

# PLI-modellering som beslutningsunderlag

**Arne Waagbø Lindefjeld**

Master i produktutvikling og produksjon  
Innlevert: juni 2015  
Hovedveileder: Per Schjølborg, IPK

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for produksjons- og kvalitetsteknikk





**NTNU – Trondheim**  
Norwegian University of  
Science and Technology

**RAMS**  
Reliability, Availability,  
Maintainability, and Safety

# PLI-modellering som beslutningsunderlag

Arne Waagbø Lindefjeld

Juni 2015

Masteroppgave

Institutt for produksjons- og kvalitetsteknikk

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Veileder 1: Per Schjølberg

Veileder 2: Ole Meland



**ARNE WAAGBØ LINDEFJELD**  
**MASTEROPPGAVE**  
**Våren 2015**

**Tittel: PLI-modellering som beslutningsunderlag**

Oppdrettsnæringen er i en enorm utvikling i Norge og det stilles rigide krav til effektivitet, hygiene, tilgjengelighet etc.

Produksjonsutstyret er relativt nyutviklet og prosessene betinger en kontinuerlig drift. I denne oppgaven skal **studenten**;

- ✓ Beskrive sløyemaskinens posisjon i fiskeforedlingsprosessen ved InnovaMar.
- ✓ Beskrive reservedelsproblematikken for sløyemaskiner.
- ✓ Diskutere PetriNet-modeller og PLI-beregninger som beslutningsunderlag i reservedelsproblematikk.
- ✓ Anvende PetriNet-teori på sløyemaskiner for å simulere tilgjengelighet ved ulike beholdninger av reservedeler.
- ✓ Presentere en metode for å bestemme antall reservedeler det er nødvendig for SalMar AS å ha på lager for sløyemaskinene ved InnovaMar.

I tillegg skal kandidaten utarbeide 5—8 slides som skal benyttes som en presentasjon av arbeidet. Slidene skal være en del av besvarelsen.

Faglærer og hovedveileder: Per Schjølberg, Institutt for produksjons- og kvalitetsteknikk, NTNU

**Samarbeidsbedrift: SalMar AS**

Kontaktperson og veileder i bedriften: Ole Meland



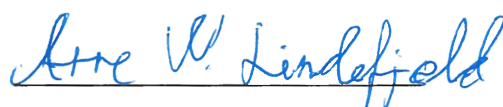
## Forord

Som siste del av det 5-årige masterprogrammet Produktutvikling og Produksjon ved NTNU gjennomføres TPK 4950 – Sikkerhet, Pålitelighet og Vedlikehold – masteroppgave. Oppgaven er skrevet av undertegnede i løpet av våren 2015, i samarbeid med SalMar AS. Arbeidet er hovedsaklig utført i IPKs lokaler i Trondheim, men undertegnede har ved enkelte anledninger i semesteret besøkt SalMars fabrikk på Frøya. Masteroppgaven er utarbeidet av Arne Waagbø Lindefjeld, stud.techn. ved NTNUs institutt for Produksjon og kvalitetsteknikk.

Temaet for oppgaven er et resultat av SalMars behov for en beslutningsmodell vedrørende reservedelsstrategier for utstyret på fabrikkgulvet. I tillegg var undertegnedes ønske om å skrive om et vedlikeholdsrelatert tema en bidragsytende faktor i valg av problemstilling. Oppgaveteksten ble utformet i samarbeid med Ole Meland ved SalMar AS og veileder Per Schjølberg ved NTNU.

Jeg vil gjerne takke Nina Simonsen for hennes utømmelige tålmodighet og støtte gjennom semesteret og tiden på NTNU generelt. Videre vil jeg takke SalMar for muligheten til å utføre masteroppgaven i samarbeid med bedriften. Gjennom sommeren og høsten 2014, samt våren 2015, har jeg fått husly på Frøya og muligheter for uvurderlig læring og praktisk erfaring ved InnovaMar. Takk til Ole Meland ved SalMar AS for lån av bil under mine turer til Frøya, og for tid og ressurser som ble brukt på denne oppgaven. Takk til Hallgeir Pettersen ved SalMar AS for å forenkle datainnsamlingen betraktelig. Takk til Harald Rødseth for gode tilbakemeldinger og deling av hans innsikt i tematikken rundt PLI. Avslutningsvis vil jeg takke hovedveileder Per Schjølberg for tilbakemeldingene han har gitt, innsatsen han har lagt ned i forbindelse med masteroppgaven, og for å sette meg i kontakt med SalMar.

Trondheim, 10/06-2015



Arne Waagbø Lindefjeld





## Sammendrag

SalMar er et fullt ut vertikalt integrert oppdrettskonsern, med virksomhet i hele verdikjeden innen oppdrettslaks. Virksomhetsområdene er settefiskproduksjon, oppdrett, slakting og foredling, samt salg og distribusjon. Slakting og foredling foregår ved InnovaMar, som er et slakteri lokalisert på Frøya i Sør-Trøndelag. InnovaMar er delt inn i to hovedavdelinger; slakting og filetering. Slaktelinja er en svært automatisert prosess, hvor mye av verdiskapningen til bedriften finner sted. Sløyemaskinene er en sentral del av SalMars virksomhet, siden hele verdikjeden går gjennom dette leddet i fabrikkens før varene selges til kunder.

Oppetid og tilgjengelighet av utstyret i maskinparken er viktige faktorer for å opprettholde verdiskapning og unngå tap i slakteprosessen. Tilgang på riktig kunnskap, verktøy og ressurser er nødvendig for å sikre høy grad av tilgjengelighet i maskinene. God tilgang på reservedeler er spesielt viktig for sløyemaskinene, siden de består av spesialiserte og unike deler, og funksjonen de utfører utgjør en stor del av bedriftens verdiskapning. Store reservedelslager fører med seg høye investerings- og driftskostnader. Det er derfor viktig å finne balansen i antall reservedeler; punktet hvor fordelene av flere reservedeler er i likevekt med kostnadene av å skaffe og eie disse delene.

PetriNet-modeller utgjør en relativt enkel og fleksibel metode for å simulere effekten av reservedelsstrategier for et system. Resultatene fra simuleringer av PetriNet-modellen kombinert med beregningsmodell for PLI gir en intuitiv og oversiktlig metode for å sammenligne ulike strategier for reservedelsbeholdninger. Det endelige resultatet er i enheten kroner per tid, noe som gir en godt underlag for å fatte beslutninger om strategier. Tilgjengeligheten av sløyemaskinene ved ulike beholdninger og etterbestillingsnivå for én bestemt lagerartikkel er simulert i masteroppgaven for å illustrere stegene i metoden.

I korte trekk går metoden ut på først å hente historiske data fra vedlikeholdsprogrammet Infor EAM som benyttes av SalMar. Dataene benyttes til å estimere sviktfrekvens og reparasjonstid, som plottes inn som parametere i PetriNet-modellen av sløyemaskinene. Simuleringer med modellen gjennomføres for ulike hypotetiske beholdninger av reservedeler og for ulike etterbestillingsnivå. Resultatet av simuleringene er estimerte tilgjengelighetsdata, som plottes inn i beregningsmodellen for PLI. Beregningsmodellen for PLI oversetter tilgjengelighetsdataene og annen informasjon fra simuleringene til estimert tapt fortjeneste i kroner per tidsenhet for strategiene. Her vil den beste strategien for antall reservedeler på lager, og etterbestillingsnivå for reservedelene fremstå som den med lavest PLI-verdi.

## Summary

SalMar is a fully vertically integrated seafood group, with operations throughout the value chain of farmed salmon. The business areas are smolt juvenile production, farming, processing, and sales & distribution. Processing takes place at InnovaMar, a factory located at Frøya in Sør-Trøndelag. InnovaMar is divided into two major divisions; slaughtering and filleting. The slaughter line is a highly automated process, in which much of the value addition of the business takes place.

Automatic gutting machines are a central part of SalMar's business, since the entire value chain is funneled through this part of the factory before the products are sold to the customers. Reliability and availability of the equipment is an important factor for continued value addition and to avoid losses in the slaughtering process. Access to the necessary knowledge, tools and resources are critical in order to ensure high availability of the machines. Availability of spare parts is particularly important for gutting machines, since they consist of specialized parts, and the tasks they perform constitutes a considerable part of the corporations created value. It is still important to find an equilibrium in the number of spare parts acquired, since a large inventory of spare parts entails high investments and operating costs.

PetriNet modelling is a relatively simple and flexible method for simulating the effects a spare part strategy has on a system. The results of simulations on the PetriNet model combined with the model for PLI provides an intuitive and straightforward method to compare different strategies for spare parts inventories. The final result is in NOK per unit of time, which provides a solid foundation for making decisions about strategies. Availability of the gutting machines at various inventory levels and restock levels for one particular stock item is simulated in this thesis to illustrate the required steps of the method.

To briefly recap the method you need to start of retrieving historical data from the maintenance program *Infor EAM* used by SalMar. The collected data is then used to estimate failure rates and repair time, which is then plotted as parameters in the Petri Net model of the gutting machines. Simulations with the model are performed for various hypothetical inventory levels and restock levels of spare parts. The simulations results in estimations of availability data. These are then used in the calculation of PLI. By calculating the PLI value, the availability data and other information from the simulations are translated into an estimate for lost profits in the unit NOK per unit of time. The best strategy for the spare parts inventory and restock level for spare parts emerge as the one with the lowest PLI value.

# Innhold

Forord . . . . .	i
Sammendrag . . . . .	iii
Summary . . . . .	iv
Innhold . . . . .	v
Figurliste . . . . .	x
<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn . . . . .	1
1.2 Problemformulering . . . . .	2
1.3 Mål . . . . .	2
1.4 Begrensninger . . . . .	3
1.5 Rapportens struktur . . . . .	3
<b>2 SalMar ASA</b>	<b>5</b>
2.1 SalMars virksomhetsområder . . . . .	5
2.2 Oversikt over funksjoner ved InnovaMar . . . . .	8
2.2.1 Slakteri . . . . .	8
2.2.2 Filetering . . . . .	11
2.2.3 Emballasje og forsendelse . . . . .	13
2.2.4 Vask og renhold . . . . .	14
2.3 Sløyemaskin . . . . .	14
2.4 Teknisk avdeling . . . . .	16
2.5 Datagrunnlag for InnovaMar . . . . .	19
<b>3 Vedlikehold- og Reservedelstyring</b>	<b>21</b>
3.1 Ulike typer vedlikehold . . . . .	22
3.1.1 Korrigerende vedlikehold . . . . .	23

3.1.2	Forebyggende vedlikehold . . . . .	23
3.2	Generasjoner av vedlikehold . . . . .	24
3.2.1	Tidligere generasjoner . . . . .	24
3.2.2	Moderne metoder og beste praksis . . . . .	25
3.3	Reservedelstyring . . . . .	27
3.3.1	Faktorer som påvirker reservedelsbeholdningen . . . . .	28
3.4	Modeller for reservedelstyring . . . . .	29
3.4.1	Markov . . . . .	29
3.4.2	Hendelsesdrevet simulering . . . . .	30
3.4.3	PetriNet . . . . .	31
<b>4</b>	<b>Den skjulte fabrikken</b>	<b>33</b>
4.1	Den skjulte fabrikken . . . . .	33
4.2	Indikatorer . . . . .	34
4.2.1	Behov for indikatorer . . . . .	34
4.2.2	Ulike typer indikatorer . . . . .	35
4.3	OEE . . . . .	36
4.4	PLI - Indikator for tapt fortjeneste . . . . .	38
4.4.1	Beregningsmodell for PLI . . . . .	39
4.4.2	Kostnadsberegning og beslutningsunderlag . . . . .	41
<b>5</b>	<b>PetriNet</b>	<b>43</b>
5.1	Fremgangsmåte del 1 . . . . .	43
5.2	Introduksjon av metoden . . . . .	44
5.2.1	Grafiske elementer og det grunnleggende konseptet . . . . .	44
5.2.2	Et enkelt eksempel på en PetriNet-modell . . . . .	46
5.3	Modell av SalMars situasjon . . . . .	48
5.3.1	Begrensninger . . . . .	48
5.3.2	Modellen . . . . .	50
5.3.3	Modul 1 . . . . .	50
5.3.4	Modul 2 . . . . .	52
5.3.5	Variabler og parametre . . . . .	53
5.4	Simulering . . . . .	55

5.4.1	Monte Carlo	57
5.4.2	Resultat	57
<b>6</b>	<b>PLI</b>	<b>61</b>
6.1	Fremgangsmåte del 2	61
6.2	Beregning av PLI	62
6.2.1	Beregning av de ulike verdiene i modellen	63
6.3	Sammenligning av strategier og beslutningstaking	65
6.4	Styrker og svakheter ved metoden	66
<b>7</b>	<b>Oppsummering og konklusjon</b>	<b>69</b>
7.1	Oppsummering og konklusjon	69
7.2	Videre arbeid	70
<b>A</b>	<b>Forkortelser</b>	<b>73</b>
<b>B</b>	<b>Presentasjon</b>	<b>75</b>
<b>C</b>	<b>Forstudierapport</b>	<b>79</b>
	Forord	80
	Introduksjon	81
	Problemformulering	81
	Involverte parter	81
	Mål med prosjektet	82
	Prosjektets fremgang	82
	WBS	84
	Fremdriftsplan	85
	Kost, tid og ressurs	86
	<b>Bibliografi</b>	<b>91</b>



# Figurer

2.1	Settefisk (adoptert fra salmar.no)	5
2.2	Matfisk (adoptert fra salmar.no)	6
2.3	Slakting og foredling (adoptert fra salmar.no)	7
2.4	Distribusjon (adoptert fra salmar.no)	7
2.5	Hovedprosesser ved InnovaMar	9
2.6	Stunning og bløgging	10
2.7	Sortering, transport og gruppering	12
2.8	Vakumpakking og dypfrysing	13
2.9	Mating av fisk fra transportbånd til sløyemaskin	15
2.10	Sløyemaskin	16
2.11	Fisk i sløyemaskina	17
2.12	Robotarmer i sløyemaskina	17
2.13	Makroperspektiv av vedlikeholdsfunksjonen	18
3.1	Vedlikeholdstyper	22
3.2	Endringer i vedlikeholdsmetoder	25
3.3	Markovmodell	30
4.1	Beregning av OEE	37
4.2	Innvirkningen av PLI på levetidsfortjeneste (LCP)	38
4.3	Beregningsmodell for PLI	39
5.1	Grafiske elementer fra GRIF	45
5.2	Retningspiler	45
5.3	Situasjonen før og etter kjøringen av en overgang	46
5.4	Aktivering og kjøring av overganger	47

5.5	Eksempelsituasjon . . . . .	47
5.6	Modell av sløyemaskinene og reservedelsbeholdningen ved InnovaMar . . . . .	50
5.7	Analytiske metoder for PetriNet-modeller . . . . .	56
6.1	Beregningsmodell for PLI i regneark . . . . .	62
C.1	WBS . . . . .	84
C.2	Fremdriftsplan . . . . .	85



# Kapittel 1

## Innledning

### 1.1 Bakgrunn

Vedlikehold av bygninger, maskiner og utstyr er og blir en stadig viktigere konkurransefaktor for bedrifter og organisasjoner i næringslivet. Med automatiserte prosesser og høye investeringskostnader er kravet til avkastning ofte svært høyt. I bransjer med sterk konkurranse kan marginene være små. Oppetid og tilgjengelighet av utstyret som benyttes er derfor viktige moment å ha kontroll på for en moderne bedrift.

For å sikre at utstyr og maskiner kan benyttes når de trengs, må de vedlikeholdes på en effektiv og lønnsom måte. Dette innebærer at bedriften må ha planer for hvilke aktiviteter som skal utføres, og når utførelsen skal finne sted. Personalet som skal gjennomføre vedlikeholdet må besitte de kunnskaper og kvalifikasjoner som kreves. I tillegg må de ha tilgang på egnet verktøy og nødvendige ressurser. Alt dette innebæres i uttrykket *vedlikeholdsstyring*.

En viktig del av forberedelsene til vedlikehold, er å sikre at nødvendige reservedeler er tilgjengelige når behovet oppstår. Den vanligste metoden for å sikre tilgang på nødvendige reservedeler er å ha en beholdning på lager. SalMar AS har et hovedlager for fabrikken InnovaMar, med forbruksmaterialer og reservedeler til en estimert verdi av omlag 20 millioner kroner (verdien er hentet fra uttalelser fra ansatte ved SalMar AS). Dette er ikke en overveldende stor sum, med tanke på at verdien av fabrikken og utstyret var 550 millioner kroner i 2010 (SalMar ASA, 2015).

Ved SalMar benyttes imidlertid ingen fast rutine for å bestemme hvor mange deler av hver type som skal være på lageret. I og med at driftstiden til maskinene i fabrikken er svært sentral for verdiskapningen som utføres, blir det som Ole Meland (Vedlikeholdssjef ved Sal-

Mar AS) sa; *"Det er lett å bli feig når man avgjør hvor mange deler å ha på lager"*. Betydningen av dette er at mengden ofte overdrives når det bestilles reservedeler til lageret, for å "være på den sikre siden". Vedlikeholdsavdelingen ved InnovaMar har derfor etterspurt en metode for å bestemme antall nødvendige reservedeler. Metoden som presenteres i denne masteroppgaven er myntet på sløyemaskinene i slaktelinja ved InnovaMar. Dersom det viser seg at metoden fungerer greit i praksis, byr det ikke på store utfordringer å utvide metoden til å kunne brukes i andre deler av fabrikken.

## 1.2 Problemformulering

Oppdrettsnæringen er i en enorm utvikling i Norge, og det stilles rigide krav til effektivitet, hygiene, tilgjengelighet etc. Produksjonsutstyret er relativt nyutviklet og prosessene betinger en kontinuerlig drift. I denne oppgaven skal studenten;

1. Beskrive sløyemaskinens posisjon i fiskeforedlingsprosessen ved InnovaMar.
2. Beskrive reservedelsproblematikken for sløyemaskiner.
3. Diskutere PetriNet-modeller og PLI-beregninger som beslutningsunderlag i reservedelsproblematikk.
4. Anvende PetriNet-teori på sløyemaskiner for å simulere tilgjengelighet ved ulike beholdninger av reservedeler.
5. Presentere en metode for å bestemme antall reservedeler det er nødvendig for SalMar AS å ha på lager for sløyemaskinene ved InnovaMar.

I tillegg skal kandidaten utarbeide 5—8 slides som skal benyttes som en presentasjon av arbeidet. Slidene skal være en del av besvarelsen.

## 1.3 Mål

Målet med masteroppgaven er å finne et nyttig og begrunnet beslutningsunderlag ved valg av strategi for reservedelsbeholdningen for sløyemaskiner ved InnovaMar. Dersom metoden som benyttes i arbeidet med masteroppgaven gir godt resultat, kan den utvides til å omfatte andre deler av fabrikken. Dersom sluttresultatet ikke gir nevneverdig nytteverdi, er målet at

arbeidet med masteroppgaven skal gi innsikt i alternative metoder som kan forsøkes for å finne en gunstig reservedelstrategi.

