksbanen som blir sammenføyd i en overgang til samleslangen på avtrekkssystemet. I dette systemet er det en støvoppsamler montert med et filter. En avtrekksvifte drifter hele avtrekkssystemet.

Schunk gir et grovt anslag for totale kostnader på systemet på ca 175 000 – 230 000 kr, ettersom avtrekkssystemet deres gjerne blir spesiellaget for bruksområde. Denne kostnaden inkluderer ikke montering og testing av utstyret. Vedlikehold av avtrekksuget innebærer rengjøring av slanger og støvfiltere, visuelt kontrollert. Levetiden til produktet er avhengig av om vedlikeholdet blir utført, samt arbeidsmiljøet som utstyret plasseres i (Schunk Carbon Technology, 2023).

7.3 Forbedringsforslag med økonomisk analyse

Kapittel 7.3 tar for seg to forbedringsforslag med tilhørende økonomisk analyse. Analysen lister opp totale investeringskostnader for forslagene i tillegg til en nåverdianalyse.

7.3.1 Valgte forbedringsforslag

Forslag 1: Mersen dustcollector, IR sensor og laser avstandsmåler.

Dette forbedringsforslaget sammenstiller et avtrekkssystem for håndtering av børstestøv og to sensorer for tilstandsovervåkning. Avtrekkssystemet er Mersen DustCollector og de to sensorene valgt er IR sensor og laser avstandsmåler.

Forslag 2: Mersen DustCollector og Carbex i-Brush 1.1

Dette forbedringsforslaget sammenstiller et avtrekkssystem for håndtering av børstestøv og to sensorer for tilstandsovervåkning. Avtrekkssystemet er Mersen DustCollector og Carbex i-Brush 1.1 er et system for tilstandsovervåkning av børsteslitasje, temperatur og strømtetthet.

7.3.2 Økonomisk analyse

I den økonomiske analysen presenteres årlige driftsbesparelser som følger med implementering av de to forbedringsforslagene, og det blir videre utført en nåverdianalyse for å se om forslagene vil være lønnsomme å investere i.

Et område som kan spares inn på er stasjonsrundene. Det er tatt i betraktning at implementering av forslagene vil erstatte de månedlige stasjonsrundene fordi visuell inspeksjon vil kunne erstattes av tilstandsbasert vedlikehold som vil varsle dersom en feil skulle oppstå eller det er på tide å bytte børsten.

Et annet område det kan spares på er renhold. Ved å implementere et avtrekksystem er det antatt at dette vil redusere årlig renholdsrunder fra 3 til 1 og eliminere korrigerende vedlikehold som følge av rotorjord.

Nytt utstyr vil også føre med seg noen nye vedlikeholdsaksjoner. Totale vedlikeholdsaksjoner er antatt å reduseres fra 28 til 10. Ny oversikt over gjennomsnittlig årlige vedlikeholdsaksjoner på børstesystemet er listet opp i tabell 7.3.1.

Renholdsrunder, stans av aggregat, sjekke filter og bytte filter tilsvarer FV og utbytting av børster tilsvarer tilstandsbasert vedlikehold.

Tabell 7.3.1: Reduksjon i vedlikeholdsaksjoner. AT (arbeidstimer), T AT (Totale arbeidstimer), N (Nedetid), T NT (Total nedetid).

Vedlikeholdsaksjon	Antall	AT (t)	T AT(t)	N TN (t)	TN (t)
Renholdsrunder	1	4	4	2.5	2.5
Stans av aggregat	1	4	4	3.875	3.875
Sjekke filter	6	0.5	3	-	-
Bytte filter	1	2	2	-	-
Utbytting av børster	1	3	3	3.5	3
	10		16		9.375

Ved å gå fra opprinnelig vedlikeholdsform over til Forslag 1 eller 2 medfører dette årlige driftsbesparelser. Besparelsene er beregnet og basert på arbeidstimer og nedetid for vedlikeholdsaksjonene som er redusert. Driftsbesparelser vedrørende nedetid av forebyggende og korrigerende vedlikehold er listet i tabell 7.3.2, og personellkostnader er oppgitt i tabell 5.4.2. Dette vil gi følgende årlige driftsbesparelser:

Tabell 7.3.2: Driftsbesparelser

Vedlikeholdstype	Kostnad (kr/år)
Forebyggende	59700
Korrigerende	61499
Totalt	121199

Implementeringskostnader for Forslag 1: Mersen Dustcollector, IR sensor og laser avstandsmåler. Kostnadene for implementering av Forslag 1 er presentert i tabell 7.3.3.

Tabell 7.3.3: Utstyrskostnader for Forslag 1

Utstyr	Kostnad (kr/stk)	Totalkostnad (kr)
Merson Dustcollector Basic M1	-	500000
Laser Avstandssensor	16744	200928
IR sensor	3560	42720
Montasje, programmering og funksjonstesting	-	80000
Totalt	-	823648

Nåverdianalyse

Formel 7.1 viser utregning av nåverdien med kalkulasjonsrente på 10% over en periode på 12 år.

Tabell 7.3.4: Nåverdiberegning for Forslag 1

	Symbol	Verdier
Kontantstrøm i periode n	x_n	121199
Investeringsbeløp	I_0	823648
Avkastningskrav	r	10%
Antall perioder	t	12

$$NNV_{12} = \sum_{t=1}^{12} \frac{121199}{(1+0.1)^t} - 823648 = 2165 \quad (7.1)$$

Tabell 7.3.5: NNV og IRR for Forslag 1

Antall år	Kalkulasjonsrente	NNV (kr)	IRR
1	10%	-713467	-85.3%
2		-613303	-53.6%
3		-552244	-31.9%
4		-439463	-18.3%
5		-364208	-9.4%
6		-295795	-3.4%
7		-233601	0.7%
8		-177060	3.8%
9		-125660	6.0%
10		-78933	7.7%
11		-36453	9.0%
12		2165	10.1%

Tabell 7.3.5 viser årlige nåverdiberegninger fra investeringen er startet til den er inntjent. Beregningene viser at etter en periode på 12 år vil investeringen være lønnsom, og ha en positiv internrenteverdi på 10,1%.

Implementeringskostnader for Forslag 2: Mersen Dustcollector og Carbex i-Brush

1.1 Kostnadene for implementering av Forslag 2 er presentert i tabell 7.3.6.

Tabell 7.3.6: Totalkostnad for utstyr for Forslag 2

Utstyr	Totalkostnad (kr)
Mersen Dustcollector Basic M1	500000
Carbex i-Brush 1.1	149500
Total	649600

Nåverdianalyse

Formel 7.2 viser utregning av nåverdien med kalkulasjonsrente på 10% over en periode på 9 år.

Tabell 7.3.7: Nåverdiberegning for Forslag 2

	Symbol	Verdier
Kontantstrøm i periode n	x_n	121199
Investeringsbeløp	I_0	649600
Avkastningskrav	r	10%
Antall perioder	t	9

$$NNV_9 = \sum_{t=1}^9 \frac{121199}{(1+0.1)^t} - 649600 = 48388 \quad (7.2)$$

Tabell 7.3.8: NNV og IRR for Forslag 2

Antall år	Kalkulasjonsrente	NNV (kr)	IRR
1	10%	-539419	-81.3%
2		-439255	-134.9%
3		-348196	-24.2%
4		-264415	-10.8%
5		-190160	-2.3%
6		-121747	3.3%
7		-59553	7.2%
8		3012	9.9%
9		48388	11.8%

Tabell 7.3.8 viser årlige nåverdiberegninger fra investeringen er startet til den er inntjent. Beregningene viser at i en periode på 9 år vil investeringen være lønnsom og ha en positiv internrenteverdi på 11,8%.

Resultater

I dette kapitlet vil hovedfunn fra ståstedsanalysen og FMECA presenteres, etterfulgt av en sammenlikning av forbedringsforslagene beskrevet i kapittel 7.0. I sammenlikning av funn i ståstedsanalysen og forbedringsforslagene vil vi betrakte vedlikeholdsaksjoner og tilgjengelighet, vedlikeholdsvennlighet og kostnader. I tillegg vil risikovurderingen i FMECA sammenliknes før og etter implementering av forslag.