## 1.4 Begrensninger

SalMars satsning på vedlikehold er et relativt nytt fenomen. Fabrikken på Frøya, som omtales i denne rapporten, ble tatt i bruk i 2011. Det er derfor begrensede mengder historikk og vedlikeholdsdata tilgjengelig. Mange av feilmodene og problemene med utstyret som benyttes kan ennå være ukjente, og ikke oppdages eller bli gjeldende før utstyret eldes mer. Loggføringen av vedlikeholdsoppgaver av sløyemaskinene i programmet Infor EAM dateres tilbake til april 2012. Dette gir i praksis 3 år med datagrunnlag som kan benyttes i masteroppgaven.

## 1.5 Rapportens struktur

Masteroppgaven forøvrig er strukturert som følger:

- Kapittel 2 begynner med en introduksjon av SalMar ASA, og en kort innføring i bedriftens virksomhetsområder. Videre følger en mer detaljert innføring i prosessene ved InnovaMar, med spesielt fokus på sløyemaskinene i slaktelinja. Teknisk avdeling ved InnovaMar beskrives kort, og det gis en forklaring av hvordan datagrunnlaget fra vedlikeholdsprosessene innhentes.
- Kapittel 3 gir en kort innføring i den grunnleggende terminologien og uttrykkene innen vedlikeholdsstyring. Det gis en beskrivelse av de ulike typene av vedlikehold som praktiseres, og hvordan disse påvirker reservedelsbeholdningen. Avslutningsvis i kapitlet introduseres 3 ulike metoder for å modellere varelager av reservedeler.
- Kapittel 4 er en beskrivelse av den skjulte fabrikken. Kapitlet gir også en innføring av indikatorer og deres bruksområder. Videre blir indikatorene OEE og PLI utdypet mer i detalj.
- Kapittel 5 gir en innføring i bruken av PetriNet, med en forklaring av elementene og prinsippene som modeller bygger på. En modell av sløyemaskinene i slaktelinja, og deres relasjon til reservedelslageret presenteres. Videre forklares hvordan simuleringer

utføres med modellen, og hvilke verdier som kreves for at simuleringen skal kunne gjennomføres.

- Kapittel 6 forklarer hvordan resultatene fra PetriNet-simuleringene kan benyttes til å beregne PLI-verdier for reservedelsstrategier. Til slutt forklares måten PLI-verdiene kan benyttes for å velge den mest egnede reservedelsstrategien for hver artikkel.
- Kapittel 7 er en oppsummering av momentene i masteroppgangen.

# Kapittel 2

## SalMar ASA

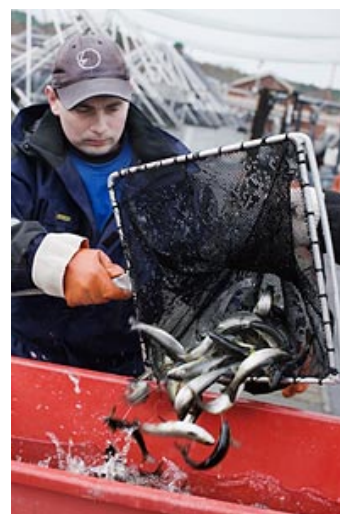
SalMar ble grunnlagt i 1991 på Frøya i Sør-Trøndelag. Bedriften kjøpte et konkursbo som bestod av et slakte- og bearbeidingsanlegg og en konsesjon for oppdrett av laks. Siden den gang har selskapet vokst betraktelig. I dag (2015) har SalMar 100 konsesjoner for oppdrett i Norge, samt eierinteresser i Storbritannia. SalMar er nå et fullt ut vertikalt integrert oppdrettskonsern, med virksomhet i hele verdikjeden innen oppdrettslaks. Disse virksomhetsområdene er settefiskproduksjon, oppdrett, slakting og foredling, samt salg og distribusjon. Informasjonen om SalMars virksomhetsområder er funnet på bedriftens hjemmeside, og i årsrapporten for 2014.

### 2.1 SalMars virksomhetsområder

#### Settefisk

Yngel- og smoltproduksjon er første ledd i laksens verdikjede. Rogn og melke høstes fra en beholdning av stamfisk. Den befruktede rognen klekkes frem innendørs i kar. I starten drar fisken næring fra plommesekken (en pose på magen den har beholdt etter at egget er klekket). Når fisken er stor nok til å spise vanlig tørrfor kalles den *yngel*. Etter omlag 1 år når fisken tilstrekkelig størrelse til at den kan leve i saltvann. Da kalles den *smolt*, og er klar til å flyttes til merder i oppdrettsanlegg ute i sjøen.

SalMar har 6 anlegg for produksjon av yngel og smolt, for-



Figur 2.1: Settefisk (adoptert fra salmar.no)

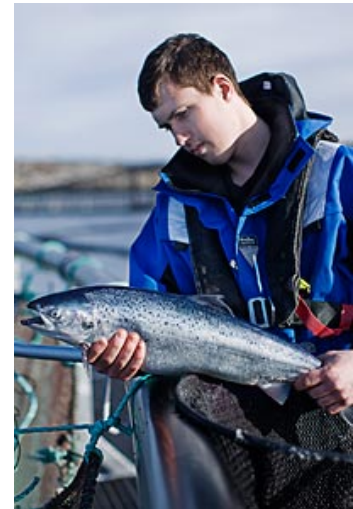
delt langt kysten mellom Møre og Romsdal og Troms. Disse anleggene er i stor grad tilknyttet energiressurser fra alternative bransjer. Settefiskanlegg baseres på temperert vann, noe som gjør spillvarmen i avløpsvann fra treforedlingsindustri og kjølevann fra andre fabrikker til en verdifull ressurs. Det er tilgjengelige ferskvannsressurser for fortsatt vekst i produksjonen. Dette er både i form av ubrukt kapasitet ved flere anlegg, og i resirkuleringsteknologi som muliggjør produksjon med mindre forbruk av ferskvann.

Det meste av smoltproduksjonen går med til å forsyne SalMars egne matfiskanlegg. Det å være selvforsynt med smolt og settefisk av ønsket kvalitet er en gunstig situasjon for SalMar. Dette sikrer forutsigbarhet og tilstrekkelig tilgang til nødvendige "råvarer" for matfiskanleggene, som er neste ledd i verdiskapningen. For å utnytte kapasiteten i matfiskanleggene til fulle er det nødvendig å spre smoltutsettingen gjennom hele året. Det fokuseres derfor på årsuavhengig smoltproduksjon i settefiskvirksomheten.

## Matfisk

Andre ledd i laksens verdikjede er i oppdrettsanleggene i havet. Her vil laksen befinne seg i omlag 2,5 år. Da veier den omtrent 5 kg og er klar til å slaktes. Oppdrettsanleggene befinner seg ideelt sett i farvann med tilstrekkelig dybde og gjennomstrømning til å forhindre forurensning og opphopning av avfallsstoffer. I tillegg er det en fordel om vannet holder en høy og jevn temperatur. Fisken føres med tørre pellets, som inneholder alt fisken trenger av proteiner, vitaminer og mineraler. Disse blir vanligvis blåst utover merdene av automatiske føringssystemer. Hele prosessen overvåkes med undervannskameraer.

For å kunne drive med oppdrett av fisk på denne måten kreves det at lokaliteten er godkjent av myndighetene. Det kreves også en konsesjon som fastsetter hvor mange tonn fisk man har lov til å håndtere. SalMar har 44 av sine konsesjoner ved oppdrettsanlegg lokalisert langs kysten av Midt-Norge. Området stiller med svært gode forhold for lakseproduksjon. Golfstrømmen sørger for gunstige sjøtemperaturer, og utskifting av god gjennomstrømning av sjøvann. I tillegg er 14 konsesjoner lokalisert på Sunnmøre, og 23 konsesjoner driftes av datterselskapet SalMar Nord i Nord-Norge.

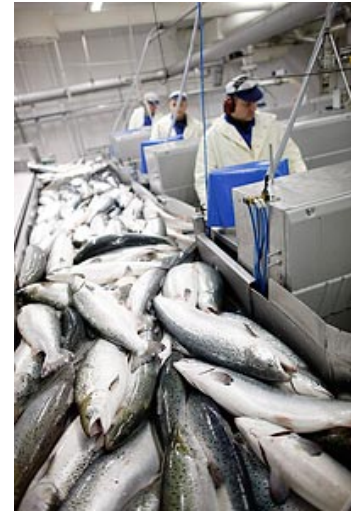


Figur 2.2: Matfisk (adoptert fra salmar.no)

### Slakting og foredling

Slakting av oppdrettsfisk foregår i moderne tider i spesialiserte slakteri. Fisken pumpes levende inn i slakteriet, før den bedøves og bløgges. Bedøvelsen gis enten ved hjelp av CO<sub>2</sub>, elektrisk strøm eller ved et slag i hodet. Bløggingen skjer ved at gjellestavene kuttes, slik at fisken raskt og smertefritt blør ut i en tank. Etter dette starter sløyeprosessen av fisken. Sløyd fisk kan enten selges som den er, eller behandles videre for å selges som fiskefileter eller andre produkter.

Slakting og foredling av fisken har vært en viktig del av SalMars virke siden oppstarten i 1991. Anlegget for slakting og bearbeiding som var en del av konkursboet som ble kjøpt, ble utvidet i 1997 for å øke kapasiteten. I 2009 ble det imidlertid besluttet å investere i nye lokaler og moderne utstyr, så i 2011 ble alt arbeid av denne typen flyttet til den nybygde fabrikken ved navn InnovaMar. InnovaMar er et av verdens mest innovative og effektive anlegg for bearbeiding av laks (SalMar ASA, 2015). Anlegget er 17 500 kvadratmeter stort, og består av utstyr til over 550 millioner kroner. I 2014 ble det slaktet 141 000 tonn sløyd laks fra egne oppdrettsanlegg i SalMar. Av denne mengden ble 29 100 tonn bearbeidet videre til andre typer produkter. I avsnitt 2.2 presenteres prosessene ved InnovaMar i større detalj.



Figur 2.3: Slakting og foredling (adoptert fra salmar.no)

### Salg og distribusjon

Etter at fisken er ferdigbehandlet og pakket, er den klar til å sendes til kunder over hele verden. Salg av fisk foregår i et system som kan sammenlignes med børsen. Tilbud og etterspørsel styrer prisen, som kan variere fra time til time. Fisken selges i partier, og salget finner gjerne sted før fisken er slaktet og foredlet. Laksen som produseres, selges som ferskvare. Det er derfor essensielt at varene kommer frem til kundene så raskt som mulig etter slakting. Store avstander til kunder i et globalt marked gjør det nødvendig med flytransport for å holde leveringstiden nede. Fisk som pakkes ved InnovaMar er forhåndsklarert



Figur 2.4: Distribusjon (adoptert fra salmar.no)

for flytrafikk, noe som gjør overgangen fra lastebil ved flyplassen svært effektiv.

## 2.2 Oversikt over funksjoner ved InnovaMar

Den nye fabrikken InnovaMar, som befinner seg i nærheten av det gamle slakte- og bearbeidingsanlegget i Kverva på Frøya, prosesserer over 100 millioner kilo laks i året. Fabrikken har høy grad av automatisering og består av mye avansert teknisk utstyr.

Figur 2.5 viser flyten av prosessene ved InnovaMar. En nærmere beskrivelse av de ulike hovedprosessene kommer i avsnittene nedenfor.

### 2.2.1 Slakteri

I slakteriet vil fisken, med få unntak, fraktes med transportbånd fra post til post. Produksjonen ved InnovaMar foregår partivis. Fisk fra ulike lokasjoner skal holdes adskilt gjennom fabrikken. På grunn av omstillingstid er det derfor er en klar fordel å minimere antall bytter mellom lokasjonene. Det kjøres to skift om dagen (formiddag og ettermiddag). Lengden på skiftene tilpasses vanligvis etter størrelsen på partiene med fisk fra de ulike lokasjonene.

#### Mottak

Fisken ankommer anlegget på Frøya i en brønnbåt, og plasseres i en av de åtte ventemerdene i sjøen på utsiden av fabrikklokalene. Hver av merdene har en kapasitet på ca. 350 tonn laks. Her kan fisken oppholde seg i inntil 6 dager før den pumpes inn i slakteriet. Fisk fra ulike lokaliteter holdes adskilt i merdene, slik at ferdige produkter kan spores tilbake til opprinnelig opphavsplass før slakting.

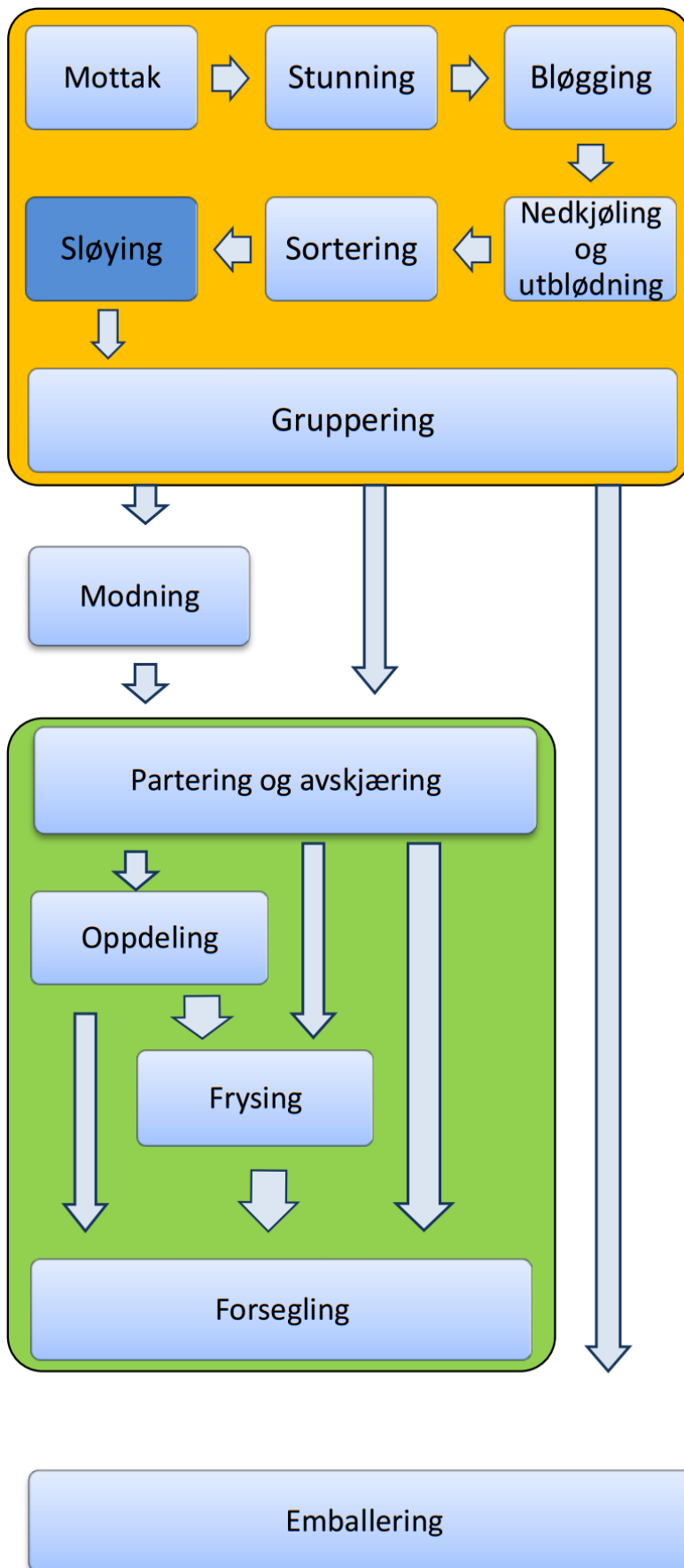
#### Grovsortering etter størrelse

Det første som skjer med fisken når den pumpes inn i slakteriet fra merdene på utsiden, er at den gjennomgår en grovsorteringsprosess. Fisken sendes ut på en rist, hvor store fisker glir over mens små fisker faller gjennom risten.

#### Stunning

Etter sorteringen havner fisken i en stunningrigg. Først skal fisken i et motstrømskammer, hvor laksen naturlig orienteres med hodet mot strømmen. Vel gjennom kammeret, alle med





Figur 2.5: Hovedprosesser ved InnoVaMar. Den gule boksen viser avgrensningene til slakteriet, mens den grønne boksen viser hva som tilhører fileteringsavdelingen.



Figur 2.6: Grovsortering etter størrelse, stuning og bløgging.

hodet pekende i samme retning, blir fisken slått i svime av en pneumatisk drevet bolt. Stuningriggen kan sees i figur 2.6.

### **Bløgging**

Når fisken så er bevisstløs skal den bløgges. Det vil si at laksen får kuttet en viktig blodåre i gjellene, slik at den blør i hjel. SalMar AS holder for tiden på med å montere automatiske bløggeroboter. Disse skal kjenne igjen gjelleplasseringen på fisken ved hjelp av et kamera, og styre kniven til riktig sted med robotarmen. Inntil dette er i drift foregår bløggingen manuelt. Bløggeområdet vises i figur 2.6.

### **Nedkjøling og utblødning**

For at ikke blodet skal størkne i eller på fisken mens den blør ut, blir laksen plassert i kaldt vann i en utblødningstank. Vannet skal både vaske bort blodet og kjøle ned fisken. Kaldere fisk i resten av slakteprosessen gir, i følge SalMar AS, lengre holdbarhet på de ferdige varene. Laksen føres inn i på én side av tanken, og tas ut på den andre siden etter ønsket oppholdstid.

I tanken skyves laksen fremover av en sakte roterende heliks.

### **Sortering etter kvalitet**

Etter cirka to timer i utblødningstanken tas fisken ut, spyles ren og sorteres etter kvalitet. Sorteringen foregår av operatører som visuelt observerer fisken (se figur 2.7). Operatørene sørger samtidig for at fiskene orienteres likt. Transportbåndet fører fisken over en vekt. Etter dette punktet på linja holder datasystemet orden på størrelse og kvalitet på hver fisk.

### **Sløyting**

I dette punktet på laksens ferd gjennom slakteriet blir den sløyd. Denne prosessen er nærmere beskrevet i seksjon 2.3.

### **Gruppering**

Når fisken er ferdig sløyd er den i stor grad ferdig med prosessene den skal gjennom i slakteriet. Det eneste som gjenstår er at den skal sorteres og grupperes etter størrelse og kvalitet (se figur 2.7). Herfra i fabrikken kan fisken brukes til flere formål, og vil gå ulike veier videre avhengig av formålet. En del blir solgt som helfisk, mens andre blir filetert og partert i varierende grad. Noe av fisken som fileteres plasseres først i kar blandet med is og vann og satt på et kjølelager for å "modnes". Modningen går ut på at fisken står lagret kjølig noen dager, slik at fiskebeinene lettere kan fjernes fra kjøttet.

## **2.2.2 Filetering**

Fileteringsavdelingen tar opp tråden der prosessen i slakteriet slutter. InnovaMar har 3 parallelle fileteringslinjer. Mange av systemene i denne prosessen er automatisert, men det er per dags dato fortsatt flere oppgaver som ikke effektivt lar seg automatisere. Denne seksjonen i kapittelet er en kort beskrivelse av de automatiserte delene av fileteringsprosessen.

### **Partering**

Gaffeltrucker henter kar med fisk fra modningslageret og tipper innholdet over i et bufferkar i starten på hver fileteringslinje. Fisk som ikke skal renses for bein hentes direkte fra grupperingen i slutten av slakteprosessen. Fisken hentes opp av bufferkaret av et kort transport-



Figur 2.7: Sortering etter kvalitet, transportbånd til sløyemaskinene og gruppering etter sløying.

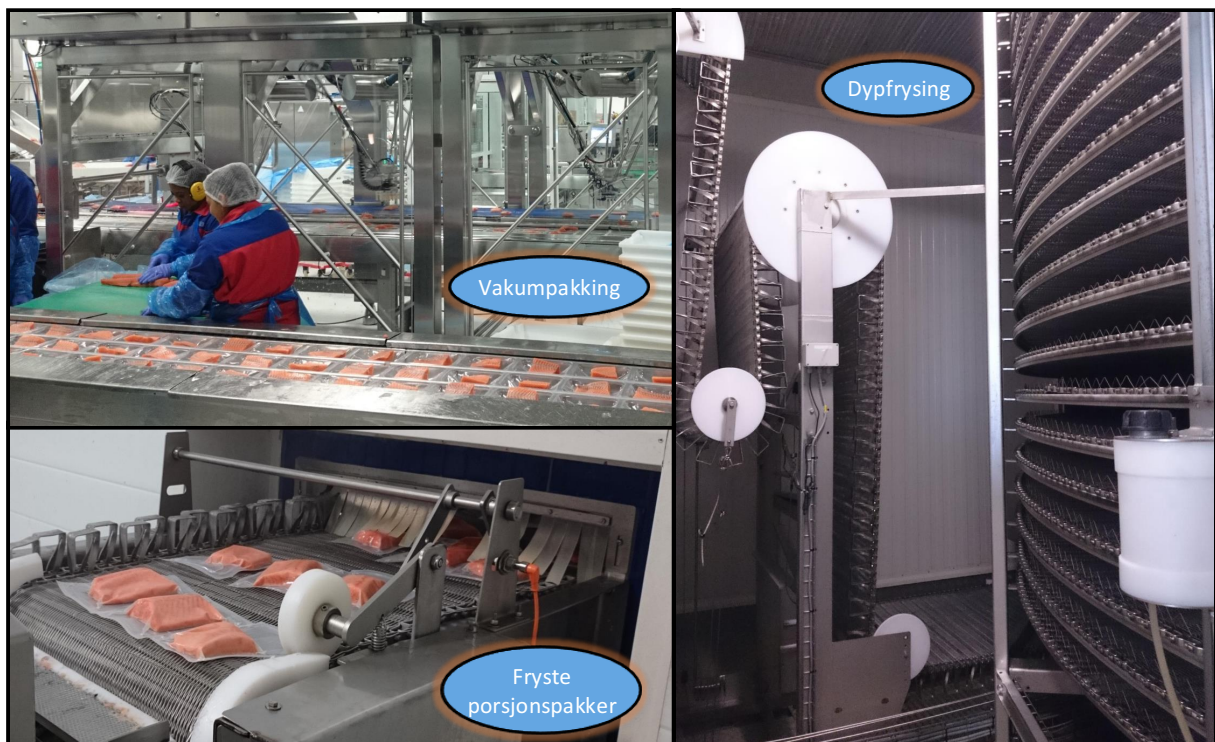
bånd. En operatør sorterer fisken fra isrestene, og mater de inn i maskinen som kapper av hodet. På andre siden av maskinen slippes fisken ned til to andre operatører. Én kontrollerer at kuttet ble gjennomført riktig, mens den andre plasserer fiskene i en jigg. Jiggen tar fisken med gjennom en ny maskin som skjærer av ryggsoylen. Det som frem til nå har vært én fisk kommer ut av maskinen som to helsider. Disse transporteres videre på transportbånd. Siden det nå er rent kjøtt som behandles, foregår den videre prosessen i et område som er fysisk adskilt fra slakteriet. Dette gjøres av helsemessige grunner, for å begrense uønsket bakterievekst i varene som produseres.

### Avskjær

Transportbåndet som kommer gjennom veggene tar helsidene gjennom en maskin som optisk måler størrelsen på stykkene. Roterende knivblad skjærer av slintrer og andre uønskede deler. Fiskestykkene er etter dette punktet klare for manuell bearbeiding av de ansatte.

### Oppdeling, frysing og pakking

Fra dette stadiet i produksjonen gjennomgår fiskestykkene ulike prosesser, avhengig av hvilket produkt som produseres. Noen av stykkene renskes for bein. Noen deles opp i porsjonsstykker. Noen kan vakumpakkes individuelt, mens andre deler pakkes i bulk. Porsjonsstykker og helsider som pakkes individuelt kan hurtigfryses før de pakkes i esker. Dette skjer ved at transportbåndet kontinuerlig fører stykkene inn i en vertikal heliks i et fryserom (se figur 2.8). Her oppholdes stykkene til de når frem til toppen av heliksen, hvorpå de dyttes ut på transportbåndet ferdig nedkjølt. Varer av denne typen pakkes i esker som stables på paller.



Figur 2.8: Vakumpakking og frysing av porsjonspakker.

### 2.2.3 Emballasje og forsendelse

Noe av fisken blir, som tidligere nevnt, solgt som helfisk. Disse produktene behandles ikke av filetavdelingen, men blir pakket i isoporkasser med is direkte etter grupperingen i slutten av slakteprosessen. Pakkingen er i seg selv en automatisert prosess som utføres av spesialiserte maskiner. SalMar har avtale om kontinuerlig etterfylling av fiskekasser med underleverandøren BEWi. Det er BEWi selv som drifter maskineriet som leverer kassene fra lageret til pakkeprosessen. Ferdigpakkede fiskekasser stables på paller av 3 pakkeroboter. Pallene plasseres på et kjølelager og står klare til å hentes med lastebil og fraktes til kunden.

### 2.2.4 Vask og renhold

På kveldstid, når ettermiddagsskiftet er ferdig, vaskes utstyret. Siden det er matvarer som produseres, er renholdet av utstyret i fabrikken veldig viktig. Det rulleres mellom forskjellige sterkt bakteriehemmende såpetyper, for å bekjempe resistensdannelse i bakteriefloraen. Vannet som benyttes i vaskingen må holde høy nok temperatur til at fettrester på maskinene løses. Siden det vanligvis ikke er produksjon i helgene, får utstyret tid til å tørke mellom vaskingen på fredagskvelden og produksjonsstart mandag morgen. Dette er med på å begrense bakterievekst i fabrikken.

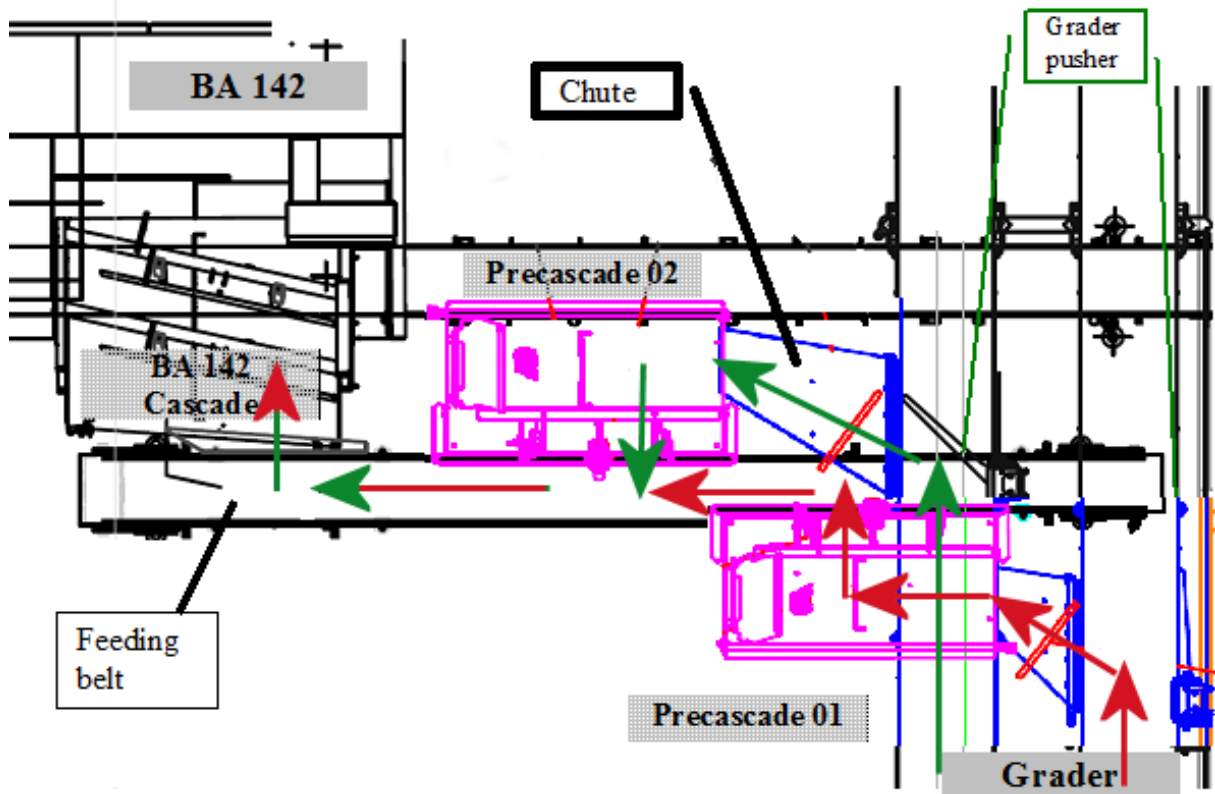
## 2.3 Sløyemaskin

Hvert ledd i en seriekoblet prosess er viktig for å holde produksjonen gående. Dersom transportbåndet, helikstankene eller pumpa som henter fisk inn fra merdene svikter, vil hele prosessen stoppe opp. Det er likevel ganske enkle og velprøvde system som driver disse funksjonene. Slike system har forutsigbare feilmoder, noe som forenkler vedlikeholdsplanlegging og reservedelstyring for systemet. Når det kommer til sløyemaskinene derimot, blir det tydelig at slakteriet er drevet av prosesser på et høyt teknologisk nivå.

InnovaMar har 8 sløyemaskiner (av typen BAADER 142) opererende parallelt på slaktelinja. Disse har effektivisert en ellers svært tid- og ressurskrevende prosess, og utfører brotparten av verdiskapningen i slaktelinja i fabrikken. Maskinene har en standard kapasitet til å håndtere fisk i størrelser fra 2 til 7 kg (Baader, 2015). For å oppnå høyere kvalitet og jevnere resultater kan maskinene individuelt justeres til en mer spesifikk vektgruppe.

Fra sorteringsposten og vekta transporteres fisken på ett av to parallelle transportbånd langs rekken av sløyemaskiner (se figur 2.7). Siden datasystemet har oversikt over vekten og plasseringen av hver fisk på båndet, kan mekaniske armer (Grader pusher i figur 2.9) sortere ut fisken av riktig størrelse til hver maskin. Fisk med deformasjoner eller med en vekt som ligger utenfor kapasiteten til sløyemaskinene blir sendt til to manuelle slaktebenker i enden av transportbåndene.

Figur 2.9 viser hvordan transportbåndene er koblet sammen med en sløyemaskin. De grønne og røde pilene er lagt til for å vise hvordan fisken flyttes fra transportbåndene, via et matebånd (Feeding belt) til sløyemaskinen. Røde piler viser veien fisken går fra transportbåndet lengst til høyre i figuren, mens grønne piler viser veien fisken går fra det andre trans-



Figur 2.9: Adoptert fra funksjonsspesifikasjonsdokument: Mating av fisk fra transportbånd til sløyemaskin (sett ovenfra). Røde piler viser veien fisken går fra transportbåndet lengst til høyre i figuren, mens grønne piler viser veien fisken går fra det andre transportbåndet. De rosa strukturene er innretninger for å koordinere plasseringen av fisk på matebeltet. De blå strukturene viser renner fisken sklir i på vei ned fra transportbåndene.

portbåndet.

Ettersom all fisken blir orientert samme vei ved sorteringsstasjonen, havner alle på samme måte ved matebåndet til sløyemaskinen. En etter en slippes fiskene inn i maskinen. Der ligger de på et transportbelte med buken i været og halen pekende i bevegelsesretningen (se figur 2.11). Det første som skjer med fisken inne i maskinen er at buken kuttet opp av et roterende knivblad. Transportbeltet går med jevn hastighet. Når fisken flyttes videre vil flere robotarmer etter tur arbeide inne i buken (se figur 2.12). Den første suger ut mesteparten av innvollene, mens de påfølgende skraper bort blodranden langs ryggsoylen og suger ut resterende innvoller.

Sløyemaskinen har en kapasitet på opp til 16 fisk i minuttet. Dette er med standard utstyrspakke for fisk i størrelsen 2 - 7kg. Det finnes også valgfrie tilleggspakker for mindre (1,3 - 3,5kg) eller større (5 - 12kg) fisk. Dersom pakken for stor fisk benyttes vil kapasiteten begrenses til 12 fisk i minuttet. Det finnes også en tilleggspakke beregnet på høy gjennomløps-



Figur 2.10: Adoptert fra funksjonsspesifikasjonsdokument: Sløyemaskin fremside

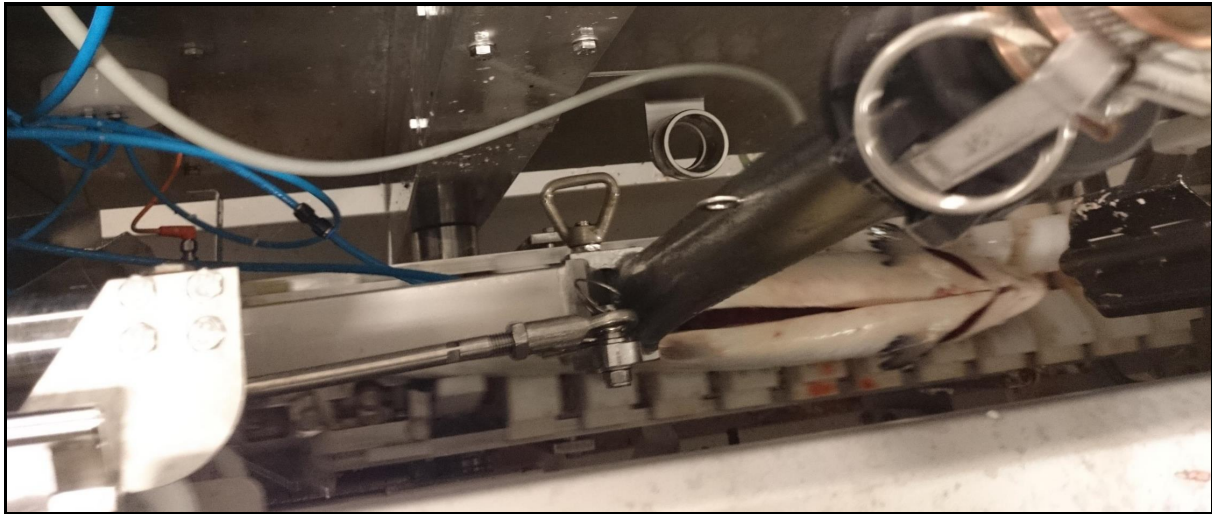
hastighet. Denne fungerer for fisk i størrelse 2 - 4,5kg, og har en kapasitet på opp til 22 fisk i minuttet (Baader, 2015).

## 2.4 Teknisk avdeling

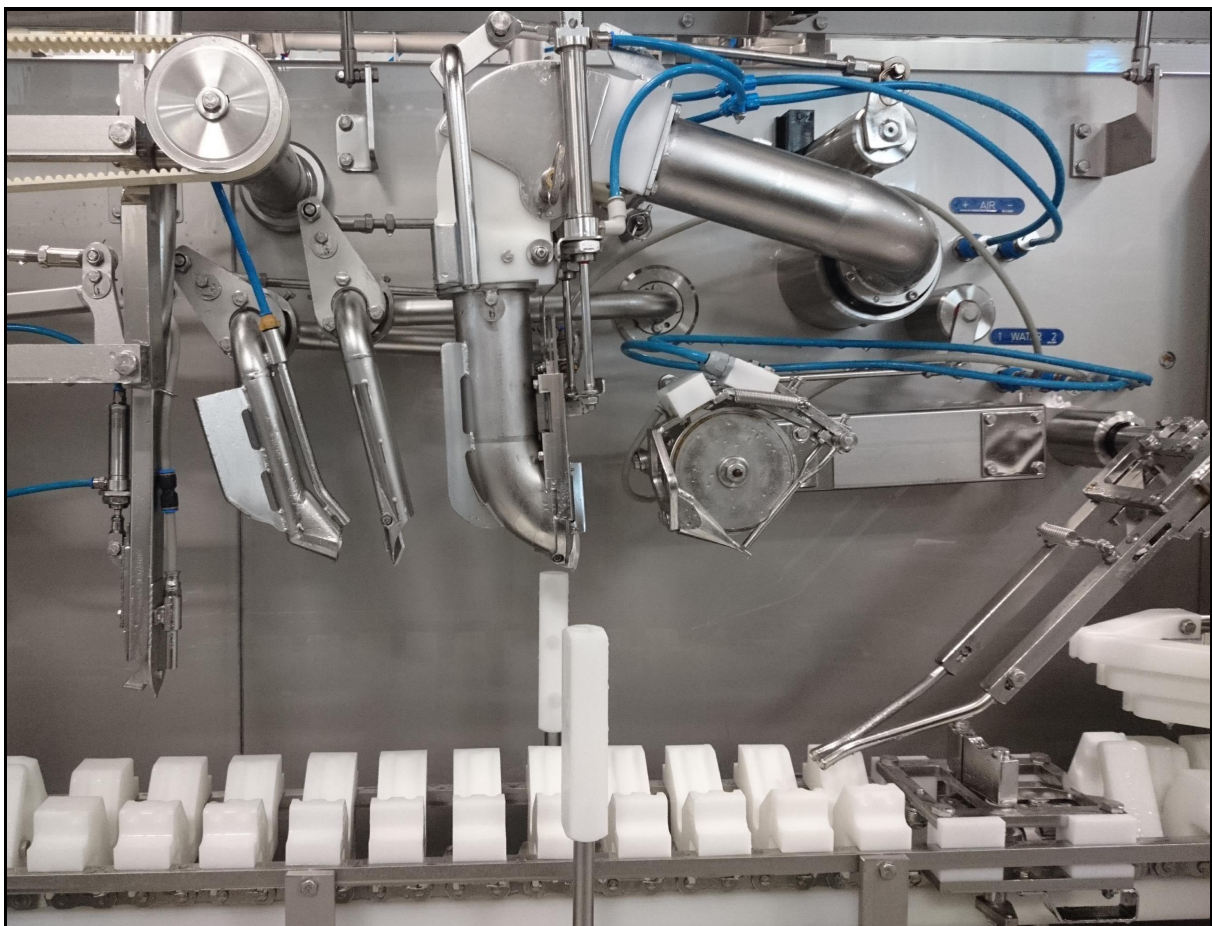
Teknisk avdeling har ansvaret for vedlikeholdet av maskiner og utstyr ved InnovaMar. Vedlikeholdsfunksjonen ved InnovaMar består av alle de administrative og tekniske aktivitetene som er nødvendige for at utstyret i maskinparken skal levere de funksjonene som kreves. Dette innebærer praktiske oppgaver, som blant annet periodisk inspeksjon av utstyret, reparasjoner ved svikt, finjustering og kalibrering av maskiner og eventuelle omstruktureringer av maskinparken. I tillegg til dette kommer mer administrative oppgaver, som for eksempel fordeling av arbeidsoppgaver, bestemme vedlikeholdsmål, holde kurs og opplæring av nytt personell, loggføring av resultater og rapporter, samt håndtering av materialer, reservedeler og verktøy. Hensikten med vedlikeholdsfunksjonen er å ivareta sikkerheten i fabrikken, og å sikre at utstyr og maskiner beholder den kapasiteten, tilgjengeligheten, påliteligheten og kvaliteten som kreves for at SalMar skal kunne drive sin kjernevirksomhet.