8.1 Ståstedsanalyse

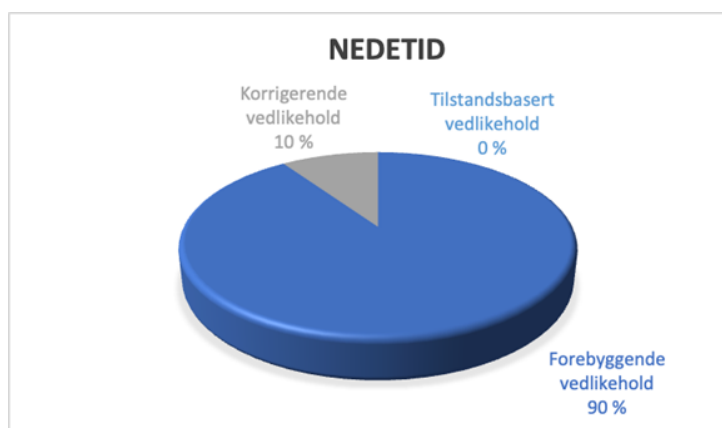
8.1.1 Vedlikeholdsaksjoner og tilgjengelighet

Fra ståstedsanalysen ble det kartlagt 28 gjennomsnittlig årlige vedlikeholdsaksjoner på børstesystemet, derav 27 forebyggende og 1 korrigerende. Figur 8.1.1 viser en fordeling av gjennomsnittlig antall vedlikeholdsaksjoner på børstesystemet, hvor 96% tilsvarer forebyggende vedlikehold og 4% tilsvarer korrigerende vedlikehold.



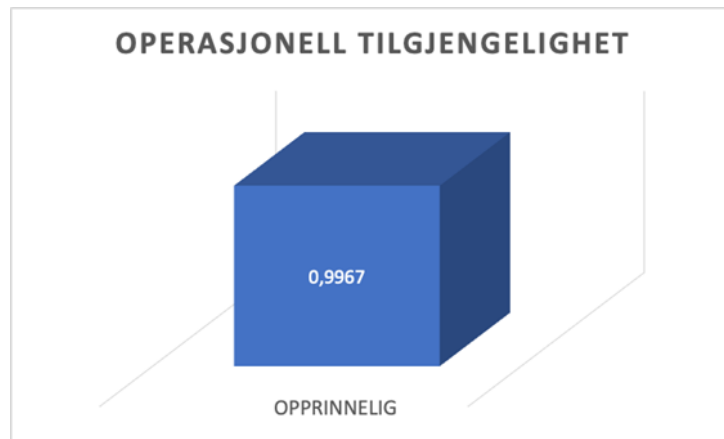
Figur 8.1.1: Kakefordeling av opprinnelig vedlikeholdsfordeling basert på antall vedlikeholdsaksjoner.

Figur 8.1.2 viser fordelingen av vedlikeholdsaksjoner basert på total nedetid. Det forebyggende vedlikeholdet resulterer i 18,9 timer nedetid og det korrigerende vedlikeholdet resulterer i 2 timer nedetid årlig.



Figur 8.1.2: Kakefordeling av opprinnelig vedlikeholdsfordeling basert på nedetid

Som følge av kartlegging av vedlikeholdsaksjoner og nedetid, ble det regnet ut virkelig operasjonell tilgjengelighet, Aop, på 0,9967 på det opprinnelige børstesystemet, som vist i figur 8.1.3. Dette er en høy tilgjengelighet og det er viktig å merke seg at denne tilgjengeligheten kun gjelder for børstesystemet.



Figur 8.1.3: Opprinnelig operasjonell tilgjengelighet for børstesystemet.

8.1.2 Vedlikeholdsvennlighet

Vedlikeholdsvennligheten er vurdert ut fra fire faktorer: *Tilgang*, *enkel montering/demontering*, *kompleksitet* og *dokumentasjon*, vist i tabell 8.1.1. Funn fra ståstedsanalysen er tatt i betraktning for karaktersetting av vedlikeholdsvennlighet. Opprinnelig vedlikeholdsform gis en gjennomsnittlig karakter på 4,25 som tilsvarer en middels-høy vedlikeholdsvennlighet.

Tilgang: Det er enkelt å komme til børstene for å skifte dem ut og god plass for å rengjøre maskintoppen, derav karakter 4.

Enkel montering/demontering: Det er kun børstene som trengs å skiftes, og børsteholder svært sjeldent. Det er ikke nødvendig med spesialverktøy for denne typen utskifting. Kan montere lys inne i maskintoppen for en bedre oversikt, derav karakter 4.

Kompleksitet: Et enkelt system og som krever lite kunnskap for utføring av vedlikeholdsoppgaver, derav karakter 5.

Dokumentasjon: Det finnes detaljert prosedyre med full sjekklister for hva som skal gjennomføres av vedlikehold. Det er derimot stor mangel på historikk for utførte vedlikeholdsaksjoner, derav karakter 4.

Tabell 8.1.1: Vurdering av vedlikeholdsvennlighet til opprinnelig vedlikeholdsprogram.

Faktorer	Karakter
Tilgang	4
Enkel montering/demontering	4
Kompleksitet	5
Dokumentasjon	4
Sammenlagt karakter	4.25

8.1.3 Kostnader

Basert på antall vedlikeholdsaksjoner, nedetid, arbeidstimer og personalkost som ble kartlagt i ståstedsanalysen, er det laget et estimat av årlige driftskostnader, som vist i figur 8.1.4. Hva som inngår i driftskostnadene er oppgitt i tabell 5.4.4 for forebyggende vedlikehold og tabell 5.4.5 for korrigerende vedlikehold. Her er forebyggende vedlikehold estimert til 134 300 kr som tilsvarer 69% av totale driftskostnader, mens korrigerende vedlikehold er estimert til 61 599 kr som tilsvarer 31% av de totale vedlikeholdskostnadene. Totalt årlige driftskostnader er ca. 200 000 kr.

**Figur 8.1.4:** Årlige driftskostnader fra FV og KV.

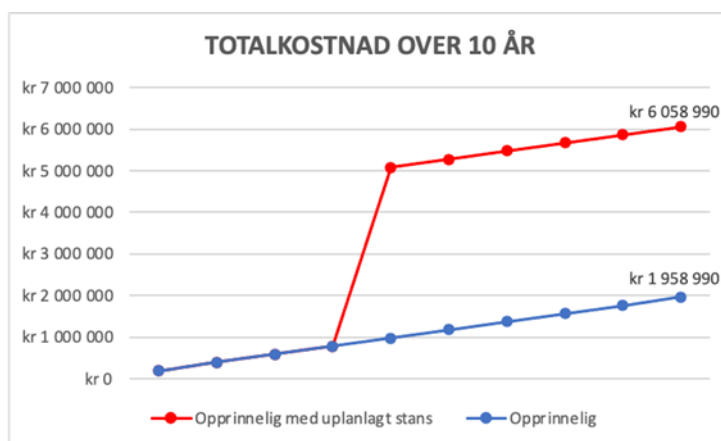
Nedetidskostnader for forebyggende vedlikehold baseres på en lav strømpris, fordi det forebyggende vedlikehold kan planlegges til tidsrom med gunstige strømpriser.

Nedetidskostnader for korrigerende vedlikehold baseres på en gjennomsnittlig strømpris,

fordi denne typen vedlikehold ikke kan kontrolleres og gjennomføres når som helst på døgnet og i løpet av året.

For personalkostnader er forebyggende vedlikehold beregnet på dagligvakt, og korrigerende er beregnet på et gjennomsnitt av utkalling på kveld/natt og helg. Dette er på bakgrunn av historikk for når den spesifikke typen vedlikehold som regel gjennomføres.

For å synliggjøre konsekvensen av en stor svikt i børstesystemet (som nevnt i kapittel 5.1) og innvirkning på driftkostnadene, er det laget en graf (figur 8.1.5) som viser totale driftskostnader over 10 år, både ved å fortsette med opprinnelig vedlikeholdsform og med svikt lagt inn på år 5. Estimater har tatt utgangspunkt i at årlig driftskostnad på ca. 200 000 kr vil gjelde for de neste 10 årene, og det er ikke hensyntatt fremtidig inflasjon. Kostnadene vil antakeligvis variere årlig, men for estimatet er det antatt at børstesystemets store komponenter har lang levetid og ikke trenger utskifting i løpet av de 10 årene.