Figur 2.13 illustrerer sammenhengen mellom vedlikeholdsfunksjonen og primærvirk-



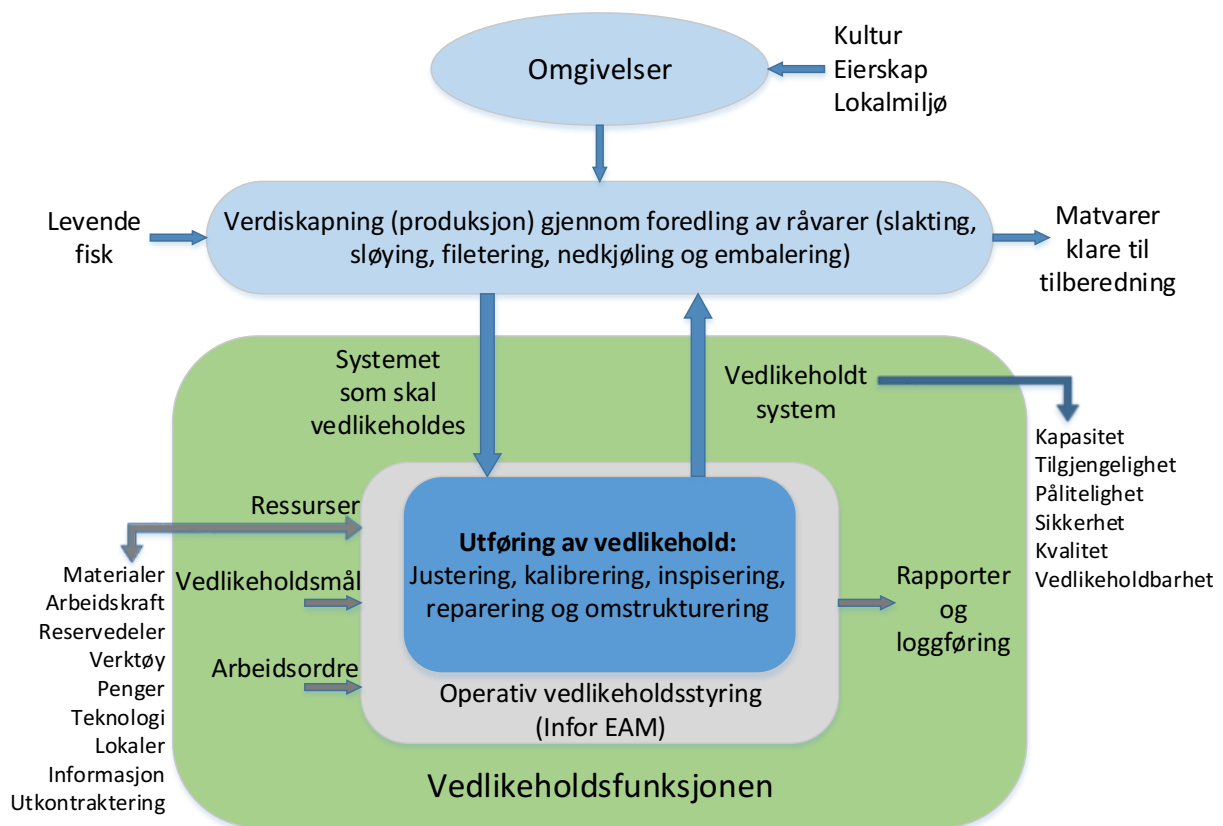


Figur 2.11: Fisk som behandles i sløyemaskina.



Figur 2.12: Utstyr som benyttes i sløyeprosessen.

somheten ved InnovaMar. Det lyseblå feltet i toppen representerer slakting og foredling av fisk, som er hovedaktivitetene som utføres ved InnovaMar. Det grønne området representerer vedlikeholdsfunksjonen ved InnovaMar. Dette er en støttefunksjon som skal sørge for at fabrikken kan driftes som normalt. Det grå feltet representerer vedlikeholdsprogrammet (Infor EAM) som benyttes for å holde styr på informasjonen vedrørende vedlikeholdsfunksjonen. Det mørkeblå området representerer de praktiske aktivitetene som administreres gjennom vedlikeholdsprogrammet, og utføres av vedlikeholdspersonalet på utstyret i maskinparken. De grå pilene viser hvilken informasjon som håndteres i Infor EAM, mens de blå pilene viser hvilke faktorer som påvirker driften av InnovaMar.



Figur 2.13: Vedlikeholdsfunksjonen ved InnovaMar sett i sammenheng med primærvirksomheten.

Ved SalMars tekniske avdeling for InnovaMar er teknikere og vedlikeholdsarbeidere fordelt på en av 5 underavdelinger; kjøling, filetering, slakting, støtte eller elektriker. Arbeiderne ved disse underavdelingene har ansvaret for at teknisk utstyr og maskineri vedlikeholdes og repareres. De ansatte er fordelt på enten formiddagsskift eller ettermiddagsskift, slik at noen med teknisk kompetanse innen hvert felt alltid er tilstede under produksjonen. SalMar har en tekniker på jobb både i slakteriet og i filetavdelingen hver lørdag og søndag, selv om det

ikke er produksjon disse dagene. Dette er en gylden anledning til å gjennomføre forebyggen- de vedlikehold og inspeksjoner av utstyret.

Hver underavdeling har en teamleder som fordeler arbeidsoppgavene som skal utføres hver dag. Slike arbeidsoppgaver kan enten være forhåndsbestemt vedlikehold, forebyggen- de vedlikehold basert på tilstandsobservasjoner av utstyr og maskiner, eller reparasjoner ved utstyrssvikt (se kapittel 3). I vedlikeholdsstyringsprogrammet Infor EAM finner man en over- sikt over arbeidsoppgavene. Planleggingen og fordelingen av disse gjennomføres også her. Både planlagte og utførte aktiviteter i form av arbeidsordre logges i programmet. Systemet kan programmeres til å automatisk generere arbeidsordre basert på kalenderen eller inter- valler. Alternativt kan en arbeidsordre legges inn manuelt ved behov.

Infor EAM har også kontroll på lagerbeholdninger og reservedeler. Utstyr og maskiner i fabrikken er registrert i programmet og strukturert etter hvilken prosess og hvilket system de tilhører. Arbeidsordre som utføres kan knyttes opp mot maskinen det utføres på. Innkjøp av forbruksmateriell, verktøy og reservedeler gjøres gjennom Infor EAM. Varer som bestilles, registreres enten direkte på en arbeidsordre eller lagerføres på hovedlageret. Dette medfører at statistikk over kostnader og ressursbruk ved vedlikehold registreres for hver del av maskin- parken.

## 2.5 Datagrunnlag for InnovaMar

All informasjon i Infor EAM lagres på SalMars servere i SQL (Structured Query Language) databaser. Infor EAM kan benyttes til å finne tilbake til tidligere hendelser og informasjon lagret om disse. Det fungerer godt til daglig bruk i produksjonen og i teknisk avdeling, men til behandling av større mengder data om gangen kreves en mer spesialisert programvare. Til det formålet har Hallgeir Pettersen laget et program i Microsoft Office Access. I dette programmet presenteres informasjonen fra databasene i egendefinerte lister med søke- og sorteringskriterier. Listene kan bearbeides videre i Access, eller eksporteres som regneark til Microsoft Office Excel. For arbeidet med simuleringer av reservedelsproblematikken i kapit- tel 5 er det hentet ut to lister fra Access.

Komponentlisten over reservedeler som er benyttet ved InnovaMar de siste tre årene er blant informasjonen som er hentet ut med Access. For å sortene dataene og hente ut den informasjonen som er nødvendig, må listen begrenses i omfang. Siden denne master-

oppgaven handler om reservedelsproblematikken for sløyemaskiner, er listen begrenset til kun å inneholde de delene som hittil er brukt på minst en av de 8 sløyemaskinene. Denne listen er det nyttig å sortere etter artikkelnummer, slik at det tydelig fremkommer hvor mange av hver type reservedel som er benyttet i den aktuelle tidsperioden. Denne listen benyttes for å estimere sviktfrekvensen til reservedelene i bruk.

Den andre listen som er hentet ut med Access, er listen over medgått arbeidstid ved hver arbeidsordre. Denne listen er også begrenset til kun å inneholde arbeidsordre som omhandler sløyemaskinene. Med disse dataene kan en estimere reparasjonstiden ved svikt av en reservedel. Hvordan slike estimeringer gjøres, og hva de brukes til, forklares i kapittel 5 og 6.

# Kapittel 3

## Vedlikehold- og Reservedelstyring

I denne rapporten benyttes en del terminologi relatert til vedlikehold. Definisjonen og forklaringen på disse uttrykkene finnes i [ISO 13306 \(2010\)](#).

Her er et lite utvalg av de mest brukte uttrykkene i denne rapporten tilpasset fra [ISO 13306 \(2010\)](#):

**Vedlikehold:** Alle tekniske, administrative og ledelsesaktiviteter, som har til hensikt å gjenvinne eller opprettholde en enhet i en tilstand hvor den kan utføre en krevd funksjon.

**Korrigerende vedlikehold:** Vedlikehold utført etter at en feiltilstand er oppdaget, med hensikt å tilbakeføre en enhet i en tilstand hvor den kan utføre en krevd funksjon.

**Forebyggende vedlikehold:** Vedlikehold utført ved bestemte intervaller, eller ved oppfyllelse av bestemte kriterier, med hensikt å redusere sannsynligheten for svikt eller nedsatt evne i en enhet til å utføre en krevd funksjon.

**Tilstandsbasert vedlikehold:** Forebyggende vedlikehold som innebærer en kombinasjon av tilstandsovervåking, inspeksjon og/eller testing, analyser og påfølgende handlinger.

**Forhåndsbestemt vedlikehold:** Forebyggende vedlikehold utført i overenstemmelse med bestemte intervaller eller ved en bestemt mengde gjenværende fungerende enheter, uten tidligere tilstandsundersøkelser.

**Reservedel:** En gjenstand ment å erstatte en tilsvarende gjenstand for å beholde dens opprinnelige ønskede funksjon.

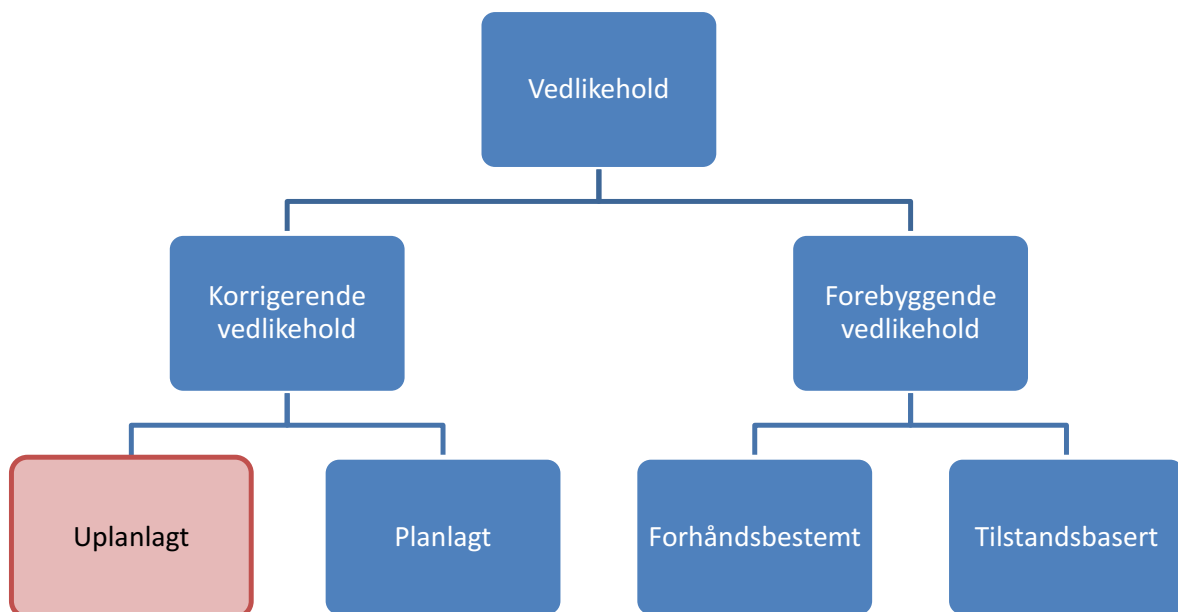
Videre er ett uttrykk tilpasset fra [Wilson \(2013\)](#):

**Proaktivt vedlikehold:** Tiltak og aktiviteter som har til hensikt å fjerne mulige feilårsaker før de blir faktiske problemer.

### 3.1 Ulike typer vedlikehold

Slik definisjonen i avsnittet ovenfor tilsier, handler vedlikehold om å opprettholde den tiltenkte funksjonen av utstyr og eiendeler. Det er to hovedtilnærminger for dette formålet: korrigerende og forebyggende vedlikehold. Begge tilnærmingene har iboende fordeler og ulemper. Når en skal avgjøre hvilken fremgangsmåte man skal benytte, må en vurdere konsekvensene en svikt av enheten medfører. En bør velge forebyggende vedlikehold dersom en svikt har negative følger blant annet for sikkerheten til ansatte, miljø eller omgivelser, tilgjengelighet og oppetid av systemet. I situasjoner hvor en svikt av enheten ikke medfører noen av de overnevnte konsekvensene, kan den beste tilnærmingen helt enkelt være å ikke foreta noen aktiviteter.

I reelle situasjoner vil en vedlikeholdsleder benytte en kombinasjon av forebyggende og korrigerende vedlikehold for å dekke behovene ved utstyr i større anlegg. Figur 3.1 viser en oversikt over koblingene mellom ulike typer vedlikehold. Beskrivelse av typene kommer i avsnittene nedenfor.



Figur 3.1: Forholdet mellom ulike typer vedlikehold.

### 3.1.1 Korrigerende vedlikehold

Korrigerende vedlikehold foregår etter at en feiltilstand eller en svikt er oppdaget. Hensikten er da å gjenopprette funksjonaliteten av utstyret som har sviktet. Korrigerende vedlikehold kan videre deles inn i to underkategorier: planlagt og uplanlagt. Her er det mindre problematisk å velge en strategi. Dr. Alan Wilson skriver i [Wilson \(2013\)](#): "*...the unplanned version of these is the only type of maintenance that should never be chosen by any maintenance function on any equipment*". Ved ikke å planlegge for korrigerende vedlikehold, vil gjennomføringen av vedlikeholdsaktivitetene ta lengre tid enn nødvendig. Dette skyldes både det at aktivitetene som skal utføres er ukjente, og ekstra venting ved bestilling av reservedeler og nødvendig verktøy.

Planlagt korrigerende vedlikehold åpner for muligheter til å korte ned tapt tid, begrense ressursbehovet og redusere negativ påvirkning på sikkerheten og miljøet. Dette oppnås blant annet ved å sikre riktig opplæring av vedlikeholdspersonell, kontrollere tilgangen på reservedeler og utstyr, og å utarbeide nødvendige prosedyrer ved sikkerhetskritiske operasjoner. Planlagt korrigerende vedlikehold kan være tidskritisk, slik at problemene må adresseres umiddelbart. Andre ganger er farene mindre overhengende, slik at aktivitetene kan legges til tidspunkt hvor de er mer praktisk gjennomførbare.

### 3.1.2 Forebyggende vedlikehold

Forebyggende vedlikehold er aktiviteter som finner sted før en enhet har sviktet, og som har til hensikt å hindre svikt i enheten. Dette er spesielt viktig i situasjoner der sikkerhetsmessige, økonomiske eller andre årsaker gjør at enheten ikke må bryte sammen. Selv om sannsynligheten for svikt ikke kan elimineres, kan den i de fleste tilfeller reduseres. Videre kan riktige handlinger minske de negative effektene av svikt.

#### Forhåndsbestemt vedlikehold

Forebyggende vedlikehold kan, på lik linje med korrigerende vedlikehold, deles inn i to underkategorier. Den første av disse kalles forhåndsbestemt vedlikehold. Denne kategorien omfatter vedlikehold som gjennomføres ved bestemte tider eller ved bestemte intervall. Vedlikeholdet kan også gjøres når en prosess har oppnådd en bestemt mengde sykluser eller har vært gjennom en gitt mengde bruk. Dette er en utbredt metode fordi den er enkel å inn-

føre og å kontrollere. I tillegg gir den vedlikeholdsplanleggere gode muligheter til å begrense nedetiden, siden kalenderbaserte vedlikeholdsprogram ofte lar seg koordinere med tilsvarende kalenderbaserte driftsrutiner og operasjoner.

### **Tilstandsbasert vedlikehold**

Tilstandsbasert vedlikehold er den andre underkategorien av forebyggende vedlikehold. Hensikten med denne tilnærmingen er å begrense unødig inngripen, og bare gjøre tiltak når det faktisk trengs. Tilstandsbasert vedlikehold er basert på å overvåke eller inspisere forholdene ved en enhet for å se etter indikatorer som tyder på forringelse eller en fremtidig svikt. Denne metoden kan derfor bare benyttes for enheter som ikke svikter momentant, men har en gradvis degradering over tid. Vedlikehold av denne typen benyttes mest effektivt ved enheter med et relativt forutsigbart tidsintervall fra merkbar degradering starter til svikt inntreffer. Denne perioden kalles for PF-intervall. For enheter der PF-intervallet er for kort til at vedlikeholdsaktiviteter kan gjennomføres, vil ikke tilstandsovervåking ha noen hensikt.