Figur 8.1.5: Totale vedlikeholdskostnader over 10 år for opprinnelig vedlikehold og med stor svikt i børstesystemet. x-aksen viser tall i millioner og y-aksen viser antall år.

8.2 FMECA

Resultatene fra risikovurderingen i FMECA er valgt å presenteres i en risikomatrix hvor hver komponent får en samlet karakter, se figur 8.2.1. Komponentene med sammenhengende feilmode og samlet risikovurdering er listet i figur 8.2.2.

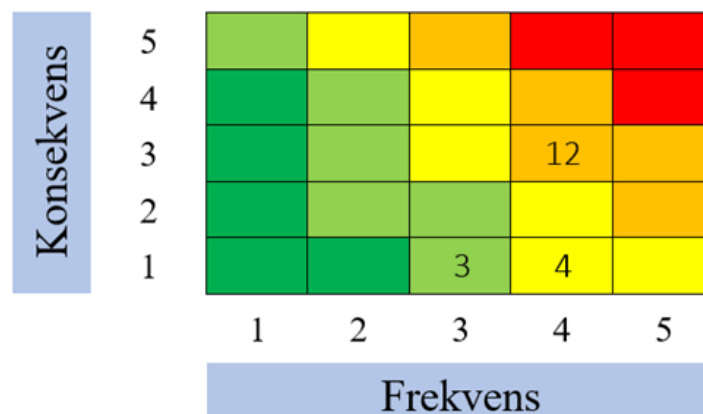
Feilmodene som kan oppstå på *børstene*, dvs. slitasje, at de kan henge seg opp og gnistring, ble rundet opp til en samlet karakter på 12 poeng og plasseres i oransje område.

Feilmodene som kan oppstå på *børsteholderen* dvs. løs innfestning og feil fjærtrykk endte med en samlet karakter på 4 og plasseres i gult område.

Feilmode som kan oppstå på *børstebro med isolator* dvs. krepstrøm og overslag endte med en samlet karakter på 12 og plasseres i gult område.

Samlet karakter for feilmodene på *slepering*, dvs. korrosjon, brennmerker, riper og ovalitet ble rundet opp til 3 og plasseres slepering i lysegrønt område.

Feilmode som kan oppstå på *sleperingisolasjon*, dvs. krepstrøm og overslag endte med en samlet karakter på 12 og plasseres i oransje område.



Figur 8.2.1: Resultater fra risikovurderingen i en risiko matrise

Komponenter	Feilmode	Gradering	Vurdering
Børster	Slitasje	12	Høy
	Henge seg opp	12	
	Gnistring	6	
Børsteholder	Løs innfestning	4	Medium
	Feil fjærtrykk	4	
Børstebro med isolator	Krypstrøm og overslag	12	Høy
Slepering	Korrosjon	1	Lav
	Brennmerker	2	
	Riper	4	
	Ovalitet	4	
Sleperingsisolasjon	Krypstrøm og overslag	12	Høy

Figur 8.2.2: Resultatene fra FMECA i tabell

8.3 Sammenlikning av valgte forslag

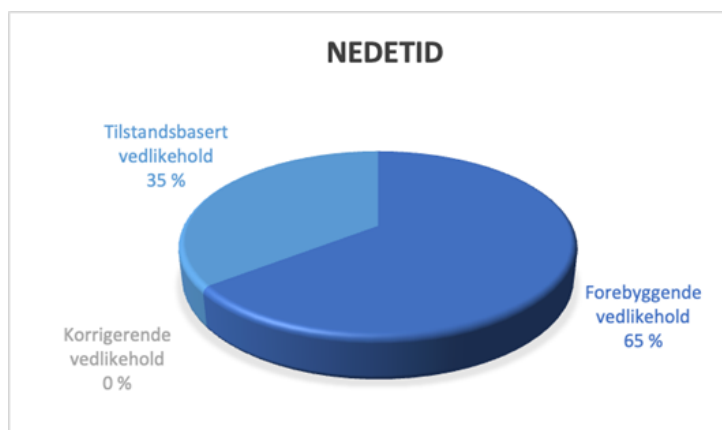
8.3.1 Vedlikeholdsaksjoner og tilgjengelighet

Etter implementering av Forslag 1 eller 2 antas det at årlige vedlikeholdsaksjoner reduseres fra 28 til 10, derav 9 forebyggende og en tilstandsbasert, som oppgitt i tabell 7.3.1. Figur 8.3.1 viser en fordeling av antall vedlikeholdsaksjoner på børstesystemet hvor 90% tilsvarer forebyggende og 10% tilsvarer tilstandsbasert vedlikehold.



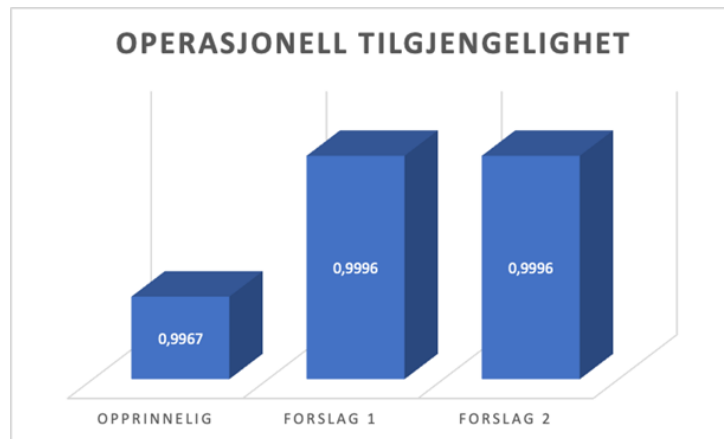
Figur 8.3.1: Fordeling av antall vedlikeholdsaksjoner for Forslag 1 og 2.

Figur 8.3.2 viser fordelingen av vedlikeholdsaksjoner basert på total nedetid. Det forebyggende vedlikeholdet resulterer i 6,4 timer nedetid og tilstandsbasert vedlikehold resulterer i 3 timer nedetid årlig.



Figur 8.3.2: Fordeling av vedlikeholdsaksjoner basert på nedetid for Forslag 1 og 2.

Ved å implementere et av forbedringsforslagene på børstesystemet vil dette gi en ny og høyere operasjonell tilgjengelighet på 0,9996. Det er en økning på 0,30% fra den opprinnelige, se figur 8.3.3.



Figur 8.3.3: Sammenlikning av operasjonell tilgjengelighet.

8.3.2 Vedlikeholdsvennlighet

Forslag 1 gis en gjennomsnittlig karakter på 2,5, som tilsvarer en middels-lav vedlikeholdsvennlighet, se tabell 8.3.1.

Tilgang: Et avtrekk monteres rundt hver børsteholder inn mot sleperingen, og to sensorer plasseres på avstand for hver børste. Begge implementeringene vil redusere tilgangen til børstesystemet noe, derav karakter 2.

Enkel montering/demontering: Ved bytte av børsteholdere, vil det bli nødvendig å demontere avtrekkspunktet for hver børsteholder. Om man kommer borti sensorene ved skifte av børster, kan dette endre vinkelen på laseren og/eller den infrarøde sensoren, som vil føre til at man må utføre justeringer, derav karakter 2.

Kompleksitet: Systemet går fra noe helt enkelt til å inneholde tre nye punkt per børste (avtrekkspunkt, avstandsmåler og IR sensor). Dette setter et økt behov for kunnskap av utførende vedlikeholdspersonale, derav karakter 2.

Dokumentasjon: Sensorene og avtrekksystemet kommer med manualer som inneholder informasjon som er nødvendig for å opprettholde funksjon. Samtidig vil det være nødvendig å etablere egne prosedyrer for de nye sensorene, derav karakter 4.

Forslag 2 gis en gjennomsnittlig karakter på 3,25 som tilsvarer en middels vedlikeholdsvennlighet, se tabell 8.3.1.

Tilgang: Det vil bli montert et avtrekk rundt hver børsteholder, inne ved sleperingen. Her vil selve børsten inneholde sensoren og det er festet en sender som kommer ut av børsten. Dette kan gjøre det noe vanskeligere å komme til, derav karakter 3.

Enkel montering/demontering: Det vil også her bli nødvendig å demontere avtrekkspunkt for hver børsteholder ved bytte av disse. Ved skifte av børste vil det bli nødvendig å flytte over senderen fra den gamle børsten til den nye, derav karakter 3.

Kompleksitet: Systemet får 2 nye punkter per børste som må hensyntas. Dette øker behovet for opplæring av utførende vedlikeholdspersonale, derav karakter 3.

Dokumentasjon: Mersen og i-Brush systemet kommer med manualer som inneholder informasjon for å opprettholde funksjon. Samtidig vil det være behov for å fornye vedlikeholdsprosedyrene, derav karakter 4.

Tabell 8.3.1: Faktorer for å vurdere vedlikeholdsvennligheten, samt en vurdering.

Faktorer	Forslag 1	Forslag 2
Tilgang	2	3
Enkel montering/demontering	2	3
Kompleksitet	2	3
Dokumentasjon	4	4
Sammenlagt karakter	2.5	3.25

8.3.3 Kostnader

Total kostnad for implementering av Forslag 1 er estimert til ca. 800 000 kr. Denne kostnaden inkluderer alt utstyr samt kostnad for montering og testing av avtrekksuget, og montering, programmering og funksjonstesting av IR-sensor og laser avstandsmåler.

Total kostnad for implementering av Forslag 2 er estimert til ca. 650 000 kr. Denne kostnaden inkluderer alt utstyr samt kostnad for montering og testing av avtrekksuget, og montering, programmering og funksjonstesting av i-Brush.

Fremtidige kostnader

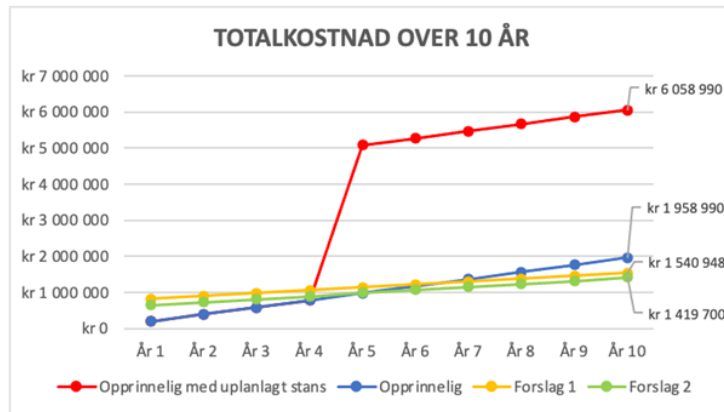
Ved eventuell implementering av et av de foreslåtte forbedringsforslagene vil det føre med seg årlige driftsbeparelser, som listet opp i tabell 7.3.2.

Beregning av en nåverdianalyse viser at implementering av Forslag 1 vil bli lønnsomt etter 12 år og Forslag 2 vil bli lønnsomt etter 9 år.

Grafen i figur 8.3.4 viser en sammenlikning av totale driftskostnader for 10 år for opprinnelig vedlikeholdsform med og uten uplanlagt stans, og Forslag 1 og Forslag 2.

Årlige kostnadene som inngår i Forslag 1 er kostnad for fem arbeidstimer til sjekking og tømning av støvbeholder samt bytte av filter som oppgitt i tabell 15. Avtrekksystemet og sensorene har en levetid på gjennomsnittlig 10 år og totalkostnad for dette forslaget etter 10 år er estimert til ca. 1,5 millioner kr.

Årlige kostnader som inngår i Forslag 2 er kostnad for fem arbeidstimer til sjekking og tømning av støvbeholder og bytte av filter som oppgitt i tabell 15 samt en kostnad på 4 800 kr til tilpasning av børstene. Hvert 5. år trengs det å bytte sendere som koster 26 400 kr. Avtrekksystemet har en gjennomsnittlig levetid på 10 år, i-Brush har en levetid på 10 år og senderne til børstesensorene har en levetid på 5 år. Estimert totalkostnad for dette forslaget etter 10 år er beregnet til ca. 1,4 millioner kr.



Figur 8.3.4: Årlige totalkostnader for 10 år frem i tid.

8.3.4 Ny risikovurdering

Etter eventuell implementering av Forslag 1 eller Forslag 2 blir frekvens og konsekvens vurdert likt i ny risikovurdering. Se figur 8.3.5 for en oversiktlig sammenlikning av risikovurdering for opprinnelig system sammenliknet med forbedringsforslagene. Vedlegg B inneholder fullstendig risikovurdering.

For feilmodene på *børstene*, dvs. slitasje, at de henger seg opp og gnistring reduseres frekvensen fra 4 til 2 og konsekvens fra 3 til 1. Dette gir børstene en ny samlet karakter på 2, og plasseres i grønt område.

For feilmodene på *børsteholderen*, dvs. løs innfestning og feil fjærtrykk reduseres frekvensen fra 4 til 2 og konsekvens forblir 1. Dette gir børsteholderen en ny samlet karakter på 2, og plasseres i grønt område.

For feilmoden som kan oppstå på *børstebro med isolator*, dvs. krepstrøm/overslag reduseres frekvensen fra 4 til 2 og konsekvens fra 3 til 1. Dette gir børstebro en ny samlet karakter på 2, og plasseres i grønt område.

For feilmodene på *slepering* forblir frekvens og konsekvens for korrosjon, riper og brennmerker

den samme. For ovalitet reduseres frekvens fra 4 til 2 og konsekvens forblir 1. Dette gir slepering en ny samlet karakter på 2, og plasseres i grønt område.

For feilmode som kan oppstå på *sleperingsisolator* reduseres frekvens fra 4 til 2 og konsekvens fra 3 til 1. Dette gir sleperingsisolator en ny samlet karakter på 2, og plasseres i grønt område.

Risikovurdering				
Komponenter	Feilmode	Opprinnelig	Forslag 1	Forslag 2
Børster	Slitasje	Høy	Neglisjerbar	Neglisjerbar
	Henge seg opp			
	Gnistring			
Børsteholder	Løs innfestning	Medium	Neglisjerbar	Neglisjerbar
	Feil fjærtrykk			
Børstebro med isolator	Krypstrøm	Høy	Neglisjerbar	Neglisjerbar
	Overslag			
Slepering	Korrosjon	Lav	Neglisjerbar	Neglisjerbar
	Brennmerker			
	Riper			
	Ovalitet			
Sleperingsisolasjon	Krypstrøm	Høy	Neglisjerbar	Neglisjerbar
	Overslag			

Figur 8.3.5: Sammenlikning av risikovurdering for opprinnelig, Forslag 1 og Forslag 2

Kapittel 9

Diskusjon

Dette kapitlet tar for seg en drøfting av resultatene fra oppgaven. Hvert resultatmål blir blant annet drøftet med hensyn på redegjørelser, usikkerheter og validitet.

9.1 Resultatmål 1: Ståstedsanalyse

I ståstedsanalysen er det kartlagt hvilke vedlikeholdsaksjoner som utføres på børstesystemet i dag, samt antall arbeidstimer og nedetid per vedlikeholdsaksjon. Dette er for å få en oversikt over hvilke vedlikeholdstyper som inngår i Aneo sin opprinnelige vedlikeholdsform. Det er gjort en grundig analyse av vedlikeholdet som utføres på børstesystemet i dag for å kunne påpeke hvordan og hvorfor vedlikeholdet burde oppgraderes og effektiviseres. Det er blitt hensyntatt flere aspekter for å gi en gjennomført vurdering, og trukket frem gevinster en oppgradering vil medføre.

Vedlikeholdsaksjoner og tilgjengelighet

Etter kartlegging av vedlikeholdsaksjoner kan det diskuteres om vedlikeholdet de utfører i dag er godt nok. Det finnes lite historikk av hendelser i forbindelse med svikt i børstesystemet. Dette kan tilsi at vedlikeholdet som er utført har bidratt til å opprettholde drift, forlenge levetiden og hindre uplanlagte stans. På den andre siden vurderes det også om vedlikeholdsformen inneholder unødvendig vedlikehold. Det skiftes blant annet gjennomsnittlig 10 børster i året fordelt over flere vedlikeholdsaksjoner, noe som fremstår

som lite effektivt når man i stedet kan skifte flere børster ved færre vedlikeholdsaksjoner og dermed spare nedetid ved start og stopp av generator.