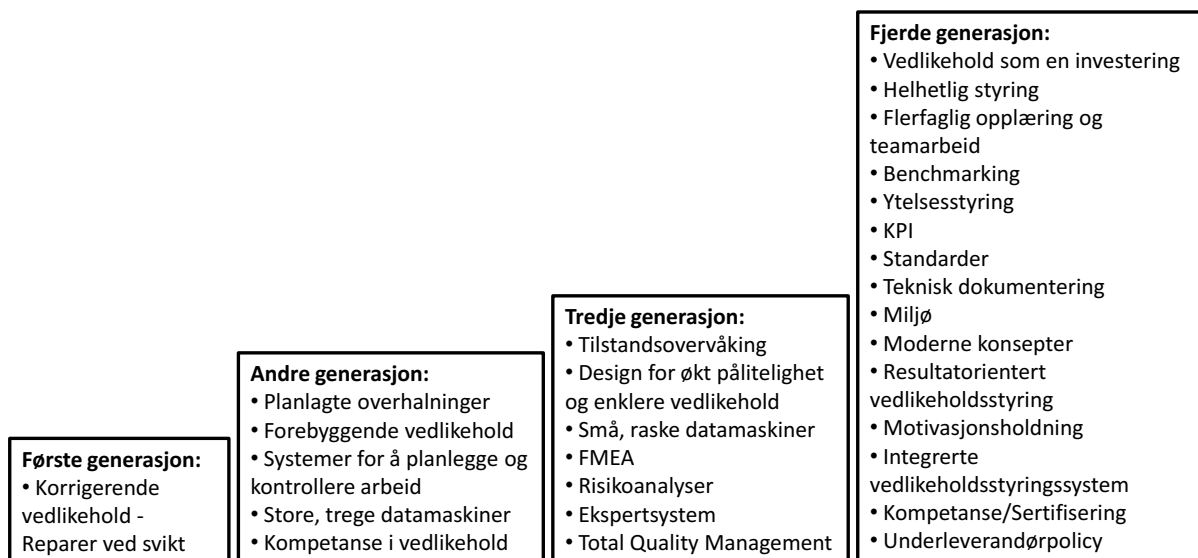
## **3.2 Generasjoner av vedlikehold**

### **3.2.1 Tidligere generasjoner**

John Moubray beskriver i sine bøker [Moubray \(1991, 1997\)](#) tre generasjoner av vedlikeholdsstyring. Utviklingen mellom generasjonene skyldes i stor grad at behovet for og forventningene av vedlikehold har økt. Med et voksende antall av stadig mer komplekst utstyr, maskiner og bygninger, har vedlikeholdsmetoder dukket opp som svar på et reelt behov. Det er blitt en større bevissthet rundt sammenhengen mellom vedlikehold og kvaliteten på varer som kan leveres. I tråd med denne utviklingen har vedlikeholdspersonell tatt i bruk helt nye tankesett og aktiviteter.

[Moubray \(1997\)](#) hevder at i første generasjon handlet vedlikehold om å reparere utstyr som har sviktet. Godt vedlikehold var å respondere kjapt og effektivt ved behov. Andre generasjon fokuserte på vedlikeholdsplanlegging og overhaling av systemer med riktige intervaller. I tredje generasjon ble tilstandsovervåking innført. Vedlikehold handlet her mer om å forutsi når svikt ville inntreffe, hindre svikt og redusere konsekvensene av at svikt inntreffer. Teknikker og metoder for vedlikehold i de 3 ulike generasjonene Moubray beskriver, i tillegg til det som ofte ansees som fjerde generasjon, er fremstilt i figur [3.2](#).





Figur 3.2: Adoptert fra [Per Schjøberg \(2014\)](#): Endringer i vedlikeholdsmetoder

### 3.2.2 Moderne metoder og beste praksis

Flere uformelle artikler ([Dunn, 2007](#); [Hide, 2013](#)) skriver om overgangen fra tredje til fjerde generasjon av vedlikehold. [Dunn \(2007\)](#) argumenterer i sin artikkel for at fokuset i fjerde generasjon av vedlikehold vil være å eliminere årsakene til svikt. For å oppnå dette mener han det trengs to endringer fra tredje generasjon. Det første er et større fokus på design og utvelgelsen av utstyr. Det andre er en organisasjonskultur mer rettet mot feileliminering, og et fungerende system rundt dette.

Generelt sett kan det sies at i utviklingen mellom generasjonene av vedlikehold har tilnærmingen gått fra å være kun reaktiv, med korrigerende vedlikehold og hovedsaklig "brannslukking", til å bli stadig mer proaktiv. I takt med økende konkurranse i næringslivet, har fokuset økt på at vedlikeholdet skal sikre pålitelig utstyr med høy driftstid. Eksempler på dette er metoder som *Total Productive Maintenance* (TPM) og *Reliability Centered Maintenance* (RCM). Et annet fokus har vært på å redusere forbruket av bortkastede materialer, arbeidskraft og andre ressurser. Dette er hva *Lean Maintenance* baseres på. Selvsagt vil ingen vedlikeholdsorganisasjon klare å prestere godt innenfor ett felt, uten å samtidig vektlegge de andre feltene. Av den grunn vil alle metodene nevnt i dette avsnittet overlappe hverandre i større eller mindre grad, med mange fellestrekk og likheter.

### **World Class Maintenance**

Et konsept som i praksis kan kalles femte generasjon innen vedlikehold er uttrykket *World Class Maintenance* (WCM). WCM er et uttrykk for de beste praksiser og optimaliserte vedlikeholdsprosesser. Formålet er å utnytte vedlikeholdsressursene til fulle ved å implementere riktige planleggingsmetoder, målings- og kontrollteknikker, ha passende organisatorisk struktur, og benytte et datastyrt vedlikeholdsstyringsprogram (Mishra et al., 2007). Et kjennetegn av bedrifter som behersker WCM er at de kjenner til, og har gjort tiltak for å minimere, den skjulte fabrikken. WCM er et uttrykk i stadig utvikling. Hva som regnes som beste praksis og optimaliserte vedlikeholdsprosesser endres ettersom ny forskning gjennomføres, og grensen for hva som regnes som mulig flyttes videre.

### **Asset Management**

Noe som kjennetegner gode vedlikeholdsmetoder, er at de tar i betraktning kostnader og/eller fortjenester ved en enhet gjennom hele enhetens levetid. Beregninger av slike levetidskostnader eller levetidsfortjenester forutsetter at organisasjonen tar et lengre perspektiv i betraktning. Nærliggende kostnadsbesparelser eller investeringer må veies opp mot en mulig fremtidig fortjeneste eller et tap. En relativt ny tilnærming til denne problemstillingen heter Asset Management. Dette bygger på et helhetlig perspektiv i alle avgjørelser. Asset management er beskrevet i ISO 55000-serien, som ble utgitt i 2014. To gode kilder til informasjon rundt Asset Management er hvitbøker skrevet av The Institute of Asset Management (2014) og Global Forum of Maintenance & Asset Management (2014).

### **Industri 4.0**

En annen ny og fremtredende utvikling, både innen produksjon og vedlikehold, er *Industri 4.0*. Siden tyske myndigheter annonserte Industri 4.0 som et satningsområde i 2011, har begrepet blitt svært populært blant tysk akademia, industri, og som tema på konferanser (Kagermann et al., 2013). Også i Norge nevnes det i media (Valmøt). Den første industrielle revolusjonen var mekaniseringen av industrien som kom med dampmotoren på 1700-tallet. Den andre var tidlig på 1900-tallet, da samlebåndsproduksjon ble vanlig i bilindustrien. Den tredje industrielle revolusjon kom med robotenes inntog rundt 1970-tallet. Begrepet Industri 4.0 gjenspeiler en forventning om at satsningen kan medbringe den fjerde industrielle revolusjon (Drath and Horch, 2014).

Industri 4.0 baseres på inntoget av internett og kommunikasjonsteknologi i industrien. Utviklingen skjer som følge av økt tilgang, og lavere kostnad, knyttet til *cyber-fysiske-system* (CPS). Dette er systemer med innebygd programvare for datalagring og kommunikasjon, og kan blant annet finnes i bygninger, transportmidler, produksjonsutstyr eller verktøy. CPS vil ha muligheten til å samle inn informasjon og sanntidsdata. Videre kan informasjonen formidles direkte til andre enheter for å ta desentraliserte beslutninger, eller over et nettverk kjent som *tjenestenes internett* eller *tingenes internett*.

For en produksjonsbedrift vil Industri 4.0 kunne medføre større fleksibilitet i produksjonsprosessene. Individuelt tilpasset produksjon vil gi mulighet til å redusere mellomlagringsbuffer, og produsere effektivt med mindre parti om gangen. Vedlikeholdsfunksjoner blir mer effektive, siden god tilgang til informasjon og målinger i sanntid forenkler bruken av tilstandsbasert vedlikehold.

### 3.3 Reservedelstyring

Reservedelstyring er de beslutninger og handlinger som bedrifter utfører for å sikre at riktig verktøy, reservedeler og ressurser er på rett sted til rett tid. Det vil si at de nødvendige delene må være tilgjengelige for at vedlikehold av maskiner og annet utstyr kan gjennomføres til ønsket tid. Lagerbeholdningen av reservedeler skal bistå vedlikeholdspersonalet i å opprettholde driftstilstand og sikre at ønskede funksjoner bevares.

Andre typer lagerbeholdninger som benyttes i vareproduserende industri er råvarelager, mellomlagringsbuffer og ferdigvarelager. Disse brukes for å glatte ut ujevnheter i produksjonsflyten eller ledetiden. Disse lagerene kan økes eller minskes ved å endre på rutiner og tidsplaner i produksjonen. Beholdningen på reservedelslageret, er imidlertid hovedsaklig en funksjon av hvordan maskiner og utstyr brukes og vedlikeholdes. For planlagt og forebyggende vedlikehold er behovet for reservedeler forutsigbart. En lagerbeholdning av reservedeler til dette formålet kan være unødvendig, siden mange deler kan bestilles slik at det kommer frem akkurat tidsnok til å benyttes i vedlikeholdet.

Behovet for reservedeler kan i noen tilfeller utsettes eller unngås ved å justere vedlikeholdsplanene. Et eksempel på dette er ved tilstandsbasert vedlikehold. Dersom tilstandsovervåkingen tilsier at en del er i ferd med å slites ut, kan en strategi være å minske belastningen på dette utstyret frem til reservedelene er tilgjengelige og vedlikeholdsaktivitetene er

praktisk gjennomførbare.

For uplanlagt korrigerende vedlikehold er det viktigere å ha et beredskapslager av reservedeler. Konsekvensene av å ikke ha reservedeler tilgjengelige ved behov kan være nedsett kvalitet eller hastighet på produksjonen, eller produksjonsstopp. Dette medfører ofte høye kostnader og/eller økt sikkerhetsrisiko. Størrelsen på beholdningen av reservedeler vil derfor avhenge av vedlikeholdsstrategi, samt andre omstendigheter som utdypes nedenfor.

### 3.3.1 Faktorer som påvirker reservedelsbeholdningen

[Kennedy et al. \(2002\)](#) har gjennomført et litteraturstudie av artikler rundt lagerbeholdninger av reservedeler. Nedenfor er det sammenfattet et utdrag av faktorerne artikkelen nevner som har påvirkning på valg av strategi for reservedelsbeholdningen.

#### Reparerbare deler

Noen ganger kan det være mer lønnsomt å reparere den ødelagte delen enn å bytte den ut med en ny. I slike tilfeller er det naturlig å anta at reparasjonstiden vil øke, noe som i sin tur påvirker tilgjengeligheten av utstyret. Et alternativ kan være å ha én reservedel tilgjengelig for kjapt å kunne bytte del ved behov. Den ødelagte delen kan deretter repareres uten tidspresset for å gjenoppta normal drift av utstyret.

Dersom reservedelen er svært dyr, er det sannsynlig at det er enkeltkomponenter, i stedet for den fullstendige enheten, som holdes på lager. Dette vil også være tilfelle for slitedeler og forbruksdeler.

En midlertidig strategi for å restaurere funksjonaliteten til kritisk utstyr kan være å benytte deler som til vanlig er i bruk i mindre viktig utstyr. En slik "*kannibalisering*" av annet utstyr vil medføre mye merarbeid, siden det demonterte utstyret må repareres igjen på et senere tidspunkt.

#### Utdaterte reservedeler

Foreldelse av reservedeler på lager kan være en dyr affære. Dette kan forekomme dersom behovet for reservedeler overestimeres, slik at deler forringes før de blir benyttet. Alternativt kan det forekomme ved at utstyret reservedelene skulle erstatte, byttes ut eller moderniseres slik at de gjenværende reservedelene blir utdaterte. Kostnadene ved ubrukte reservedeler

innebærer innkjøp, lagring, håndtering og kassering, uten at delen har bidratt med noen nytteverdi.

På en annen side er det vanskelig å skaffe reservedeler til utstyr som er gått ut av produksjon. Dersom bedriften planlegger å benytte utstyret videre kan det være nødvendig å hamstre reservedeler mens de fortsatt er tilgjengelige.

### **Tilgang til pålitelighetsdata**

Tilgangen på relevante data om påliteligheten til utstyret som benyttes, er i mange tilfeller mangelfull. Dette gjør det vanskelig å forutse hvor lenge utstyret vil vare, når det svikter, og dermed også behovet for reservedeler. En av fordelene med tilstandsovervåking av utstyret er at degradering oppdages tidlig. I slike tilfeller kan en dekke reservedelsbehovet med større presisjon enn man ellers klarer å oppnå. Slik tilstandsovervåking er imidlertid ofte dyrt, og i mange tilfeller vanskelig å gjennomføre. En må som regel ta til takke med historiske data, simuleringer, analyser og ekspertvurderinger. Etter hvert som Industri 4.0 slår rot, kan situasjonen endres slik at tilgangen til pålitelighetsdata blir bedre enn den er i dag.

### **Avhengighet mellom deler**

De ulike delene i en maskin trenger ikke være uavhengige. Svikt i en del henger ofte sammen med svikt i en annen. Særlig hvis denne avhengigheten er ukjent, kan dette by på problemer når strategier for reservedelslageret skal utarbeides.

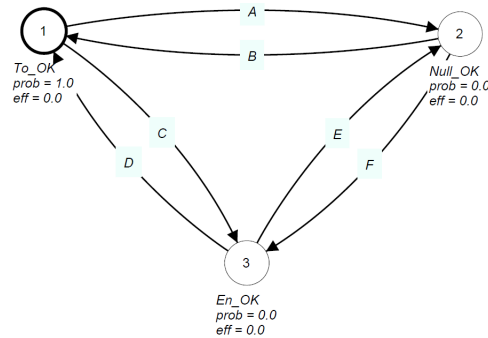
## **3.4 Modeller for reservedelstyring**

Det finnes mange verktøy og metoder som kan brukes for å modellere reservedelsproblematikken, og for å finne egnede løsninger. Noen av de vanligste beskrives kort nedenfor.

### **3.4.1 Markov**

Markovmodeller er, i følge [Ling Wang et al. \(2008\)](#), det mest utbredte verktøyet for modellering av degradering og analyser av vedlikeholdsaktiviteter. Markovmetoden brukes for å analysere hvordan tilstanden til et system endres over tid. Forutsetningene for at et system skal kunne modelleres, er at systemet innehar Markovegenskapen, og at det har en begrenset mengde tilstander det kan befinne seg i.

Markovegenskapen betyr at systemet er uten hukommelse. Det vil si at for et system som befinner seg i tilstand  $i$  ved tiden  $t$ , vil sannsynligheten for at systemet er i tilstand  $j$  ved tiden  $t + 1$ , være uavhengig av hva som skjedde med systemet før tiden  $s$ . Dette er beskrevet godt i [Rausand \(2014\)](#).



Figur 3.3: Eksempel på Markovmodell med 3 tilstander

En av fordelene ved å benytte Markovmodeller er at det er veldig enkelt å ta i bruk. Figur 3.3 viser en modell av et system med 3 mulige tilstander. Tilstandene er markert som sirkler i figuren, mens overgangene mellom tilstandene betegnes som piler mellom sirklene. Overgangen fra en tilstand til en annen skjer stokastisk (vanligvis med eksponentiell fordeling). Dersom omstendighetene tillater bruken av Markovmodeller, er dette en foretrukket fremgangsmåte. Årsaken til dette er at resultatet kan oppnås analytisk. En analytisk fremgangsmåte gir en mye høyere presisjon enn det man kan oppnå ved hjelp av simuleringer.

Ulempene ved Markovmodeller er at de skalerer dårlig i størrelse og kompleksitet. Som figur 3.3 viser har 3 tilstander 6 mulige overganger seg imellom. Med 1 ekstra tilstand øker antall mulige overganger til 12. En tommelfingerregel er at modeller med  $N$  tilstander, har  $N^2 - N$  mulige overganger. Dette problemet kalles tilstandsekspljosjonsproblemet, og setter en øvre begrensning for hvor store modeller det er praktisk å benytte.

### 3.4.2 Hendelsesdrevet simulering

Markovmodeller er begrenset i bruk, både på grunn av tilstandsekspljosjonsproblemet, og på grunn av begrensninger i hvilke typer fordelinger modellen tillater. Der Markovmodeller er begrenset, tilbyr hendelsesdrevet simulering mange muligheter og svært stor frihet. Metoden går ut på å simulere dynamikken i den virkelige verden ved å plassere hendelser på eksakte punkt langs en diskret tidsakse. Det engelske navnet er *Discrete-Event Simulation* (DES), og som navnet tilsier må tidsenheten være diskret inndelt. Årsaken er at metoden ba-

seres på datasimuleringer, og at datamaskiner ikke er i stand til å håndtere kontinuerlig tid. Dersom tidsenheten er liten nok, kan likevel kontinuerlig tid tilnærmes på en tilstrekkelig måte (Robinson, 2014).

Metoden kombinerer regneark med avanserte programmeringsspråk, og åpner dermed for å modellere svært varierte system. I motsetning til Markovmetoden, kreves det en del ferdigheter for å benytte DES. Metoden krever at det produseres programkode, og er derfor mindre intuitiv å forstå for personer uten kjennskap til programmering.

Ulike hendelser defineres som matematiske funksjoner. Disse funksjonene benyttes sammen med en tilfeldighetsgenerator til å simulere tidspunkt for hendelsene. For simulering av reservedelsstrategier, kan typiske hendelser være slitasje eller svikt av komponenter, som fordrer et behov for reservedeler. Før simuleringen gjennomføres, må det defineres hvilke data som ønskes estimert. Eksempler på dette kan være hvor mye tid som ikke blir brukt til produksjon på grunn av forsinkelser i reparasjon grunner reservedelsmangel.

### 3.4.3 PetriNet

PetriNet er et grafisk verktøy for å modellere systemer og prosesser. Prinsippet og de grunnleggende grafiske elementene ble oppfunnet av Dr. Carl Adam Petri (Petri and Reisig, 2008) i 1939, da han var 13 år gammel. Formålet med PetriNet var å illustrere kjemiske prosesser. Verktøyet er siden den gang videreutviklet mange ganger. Det finnes spesialiserte varianter av PetriNet egnet for telekommunikasjon, transport og utvikling av programvare (Rausand, 2014).

PetriNet kan i denne sammenhengen sees på som en mellomting mellom Markov og DES. Metoden er grafisk, og dermed mer intuitiv enn DES. Samtidig er den mer fleksibel, og byr på større variasjon enn Markovmetoden. PetriNet har færre frihetsgrader og valgmuligheter enn DES, fordi det baseres på et grafisk brukergrensesnitt og består av en begrenset mengde elementer som kan benyttes. PetriNet-modeller skalerer godt for store og komplekse system, og er ikke begrenset av tilstandsekspløsjonsproblemet.

Systemet modelleres med beholdere og retningsbestemte overganger mellom beholdere. De ulike tilstandene systemet kan oppnå, beskrives ved å fordele polletter i de ulike beholdere i modellen. Simuleringer gjennomføres i PetriNet-modeller omtrent på samme måte som i DES. Dette innebærer bruk av en tilfeldighetsgenerator og matematiske funksjoner forbundet med overgangene. En videre innføring i PetriNet og en detaljert beskrivelse av

modellen for SalMars sløyemaskiner presenteres i kapittel 5.

Blant de tre metodene beskrevet i avsnitt 3.4 er det PetriNet som er mest egnet til formålet i denne masteroppgaven. Begrunnelsen for dette valget er at en PetriNet-modell av sløyemaskinene ved InnovaMar kan endres og omformes til å gjelde andre deler av fabrikk, uten at dette krever stor innsats. PetriNet er nok ikke like allsidig som DES, men er etter undertegnede oppfatning fleksibel nok til å kunne oppnå de ønskede resultatene.



# Kapittel 4

## Den skjulte fabrikken

### 4.1 Den skjulte fabrikken

Fabrikker skal drive verdiskapning. Det er slik bedriftene som driver fabrikken tjener penger. Dette er ingen hemmelighet, men kan regnes som allmennkunnskap. Det som derimot kan være en hemmelighet, er hvordan de ulike bedriftene driver sine fabrikker. Det som skiller gode fabrikker fra dårlige er hvorvidt de klarer å opprettholde verdiskapning i alle aktiviteter og prosesser som gjennomføres.

I følge [Pete Abilla](#) kan aktiviteter og prosesser deles inn i tre grupper ([Pete Abilla, 2015](#)):

**Verdiskapende:** Steg i prosessen som gir form eller funksjon i produktet som produseres eller tjenesten som ytes.

**Ikke-verdiskapende:** Steg i prosessen som ikke tilføyer verdi i produktet eller tjenesten.

**Ikke-verdiskapende, men nødvendig:** Steg i prosessen som ikke direkte tilføyer verdi i produktet eller tjenesten, men som muliggjør verdiskapning i andre steg.

I et mettet marked eller i bransjer med sterk konkurranse kan det være vanskelig å oppnå fortjeneste. Priser på varer og tjenester presses nedover, og kan være veldig nær grensen for hva som er lønnsomt. For organisasjoner kan det være vanskelig å øke omsetningen. I stedet kan det være lettere å øke fortjenesten ved å redusere de unødvendige kostnadene og tapene ved produksjonen. Nødvendige prosesser som ikke gir verdiskapning bør også begrenses i størst mulig grad. Den skjulte fabrikken er den mengden ekstra fortjeneste som kan oppnås dersom en organisasjon hever prestasjonene til verdensklasse ([Ahmad and Benson, 1999](#)).

Uttrykket betegner organisasjonens bestrebelser som kun bunner i sløsing av materialer og unyttige arbeidsoppgaver. Den skjulte fabrikken betegner imidlertid også den potensielle fortjenesten organisasjoner kan oppnå ved å om dirigere slike bortkastede ressurser til nyttige formål. Fordelene ved å redusere den skjulte fabrikken begrunnes med at det er lettere å redusere sløsing enn å tjene inn tapet ved ekstra salg av tjenester eller varer. Dersom en bedrift har en forventet fortjenestemargin på 5%, vil en utgift på kr 15 000,- kreve et mersalg på kr 300 000,- for å kunne forsvares.

Peter Barnes sier i [Booty \(2002\)](#): «Du kan ikke forbedre det du ikke kan måle, og du kan ikke måle det du ikke kan se». Det å oppdage og kvantifisere elementene i den skjulte fabrikken gjøres ved hjelp av indikatorer. Dette vil bli presentert i avsnitt [4.2](#).

## 4.2 Indikatorer

### Definisjoner

I standarden [NS-ISO 15341 \(2007\) - Maintenance Key Performance Indicators](#) står det beskrevet engelske definisjoner av *indicator* og *scorecard*. Oversatt til norsk lyder disse:

**Indikator:** En karakteristikk av et fenomen, målt i henhold til en bestemt metode, for å bedømme utviklingen.

**Målstyring:** Et sett av assosierte, samsvarende og komplementære indikatorer som gir syntetisk og global informasjon.

### 4.2.1 Behov for indikatorer

I [Revelle \(2013\)](#) estimerer Jack B. Revelle at den skjulte fabrikken står for mellom 15 og 40% av kapasiteten til en arbitrær bedrift. Hvordan kan man beregne dette for hver enkelte organisasjon? Prosessene og aktivitetene som gjennomføres må registreres, dokumenteres, måles og analyseres. Det er disse indikatorer benyttes til.

[NS-ISO 15341 \(2007\)](#) beskriver hovedindikatorer for ytelse innen vedlikehold. Vedlikehold er bare én av elementene som må vurderes for å kartlegge den skjulte fabrikk. Prinsippene rundt indikatorer som beskrives i standarden er like gjeldene for alle typer indikatorer, så eksemplene i dette avsnittet er hentet derfra. [NS-ISO 15341 \(2007\)](#) oppsummerer bruksområdene av indikatorer i disse punktene:

- Måle status på utstyret.
- Vurdere ytelse.
- Sammenligne ytelse med annet utstyr.
- Identifisere styrker og svakheter.
- Kontrollere progresjon og endring over tid.

Analysen av målinger fra slike indikatorer kan videre benyttes til å:

- Sette delmål.
- Planlegge strategier og handlinger.
- Kommunisere resultat for å informere og motivere.

Avhengig av hvilke typer indikatorer som benyttes, kan målingene gjennomføres etter ulike tidsplaner. Noen målinger er det hensiktsmessig å gjennomføre periodisk, mens andre er mer egnet for å følge bestemte hendelser. Perioden eller tidsintervallet målingene omfatter vil også variere stort. Noen indikatorer gir et øyeblikksbilde av situasjonen, mens andre er mer kumulative i sin natur. Dette vil ha en innvirkning på hvor ofte det er rasjonelt å foreta målinger.

Dersom en organisasjon skal sammenligne indikatorer fra ulike tidspunkt, avdelinger eller andre organisasjoner, er det viktig å være klar over hvilke faktorer som kan påvirke resultatet. Det kan være både eksterne faktorer utenfor organisasjonens kontroll, og interne faktorer som i ulike grader er innenfor organisasjonens kontroll.

### 4.2.2 Ulike typer indikatorer

I [NS-ISO 15341 \(2007\)](#) klassifiseres indikatorer som benyttes innen vedlikehold i tre ulike hovedkategorier; økonomiske, tekniske og organisatoriske indikatorer. Tabell [4.1](#) viser et lite utvalg fra hver av kategoriene. Standarden beskriver en fremgangsmåte for å bestemme hvilke indikatorer som skal benyttes i organisasjonen. Den beskriver i tillegg hvordan dataene som kreves skal måles, samles, presenteres og analyseres.

De viktigste indikatorene, de som er mest relevante for at en organisasjon skal kunne forstå sin plassering i markedet, kalles "*indikator for nøkkelytelse*" eller KPI (Key Performance

Tabell 4.1: Indikatorer

<b>Økonomiske indikatorer</b>	<b>Tekniske indikatorer</b>
$\frac{\text{tilgjengelighet relatert til vedlikehold}}{\text{vedlikeholdskostnad}}$	$\frac{\text{driftstid}}{\text{driftstid+driftsstans grunnet vedlikehold}}$
$\frac{\text{kostnad av materialer brukt i vedlikehold}}{\text{vedlikeholdskostnad}}$	$\frac{\text{driftstid}}{\text{driftstid+driftsstans grunnet svikt}}$
$\frac{\text{kostnad av korrigerende vedlikehold}}{\text{vedlikeholdskostnad}}$	$\frac{\text{driftstans grunnet forebyggende vedlikehold}}{\text{driftsstand relatert til vedlikehold}}$
<b>Organisatoriske indikatorer</b>	
$\frac{\text{antall vedlikeholdspersonell}}{\text{antall personell totalt}}$	
$\frac{\text{vedlikeholdspersonell på vakt}}{\text{antall vedlikeholdspersonell totalt}}$	
$\frac{\text{antall arbeidsordre utført til planlagt tid}}{\text{antall arbeidsordre planlagt totalt}}$	

Indicator). Disse indikatorene gir gjerne informasjon mer knyttet mot organisasjonens arbeidsfelt enn det rent tekniske eller økonomiske indikatorer gjør. Slike indikatorer for nøkkelytelse kan ofte bestå av en kombinasjon av flere måleverdier fra enklere indikatorer. Et godt eksempel på dette er OEE (Overall Equipment Efficiency) og PLI (Profit Loss Indicator), som beskrives videre i avsnitt 4.3 og 4.4.

### 4.3 OEE

OEE er en forkortelse for Overall Equipment Efficiency. Indikatoren er en samlet verdi som forteller om virkningsgraden og effektiviteten av utstyret i en organisasjon. OEE regnes ut som produktet av tre verdier; tilgjengeligheten av utstyret, ytelsen under drift og kvaliteten på produserte varer eller utførte tjenester. Indikatoren viser hvordan tilgjengeligheten av utstyr kan medføre tapt produksjonstid. Den viser også hvordan redusert ytelse fører til lavere effektivitet i den tiden utstyret er tilgjengelig. Til sist viser den hvordan lav kvalitet i funksjonen utstyret utfører, bidrar til defekter eller redusert verdi på produsert vare. Alle disse tre momentene kan medføre tapt fortjeneste, både i form av tapt inntekt og økte kostnader. Figur 4.1 viser oppbygging av argumentene i OEE, og hvordan nøkkelveidene beregnes (Koch, 2011).

Tilgjengeligheten av utstyret beskriver hvor stor andel av potensiell produksjonstid som faktisk benyttes til produksjon. Dette regnes ut for en spesifikk maskin, for et system av ma-

Tilgjengelighet	A	Potensiell produksjonstid	
	B	Faktisk produksjonstid	<b>Tilgjengelighetstap:</b> - Venting - Sammenbrudd - Flaskehals
Ytelse	C	Teoretisk produksjon	<b>Effektivitetstap</b>
	D	Faktisk produksjon	
Kvalitet	E	Produerte produkter	
	F	Gode produkter	<b>Kvalitetstap:</b> - Feilvare - Omarbeiding

Figur 4.1: Beregning av OEE

skiner, for en prosess eller for hele fabrikkens. Tilgjengeligheten er raten mellom faktisk produksjonstid (B) og potensiell produksjonstid (A), og utregnes på følgende måte:  $OEE_{\text{Tilgjengelighet}} = \frac{B}{A}$ . Den resterende tiden ( $A - B$ ) er ikke-produktiv tid, som for eksempel ved sammenbrudd eller venting i forbindelse med flaskehals eller omstilling.

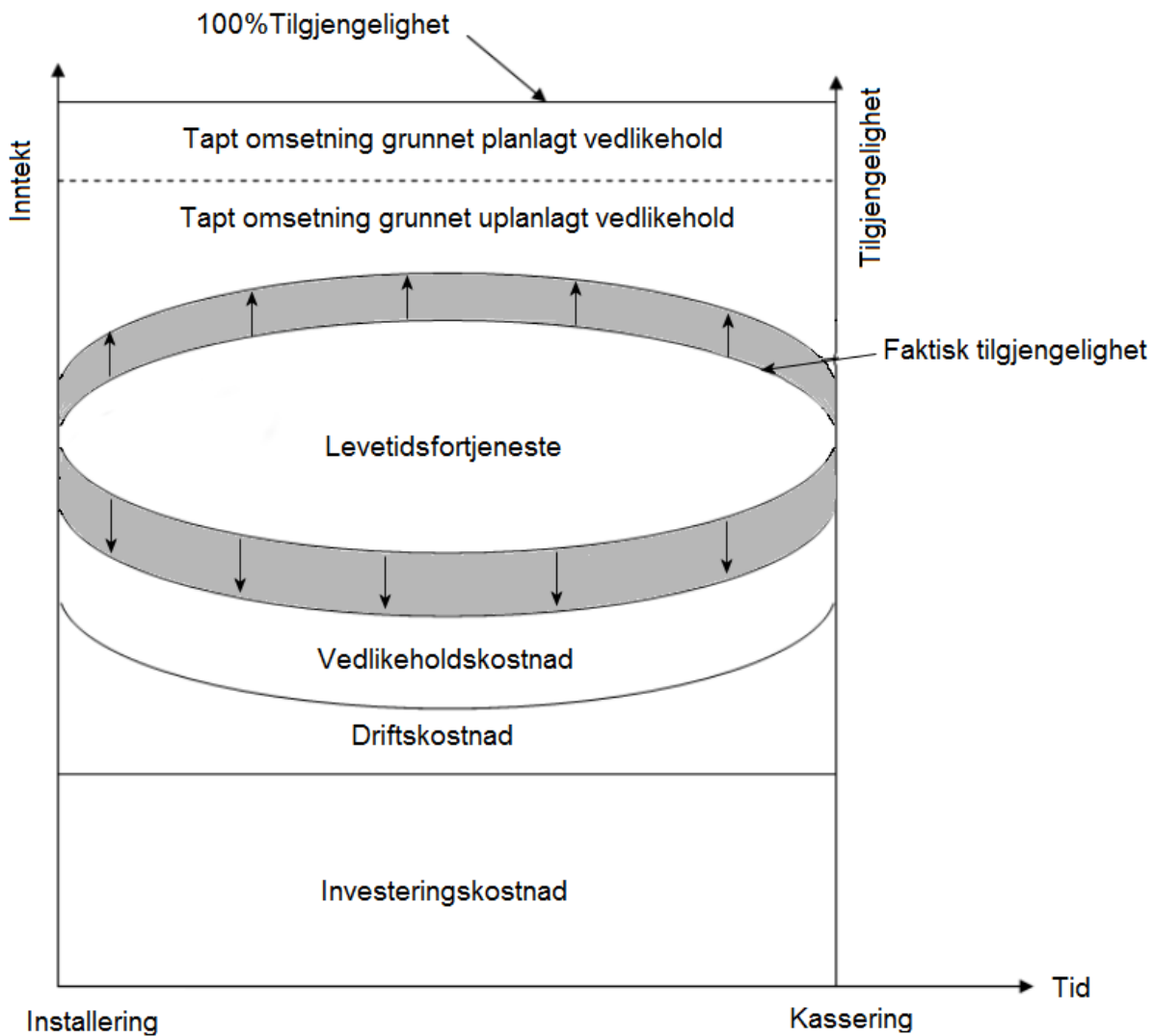
Ytelsen av utstyret vil si hastigheten på produksjonen som utføres. Det er raten mellom teoretisk maksimalt antall produserte enheter per tid (C) og det faktisk produserte antall enheter i den samme tiden (D). Raten regnes ut slik:  $OEE_{\text{Ytelse}} = \frac{D}{C}$ . Årsaken til avviket kan være at utstyret må kjøres med redusert hastighet, eller at det må stoppes for å justeres eller lignende.

Så nå vet vi hvor lenge utstyret er i bruk og hvor fort det kjøres. Det neste spørsmålet er hvor mange av de produserte varene som er av god nok kvalitet til å tilfredstille de spesifiserte kravene. Kvaliteten på utstyret betegner andelen av produserte enheter som kan benyttes til fulle. Raten består av:  $OEE_{\text{Kvalitet}} = \frac{F}{E}$ . Årsaker som kan føre til lavere kvalitetsrate kan være at noen produkter må justeres manuelt, mens andre kan være så dårlige at det regnes som skrap.