I ståstedsanalysen var kartleggingen av vedlikeholdet en stor jobb fordi IFS fremsto som mangelfullt for børstesystemet. Flere av vedlikeholdsaksjonene i IFS hadde klassifisering DO (driftsoppgaver). Disse ble analysert av gruppen og klassifisert som enten forebyggende eller korrigerende, basert på hva slags av vedlikeholdsaksjon det var. Denne klassifiseringen kan være belastet med usikkerhet ettersom avgjørelsen om vedlikeholdstype ble valgt basert kun på gruppens kunnskap.

Vi hadde behov for historikk over tidligere vedlikeholdsaksjoner for å kunne beregne MTBM, MDT og tilgjengelighet. Resterende informasjon for vedlikeholdsaksjoner og nedetid som ikke er oppgitt i IFS, er et estimat oppgitt av senioringeniør og driftspersonell hos Aneo. MTBM er estimert til 312 timer og MDT er estimert til 1 time. Begge beregningene er basert på et grovt gjennomsnitt av vedlikeholdsaksjoner som er gjennomført de siste 10 årene. Her blir både de lengste og korteste vedlikeholdsaksjonene tatt med. Stans av aggregat for rengjøring av maskintopp er den lengste vedlikeholdsaksjonen registrert på 7,75 timer, mens utbytting av børster på 0,5 timer er den korteste. Dette er en stor tidsvariasjon, og gjør det vanskelig å definere en riktig MDT. Samtidig kan det ha oppstått lengre uplanlagte stans i løpet av de siste 10 årene, men dette er ikke tatt med i beregningen grunnet mangel på loggføring. Dersom dette skulle være tilfellet, kan MTBM reelt være mindre og MDT høyere. Det er derfor usikkerhet rundt disse to beregningene.

Tilgjengeligheten på børstesystemet til generatoren er i dag på 0,9967, som er en høy tilgjengelighet. Tilgjengeligheten er beregnet ut ifra de estimerte MTBM og MTD, og fordi det følger usikkerhet for disse to beregningene vil det samme gjelde for tilgjengeligheten. Dersom MTBM eller MDT endres litt i verdi vil dette påvirke tilgjengeligheten betraktelig.

Vedlikeholdsvennlighet

Vedlikeholdsvennligheten til utstyret vurderes etter de fire faktorene; tilgang, enkel montering/demontering, kompleksitet og dokumentasjon. Dette valget ble basert på kunnskap gruppen har opparbeidet seg gjennom studiet, sammen med relevante kilder om vedlikeholdsvennlighet. Karakterskalaen er egenkomponert av gruppen, og dermed følger det med rom for feilvurdering. En annen usikkerhetsfaktor ved vurderingen kan være at vi har valgt å vektlegge hver faktor likt. Dette kan gi ukorrekt resultat dersom noen faktorer kan ha større påvirkning på den totale vedlikeholdsvennligheten.

Vedlikeholdsvennligheten for opprinnelig vedlikeholdsform endte med en gjennomsnittlig karakter på 4,25, som tilsvarer en middels-høy vedlikeholdsvennlighet. Det er enkle vedlikeholdsoppgaver i form av inspeksjon, justering av børster og renhold. At vedlikeholdsvennligheten er høy reflekteres også av driftspersonale som er fornøyde med de eksisterende vedlikeholdsoppgavene.

Kostnader

Det er interessant å se på prosentvis fordelingen av typen vedlikehold som utføres (figur 8.1.1), sammenliknet med prosentvis fordeling av driftskostnadene (figur 8.1.4). 4% av det årlige vedlikeholdet som utføres er i form av korrigerende vedlikehold, men resulterer likevel i 31% av de totale vedlikeholdskostnadene. Dette viser at det er det korrigerende vedlikeholdet som resulterer i de høyeste kostnadene, og selv om det kun utføres en liten andel av korrigerende vedlikehold vil det være betraktelige kostnader å spare ved å unngå dette.

Det forebyggende vedlikeholdet tilsvarer 69% av totale årlige vedlikeholdskostnader. Dette viser at det fokuseres mer på å utføre det forebyggende vedlikeholdet, og indikerer at de har en bevisst strategi for å forhindre korrigerende vedlikehold.

Sammenliknet med kraftverk av samme størrelse er en årlig driftskostnad på ca. 200 000 kr regnet som et normalt nivå for børstesystemet. Disse driftskostnadene utgjør en liten

andel av de totale vedlikeholdskostnader for kraftstasjonen, men eventuell svikt som følge av denne vedlikeholdsformen kan øke disse kostnadene betraktelig, som vist i figur 8.1.5.

9.2 Resultatmål 2: FMECA

FMECA identifiserer 5 kritiske komponenter i børstesystemet. Disse ble valgt på bakgrunn av at børstesystemets sin driftssikkerhet og levetid er særdeles avhengig av nettopp disse komponentene. Komponentene har ulike feilmoder, med tilhørende ulik risikovurdering. Ved å ta hensyn til de ulike risikovurderingene for hver komponent kan vi utvikle passende risikoreducerende tiltak for forebygging, overvåking og vedlikehold.

Funn fra ståstedsanalysen viste at børstetøvet legger seg på alle overflater av de kritiske komponentene i børstesystemet på generatoren på Sokna. Med tiden kan oppbyggingen av børstestøv skape kryptstrømsveier og redusere isolasjonsmotstanden, noe som øker risikoen for overslag og havari. Generelt er isolasjonsavstandene små mellom komponentene i børstesystemet, og tilsmussing av børstestøv i disse områdene kan være kritisk.

Feilmoden til flertallet av komponentene avdekket i FMECA er forårsaket av børstestøv. Det er derfor viktig å redusere børsteslitasje til et minimum, samt sørge for hyppig og god rengjøring av alle komponenter som er utsatt for børstestøv. Med dette resultatet fra FMECA gav det gruppen et godt grunnlag for hvorfor det er viktig å redusere børstetøvet, men viser også hvilke parametre som vi vil ha størst utbytte av å overvåke. Børstene, børstebro med isolator og sleperingsisolator blir høyest konsekvensklassifisert med 3 for materielle verdier, og med en høy frekvens på 4. Ut ifra resultatene vil disse tre komponentene være mest kritiske å overvåke. Metode for tilstandsovervåking må være noen sensorer som kan overvåke feilmodene oppgitt for børstene; slitasje, henge seg opp og gnistring. Samtidig vil en metode for håndtering av børstetøvet som forebyggende vedlikeholdstiltak være aktuelt.

Det er som nevnt i kapittel 6.2 kun valgt å klassifisere for materielle verdier for konsekvens i analysen, noe som var et valg tatt i samarbeid med senioringeniør. Dette betyr ikke at alvorlige hendelser ikke kan forekomme, men at sannsynligheten er minimal, og at en slik alvorlig hendelse aldri har oppstått hos Aneo tidligere. Fokuset ble dermed på de materielle verdiene som kan gå tapt dersom svikt skulle oppstå. Det er ikke nødvendigvis store materielle kostnader ved å reparere børstesystemet som et delsystem av generatoren, men høye driftskostnader som følge av nedetid for reparasjon og leveringstid på utstyr er dominerende.

Selv om FMECA er en verdifull tilnærming for risikovurdering, er det viktig å hensynta usikkerheter knyttet til den. En viktig usikkerhet knyttet til FMECA er feil identifikasjon av feilmoder. Feilmodene som er definert avgjørende for å kunne vurdere risiko.

Usikkerhetene kan være feil i feilmoder eller mangel på feilmoder. Selv om personene som er inkludert i utførelsen av analysen er erfarne, vil det fortsatt være mulighet for at feilmoder blir oversett eller glemt. En annen viktig usikkerhet er vurdering av frekvens og konsekvens. Graderingen av risiko er utført i samarbeid med senioringeniør og driftspersonale hos Aneo, og er basert på deres erfaringer og kunnskap som de har om generatorer og børstesystemet. Dette styrker kvaliteten på informasjonen i analysen, og sikrer gyldighet. På den andre siden er gradering også basert på historikk, og fordi IFS har mangel på historikk kan hendelser være oversett.

9.3 Resultatmål 3: Forbedringsforslag

Ved å se på de ulike metodene som er identifisert i kapittel 7 kom gruppen til en avgjørelse for hvilken metode for tilstandsovervåkning og håndtering av børstestøv som det var ønskelig skulle inngå i de to forbedringsforslagene.