Når vi så kjenner til disse tre ratene, kan vi regne ut OEE som følgende:

$$\begin{aligned}
 OEE &= OEE_{\text{Tilgjengelighet}} \cdot OEE_{\text{Ytelse}} \cdot OEE_{\text{Kvalitet}} \\
 &= \frac{B}{A} \cdot \frac{D}{C} \cdot \frac{F}{E} \cdot 100\%
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

#### 4.4 PLI - Indikator for tapt fortjeneste



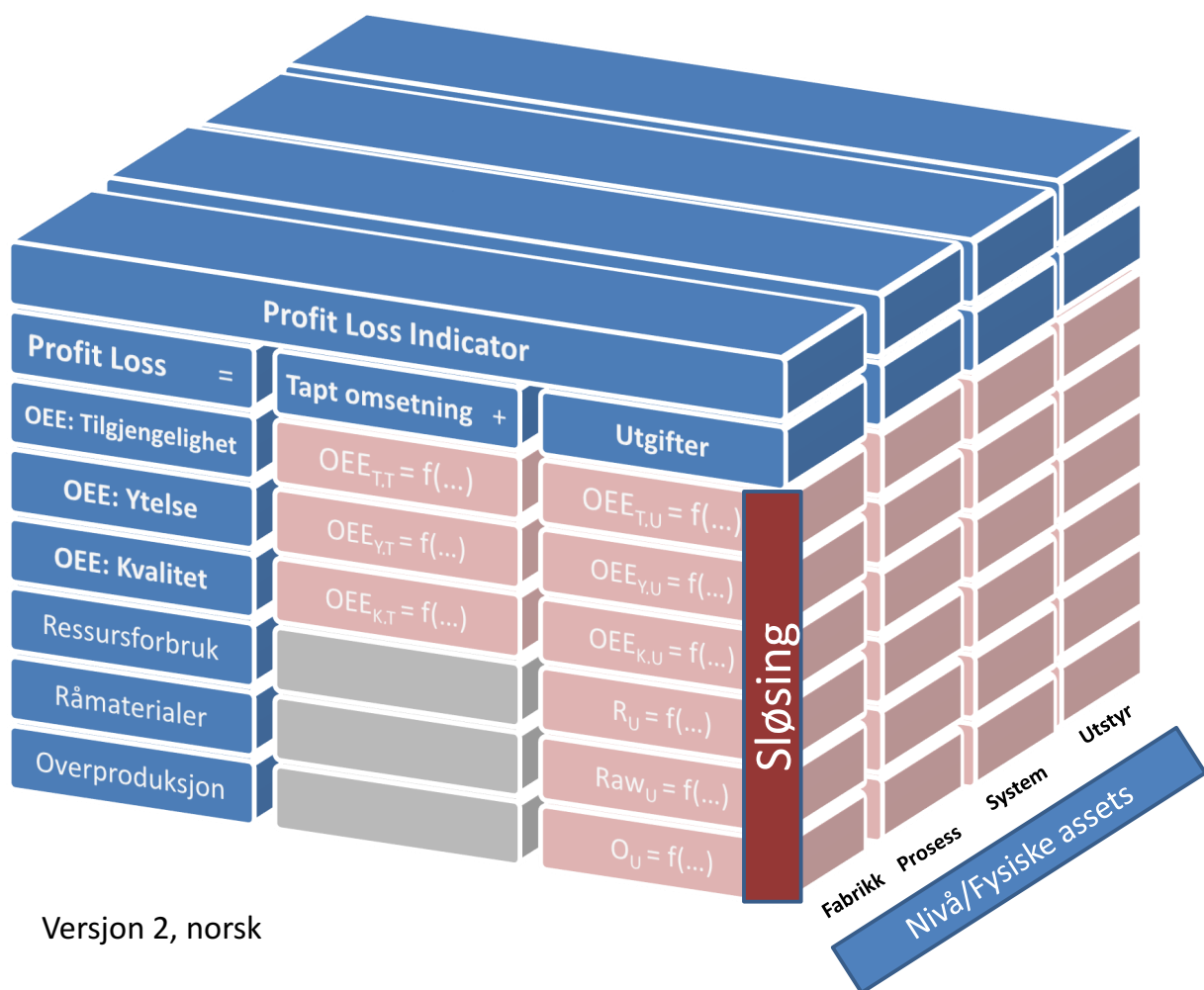
Figur 4.2: Innvirkningen av PLI på levetidsfortjeneste (LCP)

PLI er en indikator med stort potensiale for vareproduserende bedrifter og andre organisasjoner som leverer tjenester. Årsaken til denne uttalelsen er at indikatoren er et godt verktøy for å kartlegge den skjulte fabrikken. Dette er en overordnet indikator som ikke bare gjelder vedlikeholdsorganisasjonen, men bedriften i sin helhet. Indikatoren består av mange underliggende moment, som hvert og et beskriver et reellt eller potensielt tap i ulike deler av

organisasjonen. Disse kan deles inn i to hovedkategorier; de som beskriver direkte kostnader og de som beskriver tapt omsetning.

Figur 4.2 viser sammenhengen mellom kostnader, tapt omsetning og fortjeneste (LCP). Arealet under den øverste kurven viser totale inntekter ved salg av varer eller tjenester i en ideell situasjon med 100% tilgjengelighet. De andre kurvene viser hvor mye av den totale mulige inntjeningen som går med til direkte kostnader, og hvor mye som ikke realiseres som inntjening på grunn av nedetid av utstyr. Det grå området på figuren symboliserer potensiell fortjeneste i den skjulte fabrikk. Dette området kan realiseres som fortjeneste dersom organisasjonen klarer å gjennomføre nødvendige tiltak. Arealet man sitter igjen med i midten av figuren er den reelle fortjenesten gjennom utstyrets levetid.

#### 4.4.1 Beregningsmodell for PLI



Figur 4.3: Adoptert fra Rødseth: Beregningsmodell for PLI

Beregningsmodellen for PLI er utviklet av Rødseth, men den er ennå ikke publisert. Figur

4.3 viser en foreløpig utgave av modellen. Dette er en grafisk fremstilling av hvordan PLI kan visualiseres og settes i sammenheng med andre indikatorer. Som figuren viser, tar modellen for seg profit loss både i form av kostnader og tapt omsetning. Den inkluderer beregninger av OEE og sløsing i den skjulte fabrikken. De røde boksene er verdier som kan beregnes med data fra målepunkt i organisasjonen. De blå boksene langs venstre side av figuren, er indikatorer som beskriver organisasjonens status i sine respektive felt. Hver av disse indikatorene består av verdiene i de røde boksene på samme rad. PLI er strategisk plassert på toppen av figuren, som en samlet verdi for indikatorene i radene nedenfor. PLI kan i så måte beregnes ved at verdien i alle de røde boksene nedenfor måles og dokumenteres, og legges sammen til en total verdi på toppen.

Langs høyre side av figuren vises de ulike nivåene PLI kan beregnes for. Lengst fremme er fabrikken i sin helhet. Bak denne kommer prosessene i fabrikken. Selv om PLI for hver av prosessene beregnes individuelt, vil de ikke være helt uavhengige. Svikt i en av prosessene kan føre til nedetid i en annen. Dette medfører at beregninger av PLI for prosessene må sees i sammenheng med hverandre for å få et dekkende bilde av fabrikken.

Hver prosess vil bestå av ett eller flere system. Avhengig av kritikaliteten til systemene i prosessen vil påliteligheten og tilgjengeligheten for ett system kunne påvirke PLI-beregningene for de andre systemene.

Systemene er bygd opp av individuelt utstyr. Slikt utstyr kan igjen deles inn i komponenter, men modellen i figur 4.3 går ikke dypere enn til utstyrsnivå. Dette kan begrunnes med at tilgjengeligheten til utstyret stort sett forringes fullstendig av en svikt i enkeltkomponentene det består av. Det vil selvsagt være unntak hvor dette ikke er tilfelle, og PLI for komponenter påvirker utstyret omtrent som utstyret påvirker prosessen. Kompleksiteten av beregningene i modellen øker eksponensielt for hvert nivå som introduseres, så et sted må man sette en grense for hvor mange nivå som inkluderes. Dette er en avgjørelse som må gjøres spesifikt for de individuelle organisasjonenes situasjon.

### **Forklaring av de røde feltene i modellen**

**OEE<sub>T,T</sub>** Tapt omsetning fordi utstyret er ute av drift.

**OEE<sub>T,U</sub>** Utgifter ved at utstyret er ute av drift.

**OEE<sub>Y,T</sub>** Tapt omsetning fordi utstyret yter dårligere enn normalt.



$OEE_{Y,U}$  Utgifter ved at utstyret yter dårligere enn normalt.

$OEE_{K,T}$  Tapet omsetning fordi kvaliteten på varene som produseres er lav.

$OEE_{K,U}$  Utgifter ved at kvaliteten på varene som produseres er lav.

$R_U$  Utgifter i form av unødvendig ressursforbruk.

$Raw_U$  Utgifter ved unødvendig forbruk av råmaterialer.

$O_U$  Utgifter ved overproduksjon.

#### 4.4.2 Kostnadsberegning og beslutningsunderlag

Kostnadsberegningene i modellen beskrevet i seksjon 4.4.1 består av relativt enkle regnestykker, så lenge den nødvendige datainnsamlingen er gjennomført. En organisasjon må ha tilstrekkelig informasjon om hvilke ressurser og råvarer som går med ved overproduksjon eller ved de ulike feilmodene utstyret kan ha. Organisasjonen må i tillegg ha informasjon som forteller hvor ofte slike feilmoder forventes å inntreffe. Slik informasjon kan hentes fra forskjellige kilder, noen mer pålitelige enn andre. Eksempler på kilder kan være teknisk data fra produsenter av utstyret, historikk og logger fra produksjonen, tester og undersøkelser i forbindelse med vedlikehold, eller data fra tilsvarende utstyr i lignende organisasjoner.

PLI-verdien kan sammenlignes med tilsvarende verdier fra tidligere tidspunkt, slik at trenden og den historiske utviklingen tydeliggjøres. Modellen differensierer også mellom opphavet til den tapte fortjenesten i de ulike radene og kolonnene. Dette kan være nyttig for å bestemme prioriteringene blant områdene som har behov for utbedringer. I kapittel 6 demonstreres det hvordan modellen kan benyttes i et praktisk eksempel.



# Kapittel 5

## PetriNet

I seksjon 5.2 introduseres de grunnleggende grafiske elementene og prinsippene i PetriNet som benyttes i masteroppgaven. I seksjon 5.3 presenteres PetriNet-modellen av sløyemaskinene ved InnovaMar. I seksjon 5.4 beskrives simuleringene som gjennomføres med modellen og resultatene som fremkommer av dette.

### 5.1 Fremgangsmåte del 1

Dette er første del av metoden som benytter PetriNet-modellen og beregninger av PLI-verdier for å finne gode reservedelsstrategier. Fremgangsmåten i bruk av PetriNet-modellen av sløyemaskinene for SalMar, vil her bli presentert som en liste av gjøremål. Denne listen er et supplement til forklaringen i resten av kapittelet, og har til hensikt å tydeliggjøre stegene i prosessen.

1. Velg en artikkel som lagerbeholdning og bestillingsnivå skal bestemmes for.
2. Innhent pålitelighetsdata for artikkelen. Benytt data fra den kilden med størst troverdighet. Alternative kilder er:
  - Estimat basert på historiske data slik det er forklart i avsnitt 5.3.5.
  - Oppgitt MTTF fra produsent eller leverandør av artikkelen.
  - Estimeringer med en av metodene listet på nettsiden til [ROSS Gemini Centre](#).
3. Estimer tidsforbruket for reparasjoner og leveringstid ved bestilling av nye deler fra leverandør. Både dette og pålitelighetsdataene fra forrige punkt plottes inn som verdier i sine respektive parametere i modellen.

4. Gjennomfør Monte Carlo-simuleringer med PetriNet-modellen for et utvalg kombinasjoner av lagerbeholdninger og etterbestillingsnivå.
5. Lagre resultatene i et regneark for å kunne benytte de i PLI-beregninger. Resultatene av Monte Carlo-simuleringen som utføres i programmet GRIF fremstår som vist i tabell 5.8. For lettere å kunne benytte resultatene videre, er det ønskelig å samle den relevante informasjonen fra de ulike simuleringene på ett sted. Dette er vist i tabell 5.9.

Denne listen omfatter stegene som utføres med PetriNet-modellen. Listen fortsetter i kapittel 6, hvor beregningen av PLI-verdier og påvirkningen dette har på beslutningstakingen forklares.

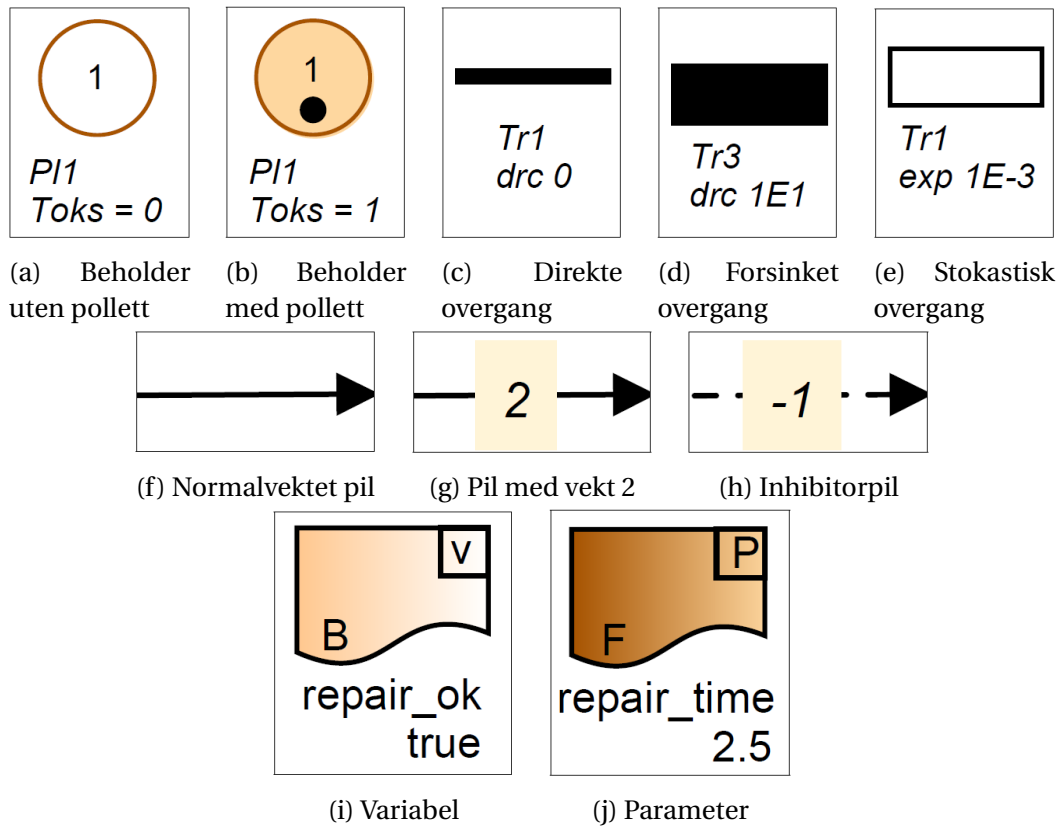
## 5.2 Introduksjon av metoden

For å lage modellene presentert i dette kapitlet benyttes modulen for PetriNet i programmet GRIF. Programmet baseres på de samme prinsippene som i [NEK EN 62551 \(2012\)](#), men grafikken kan avvike noe fra det som vises i standarden. Av den grunn vil de grafiske elementene presentert i oppgaven kun vises slik de fremkommer i GRIF.

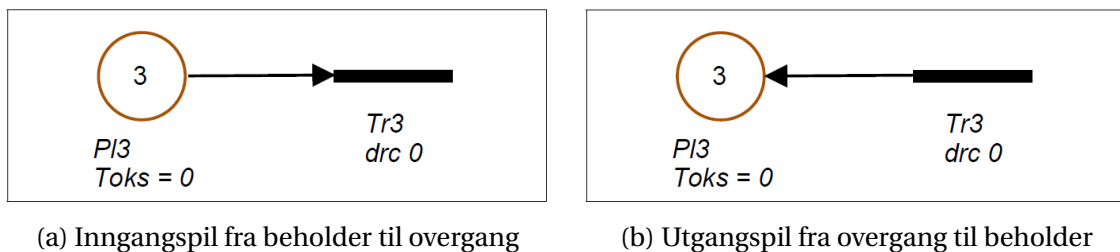
### 5.2.1 Grafiske elementer og det grunnleggende konseptet

PetriNet bygger på to hovedelementer; beholdere og overganger. I tillegg til disse benyttes polletter og piler. Ulike situasjoner og tilstander kan symboliseres ved å plassere ulike konsentrasjoner av polletter ved de forskjellige beholderne i modellen. Bruken av piler og overganger gir føringer for hvordan systemet går fra en tilstand til en annen. Figur 5.1a viser en beholder uten polletter, mens figur 5.1b viser den samme beholderen med en pollett. Figur 5.1c, 5.1d og 5.1e viser forskjellige varianter av overganger. Slike overganger har gjerne diverse kriterier som må være oppfylt. Straks de er oppfylt, regnes overgangen som aktivert. Overganger som er aktivert vil, avhengig av typen, utføre handlinger umiddelbart, eller etter bestemte eller stokastiske tidsforsinkelser. Når handlingene utføres heter det seg at overgangen kjøres.

Overganger knyttes sammen med beholdere ved hjelp av piler. Disse pilene kan vektes etter hvilket formål de har. Piler som peker fra en beholder til en overgang kalles inngangspiler (se figur 5.2a). Inngangspiler dikterer hvilke kriterier som må være oppfylt for at over-



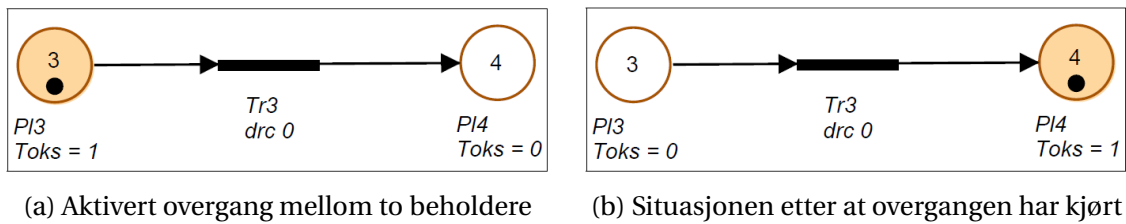
Figur 5.1: Grafiske elementer fra GRIF



Figur 5.2: Retningspiler

gangen aktiveres. Piler som peker fra en overgang til en beholder kalles utgangspiler, og sier noe om hvilke hendelser som finner sted etter at overgangen kjøres (se figur 5.2b). Beholderen en inngangspil kommer fra, kalles en inngangsbeholder. Likeledes kalles beholderen en utgangspil kommer til, en utgangsbeholder.

Vektingen av pilene forteller hvor mange polletter som påvirkes av at en overgang kjøres. Inngangspiler som vektet med positive heltall, forteller hvor mange polletter som må være til stede i beholderen pilen kommer fra for at overgangen skal være aktivert. Figur 5.1f viser en pil med vekt 1. Dette kalles en normalvektet pil. Dersom piler vektet høyere enn 1 vises vektningen midt på pilens arm, slik som i figur 5.1g. Inngangspiler kan også vektlegges med negative heltall. Figur 5.1h viser en pil med vekt -1. Dette kalles for inhibitorpiler, og tilsier



Figur 5.3: Situasjonen før og etter kjøringen av en overgang

at beholderen pilen kommer fra må inneholde mindre enn 1 pollett for at overgangen skal være aktivert. Utgangspiler kan kun vektlegges med positive heltall.

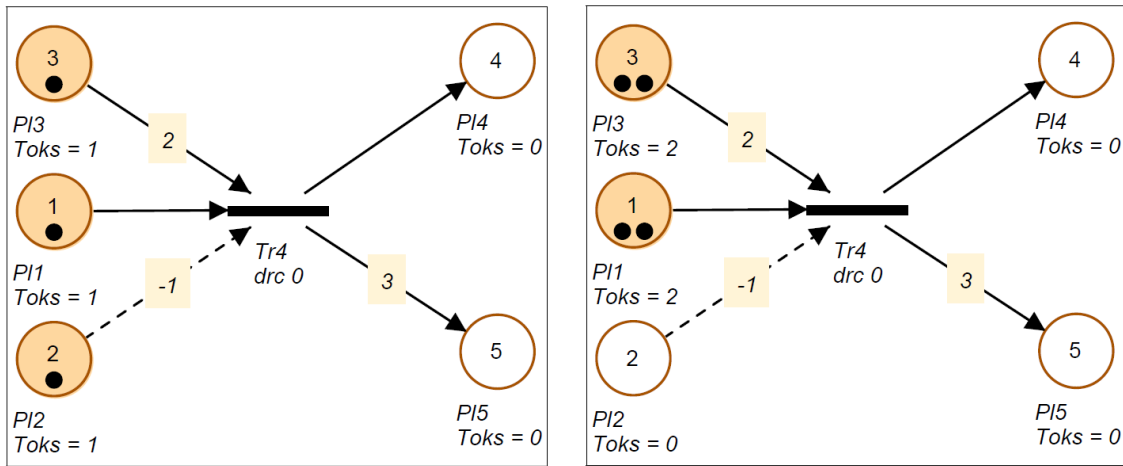
Figur 5.3 og 5.4 viser situasjoner i forkant av aktivering, og etter kjøring av overganger. Ved kjøring av overgangene vil et antall polletter tilsvarende vektingen av inngangspilene absorberes fra inngangsbeholderene. Tilsvarende vil et antall polletter tilsvarende vektingen i utgangspilene genereres i utgangsbeholderne. Dette er illustrert i figur 5.3a og 5.3b.