Sensorer og avtrekkssystemer vraket

En viktig faktor for valgt metode for tilstandsovervåkning er dens kompatibilitet med

eksisterende system, hvor termokameraet og wire-sensor ble valgt bort. Termokameraet kan ikke lagre temperaturdata direkte, men kun bilder. Disse bildene må videre håndteres manuelt i et program for å lagre temperaturen, hvor valgte varmepunkt analyseres. Dette resulterer i en ny arbeidsoppgave med å analysere og notere ned data separat. Dermed vil termokameraet være lite egnet for å gi informasjon om børstetilstand, men kan vurderes som et overvåkningstiltak for å detektere unormale temperaturforhold på komponenter i maskintoppen, og med signal til PLS, eventuelt gi utkobling av aggregatet. For wire-sensoren vil det ved å feste tråden i armen (som er fjærbelastet) ha en motvirkende kraft for å holde tråden spent. Ved å studere denne sensoren nærmere oppdaget vi at dette i ytterste konsekvens kan redusere funksjonen til børsten, da den vil få redusert eller ingen kontakt med sleperingen, og som kan resultere i funksjonssvikt. Samtidig vil vedlikeholdsvennligheten reduseres fordi det vil gå en tråd bort til hver børste, og fordi dimensjonen på sensoren er relativt stor. Dermed vurderte vi wire-sensoren som uegnet for børstesystemet.

For håndtering av børstestøv var det ønskelig å se på systemer som er utprøvd i industrien fra før. Schunk Carbon Dust Extraction system innfrir dette kravet, men setter et nytt krav om å kjøpe spesialtilpassede børsteholdere for å oppnå punktavsug. Vi anså dermed ikke dette for å være en aktuell kandidat for avtrekksystemet, da vi ikke ønsker store endringer på eksisterende børstesystem. Det kan imidlertid være at dette systemet, hvis man går for de nødvendige tilpasningene, er av like høy kvalitet som Mersen systemet.

Sammenlikning av forbedringsforslag

Vedlikeholdsaksjoner og tilgjengelighet

Det er antatt at begge forslagene vil redusere samme antall vedlikeholdsaksjoner fordi begge forslagene inneholder det samme avtrekksystemet og overvåkning av de samme parameterne. Det er interessant å se på typen vedlikehold av vedlikeholdsaksjonene som reduseres. All form for korrigerende vedlikehold vil fjernes sammen med en andel

av det forebyggende og erstattes av tilstandsbasert og forebyggende vedlikehold. Til tross for denne reduksjonen mener vi at den nye vedlikeholdsformen er optimal. En annen gevinst som følger med er en økning på 0,30% i tilgjengelighet for børstesystemet. Denne tilgjengeligheten er beregnet ut ifra de nye vedlikeholdsaksjonene og nedetid. Dette medfører med en viss usikkerhet da dette er antakelser gjort av gruppen. Samtidig har vi i antakelsen gjort en overvurdering av lengde for arbeidstimer og nedetid da dette ofte blir undervurdert.

Vedlikeholdsvennlighet

De samme usikkerhetene som er oppgitt for vedlikeholdsvennligheten i ståstedsanalysen vil gjelde for karaktersetting for *Forslag 1 og 2*. At de to forbedringsforslagene kommer dårligere ut for vedlikeholdsvennlighet enn opprinnelig vedlikeholdsform vil være fordi det er to mer komplekse systemer som krever mer kompetanse. Ingen av de to forbedringsforslagene er testet på det aktuelle børstesystemet på Sokna, og de nye karakterene som er gitt er antakelser gjort av gruppen. For å styrke validiteten til de avgitte karakterene har gruppen også basert karakterene på data fra leverandører, mål fra IFS og informasjon fra ståstedsanalysen.

Kostnader

Felles for *Forslag 1 og 2* er implementering av Mersen Dustcollector. Prisestimatet er oppgitt fra senioringeniør hos Aneo, som har fått tilpasset et slikt avtrekksystem hos et liknende kraftverk. Det er dermed rimelig å anta at pris for implementering av dette avtrekksystemet vil ligge på ca. samme kostnad for Sokna kraftverk.

Resterende kostnader for *Forslag 1* inkluderer kostnad for IR sensor og laser avstandsmåler, samt monteringskostnader for sensorene. Pris for sensorene er hentet fra Micro-epsilon og er vurdert ut ifra hyllepris. Det kan antas at denne prisen vil øke noe dersom det kreves spesialtilpasninger. På den andre siden, ved å bestille et betydelig antall sensorer kan det også forekomme kjøpsrabatt. Monteringskostnadene er et estimat som er oppgitt

av selger i Caverion og med forbehold om at kabelføringsveier er tilgjengelige. Det ble presisert at den estimerte prisen kan øke som følge av kompleksiteten til monteringen, programmeringen og testingen.

Resterende kostnader for *Forslag 2* inkluderer kostnad for i-Brush. Det ble gitt et tilpasset prisestimat for ferdigstilt system av selger hos Carbex basert på informasjon og dimensjoner for børstesystemet på generator hos Sokna kraftverk. Dette ble utfylt i samsvar med Senioringeniør hos Aneo. Det ble videre informert om at et eventuelt samarbeid mellom Carbex og Aneo kan medføre reduksjon i pris etter avtale.

Basert på prisestimatene for implementering av *Forslag 1 og 2* valgte gruppen å gjennomføre en nåverdianalyse for å fremheve at en slik investering som er mer vedlikeholdsfri vil kunne redusere drift og vedlikeholdskostnadene på sikt. Basert på nåverdianalysen vil *Forslag 2* være nedbetalt etter 9 år og *Forslag 1* etter 12 år. Noe som er viktig å nevne er at sensorene for *Forslag 1* har en estimert levetid på 10 år. Dette betyr at før sensorene er nedbetalt vil det komme en ny investering av sensorer i år 11, som medfører en kostnad på nye 240 000 kr. Selv om *Forslag 1* kan virke mer kostnadseffektivt på kort sikt vil de påfølgende investeringene i sensorer føre til betydelig økte kostnader over tid.

Risikovurdering

Det ble gjennomført en ny risikovurdering på børstesystemet hvor hver komponent ble gitt ny frekvens og konsekvens etter implementering av et av de to forbedringsforslagene. Denne risikovurderingen har en viss usikkerhet, ettersom det kun er en antakelse gjennomført av gruppen fordi forbedringsforslagene ikke er utprøvd. I den nye antakelsen for risiko er både frekvens og konsekvens redusert betraktelig for alle komponentene med sammenhengende feilmoder. Slitasjen på børstene vil fremdeles være like høy, og det vil produseres samme mengde børstestøv. Etter implementering av *Forslag 1 eller 2* vil sensorene overvåke parametere slik at personell har oversikt til enhver tid, samt bli varslet

når det er på tide å skifte børsten. Avtrekksystemet vil bidra med å redusere børstestøvet betraktelig og dermed redusere risiko for overslag og havari på børstebro med isolator og sleperingsisolator. Feilmodene for de kritiske komponentene vil kunne forhindres før de oppstår, og plasseres dermed i grønt område.

9.4 Resultatmål 4: Valg av forslag

For å kunne gi et endelig forbedringsforslag er det sett på ulike aspekter knyttet til vedlikeholdet for å fremheve hvor fokus bør ligge for oppgradering og hva som eventuelt kan effektiviseres. Gruppen satt til slutt igjen med to forbedringsforslag som begge inneholdt det samme avtrekksystemet for håndtering av børstestøv, samt en form for overvåkning av børsteslitesje. Det ble videre gjort en sammenlikning av de to forbedringsforslagene for å bygge opp begrunnelse for valg av et endelig forslag.

Begge forbedringsforslagene vil redusere samme antall vedlikeholdsaksjoner og nedetid, noe som også vil gi samme tilgjengelighet. Det kan nevnes at ved implementering av *Forslag 1* vil det tilføre 24 nye sensorer til systemet, som vil føre med seg en ny vedlikeholdsaksjon i form av rengjøring av linser. Hvor ofte dette må gjøres vil belage seg på miljøet i maskintoppen og plasseringen av sensorene. For analysen har vi tenkt at denne vedlikeholdsaksjonen går inn under den årlig renholdsrunder og at denne oppgaven ikke krever ekstra stans. Dermed vil det ikke påvirke den totale nedetiden, og *Forslag 1* og *2* vil gi samme tilgjengelighet for børstesystemet.

Det er først og fremst vedlikeholdsvennligheten som skiller de to forbedringsforslagene, hvor *Forslag 2* skiller seg ut som det bedre forslaget. Begge forslagene inneholder to mer komplekse system enn opprinnelig vedlikeholdsform, men fordi *Forslag 1* er selvkomponert av gruppen og inneholder flere ulike typer sensorer vil dette være mer komplekst enn *Forslag 2* som inneholder et allerede komplett system. Selv om *Forslag 2* også har en mindre karakter enn opprinnelig vedlikeholdsform, ser gruppen fremdeles verdi i dette

forslaget selv om vedlikeholdsvennligheten er lavere.

Reduserte driftskostnader vil også være en stor gevinst ved å investere i *Forslag 1 eller 2*. Det vil først ta 12 og 9 år før forbedringsforslagene blir lønnsomme, men etter dette vil begge forbedringsforslagene være rimeligere å drifte årlig. Ut ifra sammenlikningen av totale driftskostnader over 10 år, ser man at *Forslag 1 og 2* være billigere å drifte i lengden enn opprinnelig vedlikeholdsform. Grafen viser også at opprinnelig vedlikeholdsform har en høyere økning enn *Forslag 1 og 2*, noe som vil si at etter 10 nye år vil reduserte driftskostnader være betraktelig høyere. Som nevnt vil *Forslag 1* også kreve en ny høy investering i år 11, som betyr at *Forslag 2* vil være det mest økonomisk gunstige forslaget å gå for.

På bakgrunn av disse aspektene mener gruppen at *Forslag 2* vil være det mest gunstige forbedringsforslaget å implementere. Det er et komplett system som allerede er testet og fått gode tilbakemeldinger fra kunder. Det vil bidra til å redusere antall vedlikeholdsaksjoner og effektivisere det resterende samtidig som tilgjengeligheten opprettholdes. Det har en god vedlikeholdsvennelighet og det vil hjelpe å redusere en betraktelig andel driftskostnader. Totalt sett økes driftssikkerheten til Sokna vannkraftverk samtidig som risiko reduseres for svikt i børstesystemet.

9.5 Usikkerheter

For ståstedsanalysen er det noen feilkilder som er verdt å nevne.

1. Usikkerheter i innsamling av data: Mangelfull datainnsamling fra IFS, og usikkerheter i tallene oppgitt fra Senioringeniør og driftspersonale. Dette kan føre til en feilmargin i resultater og beregninger.
2. Manglende objektivitet: Analysen ble utført gjennom samtaler og intervju med ansatte hos Sokna kraftverk. Analysen kan være påvirket av personlige oppfatninger som kan føre til subjektive vurderinger og feilaktige konklusjoner.
3. Tydelighet i spørsmål: Dersom spørsmålene spurt i ståstedsanalysen hadde mangel på klarhet, kan konklusjonene tatt være noe upresise.

Ved utføringen av FMECA er det også noen usikkerheter i den ferdige analysen.

1. Mangel eller feil i identifikasjon av feilmoder: Dersom ikke alle potensielle feilmoder er identifisert eller feil identifisert, vil ikke analysen kunne gi et fullt bilde av systemets feilmoder og tilhørende effekter.
2. Feilaktig vurdering av konsekvensene av feilmodene: Hvis konsekvensene av feilmodene er vurdert feil, eller ikke alle konsekvenser er vurdert, vil analysen feilvurdere kritikaliteten av en feil.
3. Feilaktig vurdering av frekvens av feilmodene: Dersom hyppigheten av feilmoden er vurdert feil.
4. Feilkilder av gitt informasjon: Flere av vurderingene er satt på bakgrunn av historikk for Sokna kraftverk, og hendelser og erfaringer Senioringeniør og driftspersonale har gjort seg opp.

I sammenligningen av forbedringsforslag er det flere feilkilder som er verdt å nevne.

1. Førforståelser: Det kan være en skjevhet mot enkelte forslag, enten på grunn av personlige preferanser innad i gruppen, eller fra veilederes erfaringer.

2. Utilstrekkelig informasjon: Ved mangel på informasjon om forslagene kan det føre til en ufullstendig vurdering og feile beslutninger. Dette kan for eksempel være kompatibilitetsproblemer av utstyr eller sikkerhetshensyn som ikke blir tatt med.
3. Feil i informasjon: Det finnes en usikkerhet i tallene oppgitt for kapittel 5 og 7. Dette er fordi det blir tatt utgangspunkt i gjennomsnittstall og beregningene er basert på estimerte kostnader.

Kapittel 10

Konklusjon

10.1 Resultatmål 1: Ståstedsanalyse

Resultatmål 1 var å gjennomføre en ståstedsanalyse på børstesystemet på generator ved Sokna kraftverk. Hovedfunn fra analysen viser at det utføres et unødvendig antall vedlikeholdsaksjoner og at disse har potensiale for å effektivisere og kan minimeres. Videre står det korrigerende vedlikeholdet for en stor andel av deres driftskostnader. Til slutt ligger også et forbedringspotensial i loggføring i IFS.

10.2 Resultatmål 2: FMECA

Resultatmål 2 var å gjennomføre en FMECA på børstesystemet. Resultatene fra analysen viste at de mest kritiske komponentene er børstene, børstebro med isolator og sleperingsisolator, og at årsakene til mange av feilmodene for disse er børstetøvet som oppstår fra børsteslitasje.

10.3 Resultatmål 3: Forbedringsforslag

I Resultatmål 3 ble det undersøkt relevant utstyr, og bestemt to forbedringsforslag for å oppgradere vedlikeholdet på børstesystemet. Disse forslagene har fokus på tilstandsovervåkning av børsteslitasje og håndtering av børstetøv. På bakgrunn av

resultatene og drøftingen anser vi sammenligningsgrunnlaget som gyldig for å belyse hvilket forbedringsforslag som vil være mest hensiktsmessig å implementere.

10.4 Resultatmål 4: Valg av forslag

Vårt endelige forbedringsforslag i denne oppgaven er å implementere *Forslag 2*: i-Brush og Mersen dustcollector. Forbedringsforslaget inneholder en vedlikeholdsvennlig løsning som vil bidra til å effektivisere vedlikeholdet samtidig som tilgjengeligheten opprettholdes, driftssikkerheten økes og man kan spare driftskostnader. Dermed vil det sikres en mer pålitelig strømproduksjon fra Sokna vannkraftverk.

Kapittel 1 1

Videre arbeid

Basert på vår kunnskap opparbeidet gjennom utførelsen av oppgaven og våre vurderinger av børstesystemet ser vi høy risiko for svikt. På grunn av vannkraftverkets samfunnskritiske funksjon anser vi dette som en tilstrekkelig grunn til å implementere tilstandsovervåkning og et avtrekkssystem. Videre arbeid vil omfatte innkjøp, test og montering av utstyret for å evaluere funksjon og effektiviteten av vårt forbedringsforslag. Alt innkjøp av utstyr og implementering må planlegges nøye, og vi foreslår at bedriften gjennomfører selve installasjonen i forbindelse med en planlagt stans.

Forslaget vårt består av to separate systemer som kan implementeres sammen. Dette kan gjøres som en helhet, men det kan også velges å kun implementere et av systemene. Ved å vurdere hvert system individuelt, ser vi stor verdi i begge. Avhengig av hva driftspersonalet på kraftverket ser på som største utfordring kan enten tilstandsovervåkning av børsteslitassen eller et forbedret avtrekkssystem være hensiktsmessig.

Det er også verdt å meddele at Carbex meldte interesse i å opprette et samarbeid med Aneo, som ville medføre fordeler for begge parter. Samtidig kan det være interessant å skape et samarbeid mellom NTNU, Carbex og Aneo. Her kan NTNU bidra med studenter til gjennomføring av studie, Carbex med utstyr og kunnskap til tilstandsovervåkning, og Aneo med kunnskap, lokasjon og objekt som skal tilstandsovervåkes.

Referanseliste

ABB. (2021) Vannkraftgeneratorer/synkrongeneratorer. MAST2003 Drift og vedlikehold av tekniske installasjoner. Tilgjengelig fra: <https://ntnu.blackboard.com> (Hentet 20.05.2023)

Andersen, P.B. (2018) Elektromagnetisk interferens i Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: https://snl.no/elektromagnetisk_interferens (Hentet : 14.05.2023).

Aneo AS. (2023) Om oss. Tilgjengelig fra: <https://www.aneo.com/om-oss/om-aneo/> (Hentet: 20.03.2023).

Aven, T. (2007) Risikostyring: grunnleggende prinsipper og ideer. Oslo: Universitetsforl.

Brodtkorb, EB. (2006), Børsteslitasje i vannkraftgeneratorer, Mastergradsavhandling, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim, 2006.

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

Carbex. (2023) i-BRUSH 1.1 CARBON BRUSH MONITORING SYSTEM. Tilgjengelig fra: <https://carbonbrushsolution.com/i-brush-1-1/> (Hentet: 15.05.2023).

Dalland, O. (2020). Hva er metode? Metode og oppgaveskriving (7.utg., s.53-64).

Gyldendal.

FHI. (2023) Svevestøv. Tilgjengelig fra: <https://www.fhi.no/nettpub/luftkvalitet/temakapitler/svevestov/> (Hentet: 10.05.2023)

Gedde-Dahl, G (2022) Prediktivt vedlikehold – Hva, hvorfor og hvordan, Prevas. Tilgjengelig fra: <https://www.prevas.no/Nyheter-og-Pressemelding/2022-09-07-Prediktivt-vedlikehold—Hva-hvorfor-og-hvordan> Hentet: 20.03.2023).

Ghosh, A. (2012) INTRODUCTION TO MEASUREMENTS AND INSTRUMENTATION. 4 Utgave. New Dehli: PHI Learning Private Limited.

Grønmo, S. (2023) Kvalitativ metode i Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: https://snl.no/kvalitativ_metode (Hentet 14.05.2023).

Hansen, M. (2016) Økt produksjon med bedre vedlikeholdsstyring. Mastergradsavhandling, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim, 2016.

Hofstad, K. (2020) Generator (elektrisk maskin) Tilgjengelig fra: <https://snl.no/generator-elektrisk-maskin> (Hentet: 25.03.2023).

Hofstad, K. (2020) Isolator Tilgjengelig fra: <https://snl.no/isolator> (Hentet: 14.05.2023).

Johnstone, D. (2008) What Does an IRR (or Two) Mean?, The Journal of Economic Education, 39:1, 78-87, DOI: 10.3200/JECE.39.1.78-87.

Kjell Company (2017) Motstander og potensiometre. Tilgjengelig fra: <https://www.kjell.com/no/kunnskap/hvordan-virker-det/arduino/grunnleggende-elektronikk/motstander-og->

potensiometre (Hentet: 15.05.2023)

Mersen (2023) Mersen DustCollector. Tilgjengelig fra: <https://www.mersen.com/products/power-transfer-technologies/mercen-dustcollector> (Hentet: 20.04.2023).

MICRO-EPSILON (2019) wireSensor WDS. Tilgjengelig fra: <https://www.micro-epsilon.com/download/manuals/man-wireSENSOR-P60-P96-P115-de-en.pdf> (Hentet: 20.04.2023).

MICRO-EPSILON (2023) optoNCDT 1420. Tilgjengelig fra: <https://www.micro-epsilon.com/download/manuals/man-optoNCDT-1420-en.pdf> (Hentet: 21.04.2023).

MICRO-EPSILON (2023) thermoMETER CT. Tilgjengelig fra: <https://www.micro-epsilon.com/download/manuals/man-thermoMETER-CT-en.pdfX9751190-B09.indd%3AAnker%02>

MICRO-EPSILON (2023) thermoIMAGER TIM. Tilgjengelig fra: <https://www.micro-epsilon.com/download/manuals/man-thermoIMAGER-TIM-en.pdf> (Hentet: 23.04.2023).

Mobley, K. (2002) An Introduction to Predictive Maintenance, (2. utg.) Elsevier Science.

Norsk Industri (2013) Kjemi prosessfaget - Måleteknikk. Oslo. Tilgjengelig fra: <https://docplayer.me/12524534-Kjemiprosessfaget-maleteknikk.html> (Hentet: 03.04.23)

Norsk Industri (2023) Førstelinjes vedlikehold. Oslo. Tilgjengelig fra: https://ressurs.norskindustri.no/html/Hu68QCSxo3ZlheI2_bMnHQ/109/Vedlikehold/story_content/external_files/Vedlikehold_inkl_maskinelementer.pdf (Hentet : 15.05.2023)

Olsen, OA. (2020) Industrielle målemetoder. 3 utgave. Oslo: Jubok AS.

Pedersen, V.B. (2021) FMEA/FMECA Tilgjengelig fra: <https://ntnu.blackboard.com>
(Hentet 23.04.2023)

Pedersen, V.B. (2022) NDT2. MAST2012 Prediktivt vedlikehold. Tilgjengelig fra:
<https://ntnu.blackboard.com> (Hentet: 11.05.2023).

Petersen, S. m.fl (2015) Tilstandsovervåkning av pumper, Sintef. Tilgjengelig fra:
<https://www.sintef.no/contentassets/48dd59d592804e1a9157012621461ad0/15.1-tilstandsovervakning-av-pumper-stig-petersen.pdf> (Hentet: 20.04.2023).

Rausand, M. (2014) Reliability of Safety-Critical Systems: Theory and Applications. (1. utg.) Wiley Sons. Ravnå, R., Schjølberg, P. (2016) Industry 4.0 and Maintenance. Norsk Forening for Vedlikehold (Hentet: 12.03.22), s. 2-10.

Seterdal, m.fl. (2018) Konsekvensklassifisering av kritisk utstyr. Bacheloroppgave, NTNU i Trondheim. (Hentet 20.03.2023).

Sivertsen, L. (2019) Elektriske maskiner (1. utg.) Vigmostad Bjørke AS.

Skjølberg, J. (2006) Børsteslitasje i vannkraftgeneratorer (Teknisk rapport, SINTEF energiforskning). Trondheim. Sintef. Universitetsbiblioteket i Trondheim (Hentet: 29.03.2023).

Skjølberg, J., Ohma, H.F., Runde, M. (2009) Wear Rates and Current Distribution of Carbon Brushes on Steel Slip Rings (IEEE Transactions on energy conversion). Universitetsbiblioteket i Trondheim (Hentet: 29.03.2023).

Standard Norge (2013), NEK IEC 60529:1989+A1:1999+A2:2013 CSV. Tilgjengelig

fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=658451> (Hentet: 15.05.2023).

Standard Norge (2019) NS-EN 13306:2017. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=961747> (Hentet 04.04.2023).

Standard Norge (2018) NEK IEC 60812:2018. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=988328> (Hentet 04.04.2023).

Sutar, A. (2021) Vibration and speed measurment using optical triangulation. (20213410795893). Coimbatore, India: IEEE. Tilgjengelig fra: <https://www.engineeringvillage.com/app/doc/?docid=cpx746adf0517b73a5fa24M5a9c1017816328pageSize=25index=7searchId=3e265be1dc634d6c858bf4287e3e0834resultsCount=219usageZone=resultslistusageOrigin=searchresultssearchType=Quick> (Hentet : 11.05.2023).

Trygstad, H. Dalland, O. (2020). Kunnskapskilder og kildekritikk. Metode og oppgaveskriving (7.utg., s. 139-166). Gyldendal.

UiO (2013) Hva er en sensor? UiO Tilgjengelig fra: <http://tid.uio.no/kurs/fys1210/Notater/Sensor%20ADkonv.pdf> (Hentet 04.05.2023)

UiO (2018) Temperatur. Tilgjengelig fra: <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/t/temperatur.html> (Hentet: 29.03.2023).

UiO (2023) Nåverdi og interntente. Tilgjengelig fra: <https://www.uio.no/studier/emner/matnat/ifi/INEC1800/h19/investering-og-finans/forelesningspresentasjoner/kapittel-4-6utg.pdf> (Hentet: 14.05.2023).

Williams J.H., Davies A. Drake P.R. (1994) Condition-based maintenance and machine

diagnostics. (1.utg., s.123). Chapman Hall.

Vedlegg A. FMECA

Vedlegg B. FMECA med ny risikovurdering
etter implementering av forbedringsforslag.