Figur 5.1i og 5.1j viser henholdsvis en variabel og en parameter. Variabler kan brukes som kriterier i overganger, eller til å holde styr på dynamiske verdier. Overganger kan programmeres til å endre på variabler når de kjøres. Parametre er faste verdier som brukeren av systemet definerer. Både variabler og parametre kan benyttes som kriterier for aktivering av overganger og utregning av raten overganger kjøres ved. Parametre kan i tillegg benyttes som vektning av piler.

## 5.2.2 Et enkelt eksempel på en PetriNet-modell

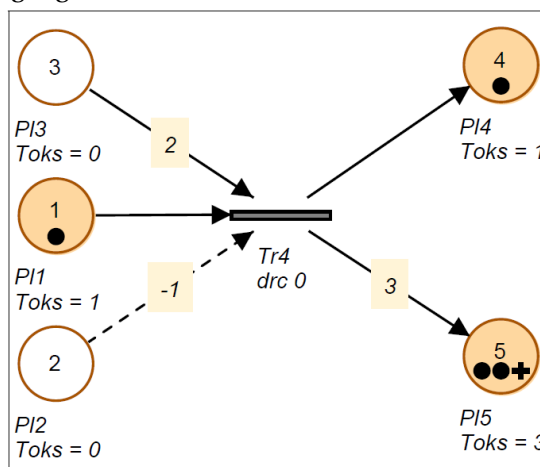
Frem til nå har eksempelfigurene inneholdt én overgang, og beholderne har enten vært en inngangsbeholder eller en utgangsbeholder. Dette trenger ikke alltid være tilfelle, som vi skal se nedenfor. Et eksempel på praktisk bruk av PetriNet er vist i figur 5.5. I 5.5a vises en maskin i drift. Dette representeres ved at beholder 1 (maskinen virker) har 1 pollett. Beholder 1 er å regne som inngangsbeholder for overgangen til høyre (svikt av maskinen). Dette er en stokastisk overgang. Den har en eksponensiell rate med  $\lambda = 0,0001/t$ . Det vil si at så lenge overgangen er aktivert (her: minst 1 pollett i beholder 1) vil den kjøres på et tilfeldig tidspunkt som er forventet å inntreffe rundt  $t = 1000$ . Dette er fordi  $MTBF = 1/\lambda$ .

Det at overgangen kjøres vil i praksis si at maskinen svikter. Den nye situasjonen er fremstilt i figur 5.5b. Her er en pollett absorbert i beholder 1, mens en pollett er generert i beholder 2. Denne endringen medfører at overgangen nedenfor (reparasjon) aktiveres, siden alle kriteriene diktert av inngangspilene er oppfylt. Overgangen er en forsinket overgang, med fast



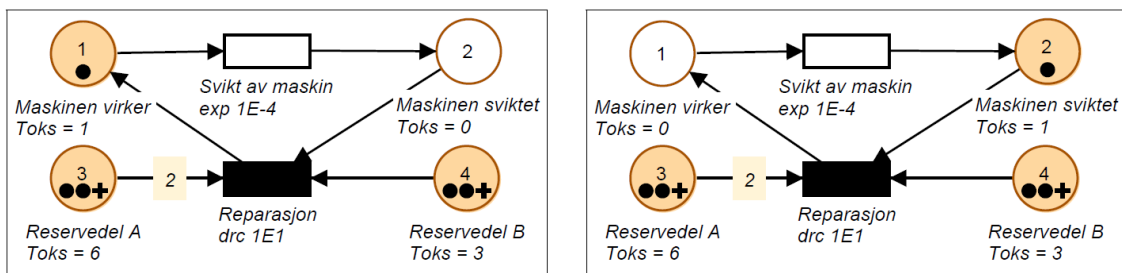
(a) Her er ikke overgangen aktivert

(b) Her er overgangen aktivert



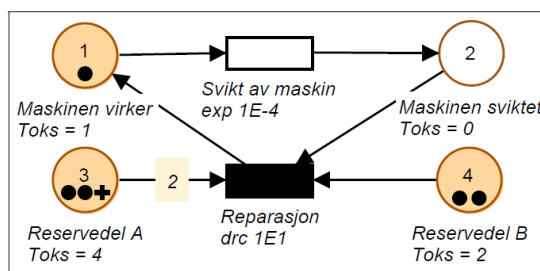
(c) Her er overgangen kjørt

Figur 5.4: Situasjonen før aktivering, ved aktivert overgang og etter kjøring av overgangen



(a) Maskinen er i drift

(b) Maskinen har sviktet



(c) Maskinen er reparert og tilbake i drift

Figur 5.5: Eksempelsituasjon

forsinkelse  $t = 10$ . Når så denne overgangen kjøres, absorberes én pollett fra beholder 2, én pollett fra beholder 4 og to polletter fra beholder 3. Dette skal symbolisere at reparasjonen av maskinen gjennomføres, og at det brukes to reservedeler av typen A og én reservedel av typen B.

### 5.3 Modell av SalMars situasjon

Formålet med å benytte PetriNet i denne sammenhengen er å kvantifisere tilgjengeligheten av utstyret i maskinparken ved InnovaMar som et resultat av valgene som tas i reservedelsproblematikken. Dette gjøres i grove trekk ved at feilraten til den enkelte reservedelen og andre nødvendige parametre plottes inn i modellen. Monte Carlo-simuleringer utføres med modellen, og resultatet benyttes videre i beregninger av PLI i kapittel 6.

Analyser med modellen gjennomføres for én type reservedel om gangen. Dette foregår ved at nødvendig informasjon og data om vedkommende del plottes inn i modellen, og driften av utstyret simuleres for et bestemt antall tidsenheter eller til en bestemt hendelse finner sted. Etter en gjennomført simulering kan man hente ut ønsket data. Dette kan for eksempel dreie seg om gjennomsnittlig antall polletter ved en bestemt beholder, eller antall kjøringar av en overgang. Modeller med stokastiske overganger kan simuleres mange ganger, og resultatet leses av til slutt som et gjennomsnitt av de ulike simuleringene. På den måten vil påvirkningen av statistiske tilfeldigheter holdes lav.

Denne fremgangsmåten er ment å kunne brukes på alle artiklene som benyttes i sløyemaskinene. I prinsippet kan noen forandringer i modellen gjøre det mulig å finne løsninger for andre maskiner i fabrikken også. Som illustrasjonseksempel vil artikkel nummer 10044 bli brukt i utregningene som følger.

#### 5.3.1 Begrensninger

##### GRIF

GRIF har to versjoner; en gratis versjon, og en fullversjon med betalt lisens. Gratisversjonen har like stor funksjonalitet som fullversjonen, men den er begrenset til maksimum 100 visuelle elementer per modell. Dette betyr at gratisversjonen av GRIF kan benyttes fullt ut, så lenge modellen er liten. Sløyemaskinene beskrevet i kapittel 2 drives parallellt. Siden det er 8 av de, medfører det at PetriNet-modellen må inneholde 8 muligheter for at maskinene svik-



ter. Ved å modellere disse mulighetene separat på en forståelig og realistisk måte kreves det mer enn 100 visuelle elementer i modellen. Siden NTNU kun har tilgang til gratisversjonen av GRIF har det blitt nødvendig å krysse og konsentrere modellen. Løsningen på denne utfordringen har vært å benytte variabler i overgangene.

### Antall artikler per reparasjon

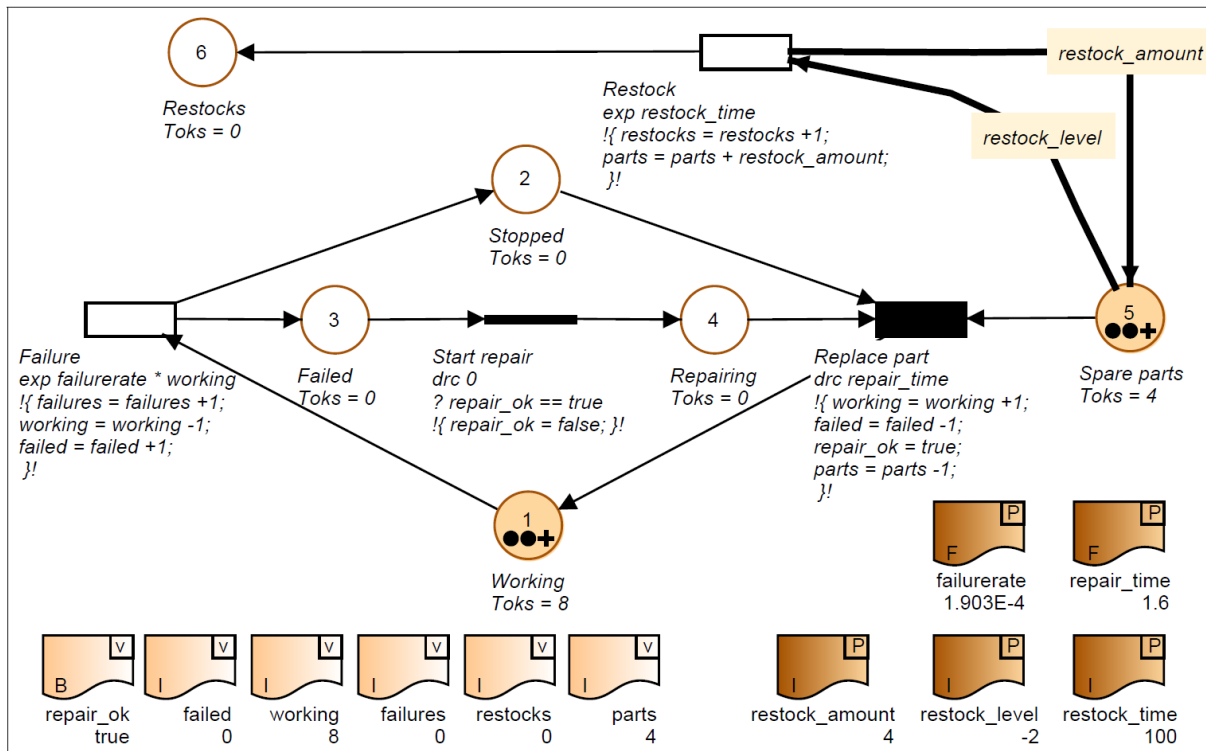
Dersom en reparasjon av maskinen alltid innebærer bytte av to eller flere like deler, selv om svikt bare har inntruffet i en av delene, kan dette være en feilkilde i simuleringen. I slike tilfeller kan det være nyttig å regne en enhet av artikkelen som det antall deler som vanligvis forbrukes ved en reparasjon. Eksempelvis betyr dette at dersom det byttes to like deler av artikkel A i reparasjoner, regnes en enhet av artikkel A for å være to like deler. Hvis konklusjonen fra simuleringene er at det lønner seg å ha 8 enheter på lager, kan dette oversettes til 8 mulige reparasjoner, eller 16 deler på lager. Slike vurderinger må gjøres av personale med innsikt i artikkelens bruksområde.

### Driftstimer

PetriNet-modellen opererer med driftstimer som tidsenhet. Det vil si at 24 timer simulerings-tid i modellen utgjør 3 skift á 8 timer per skift. Dette vil i praksis utgjøre 1,5 ukedag. Forholdet mellom driftstimer og vanlige timer kan regnes ut slik:

$$\begin{aligned} \frac{\text{Driftsår}}{\text{År}} &= \frac{1 \text{ år} \cdot 52 \frac{\text{uker}}{\text{år}} \cdot 5 \frac{\text{dager}}{\text{uke}} \cdot 2 \frac{\text{skift}}{\text{dag}} \cdot 8 \frac{\text{timer}}{\text{skift}}}{1 \text{ år} \cdot 52 \frac{\text{uker}}{\text{år}} \cdot 7 \frac{\text{dager}}{\text{uke}} \cdot 24 \frac{\text{timer}}{\text{dag}}} \\ &= \frac{4160}{8736} \\ &\approx 0,476 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Det å simulere vanlige timer i stedet for driftstimer kan implementeres i PetriNet-modellen. Likevel ble driftstimer valgt som enhet, med den hensikt å holde modellen så enkel som mulig.



Figur 5.6: Modell av sløyemaskinene og reservedelsbeholdningen ved InnovaMar

### 5.3.2 Modellen

Figur 5.6 viser en PetriNet-modell av de 8 sløyemaskinene som brukes ved InnovaMar med den tilhørende reservedelsbeholdningen. I hovedsak består modellen av to moduler. Den ene modulen beskriver maskinene som driftes normalt, svikter og repareres ved å nytte reservedeler fra lageret. Den andre modulen overvåker mengden reservedeler på lager, og bestiller flere ved behov. De ulike beholderne og overgangene i modellen er listet opp henholdsvis i tabell 5.1 og 5.2. Modellen tar også i bruk diverse variabler og parametre. Disse er listet opp i tabell 5.3 og 5.4.

### 5.3.3 Modul 1

Som det fremkommer av tabellene og figuren av modellen, er det initielt 8 maskiner i normal drift. Disse er representert med 8 polletter i beholder 1. Så lenge det er polletter i denne beholderen, er overgangen "Failure" aktivert. "Failure" er en stokastisk overgang, som gjennom en kombinasjon av parameteren "failurerate" og variabelen "working" representerer feilraten til de maskinene som til enhver tid er i normal drift. Ved kjøring av "Failure" absorberes en pollett fra beholder 1, mens det genereres en pollett i beholder 2 og 3. Beholder 2 sym-

Tabell 5.1: Beholdere i figur 5.6

<b>Beholder</b>	<b>Beskrivelse</b>	<b>Inngangsbeholder for</b>	<b>Utgangsbeholder for</b>
1 Working	Antall maskiner i normal drift	Failure	Replace part
2 Stopped	Antall maskiner ikke i drift	Replace part	Failure
3 Failed	Antall maskiner med svikt som venter på reparasjon	Start repair	Failure
4 Repairing	Antall maskiner under reparasjon	Replace part	Start repair
5 Spare parts	Antall reservedeler på lager	Replace part, Restock	Restock
6 Restocks	Antall bestillinger siden starten av simuleringen	-	Restock

Tabell 5.2: Overganger i figur 5.6

<b>Overgang</b>	<b>Beskrivelse</b>	<b>Inngangsbeholder</b>	<b>Utgangsbeholder</b>
Failure	Feilraten til maskinene i drift, m.h.t spesifikk reservedel	Working	Stopped, Failed
Start repair	Aktiveres når vedlikeholdspersonalet er tilgjengelig	Failed	Repairing
Replace part	Reparerer maskinen ved å bytte ut delen med reservedel fra lager	Stopped, Repairing, Spare parts	Working
Restock	Bestilling av ny leveranse med reservedeler	Spare parts	Spare parts, Restocks

Tabell 5.3: Variabler i figur 5.6

Variabel	Beskrivelse
repair_ok	Boolsk variabel som indikerer tilgjengeligheten av vedlikeholdspersonale
failed	Antall maskiner ute av drift
working	Antall maskiner i drift
failures	Teller antall svikt totalt
restocks	Teller antall bestillinger av reservedeler
parts	Teller antall reservedeler benyttet i reparasjoner

Tabell 5.4: Parametere i figur 5.6

Parameter	Beskrivelse
failurerate	Feilraten til maskinene grunnet en spesifikk del
repair_time	Tiden det tar å reparere maskinen ved å bytte sviktet del
restock_amount	Antall reservedeler som bestilles om gangen
restock_level	Nivået av reservedeler på lager som utløser en bestilling
restock_time	Tiden det tar fra bestilling av reservedeler til de kommer på lager

boliserer at en maskin er ute av drift. Den totale summen av polletter i beholder 1 og 2 vil alltid være 8. Beholder 3 og 4 er inkludert i modellen for å ta hensyn til at vedlikeholdsavdelingen ved InnovaMar ikke har ubegrenset kapasitet. Dersom vedlikeholdspersonalet er tilgjengelig, vil overgangen "Start repair" absorbere en pollett fra beholder 3, og generere en pollett i beholder 4. Dette aktiverer i sin tur overgangen "Replace part", som representerer at en maskin repareres ved at delen som sviktet byttes med en reservedel fra lageret. Beholder 5 viser antallet reservedeler på lager, ved at hver reservedel er representert med én pollett. Ved kjøring av "Replace part" absorberes en pollett fra beholder 2, 4 og 5, mens det genereres en pollett i beholder 1.

### 5.3.4 Modul 2

Ettersom modul 1 benytter reservedeler for å reparere maskinene, minsker antallet polletter i beholder 5. Når antallet faller under nivået definert av parameteren "restock\_level" aktiveres overgangen "Restock". Forsinkelsen i overgangen er exponentialfordelt for å ta hensyn til at leveringstid fra underleverandører kan variere fra gang til gang. Etter en forsinkelse med forventet lengde lik parameteren "restock\_time" kjøres overgangen. Det genereres da en pollett

i beholder 6 og et antall polletter i beholder 5 tilsvarende parameteren "restock\_amount".

### 5.3.5 Variabler og parametre

I figur 5.6 og i tabell 5.3 er det inkludert 6 forskjellige variabler. Av disse er 4 inkludert for lettere å kunne hente ut informasjon etter simuleringer, mens 2 er nødvendige for at modellen skal fungere. I tabell 5.4 er det også listet opp og forklart 5 parametre. Disse er spesifikke for hver enkelt reservedel, og må oppdateres av brukeren før simuleringer kan gjennomføres med modellen.

#### Sviktfrekvens

Parameteren "failurerate", som er sviktfrekvensen til én maskin grunnet én spesifikk del, er regnet ut som følger:

$$\text{failurerate}_{\text{artikkel } i} = \frac{1}{\text{MTTF}_{\text{artikkel } i}} \quad (5.2)$$

$\text{MTTF}_{\text{artikkel } i}$  er den tiden en artikkel er forventet å kunne være i drift før den svikter og må byttes. Denne verdien estimeres med data hentet fra komponentlisten presentert i avsnitt 2.5. Et utsnitt av denne listen er vist i tabell 5.5. Som det fremkommer av tabellen er det byttet 19 enheter av reservedelen med artikkelnummer 10044 fordelt på 8 sløyemaskiner i løpet av den aktuelle tidsperioden.

Tabell 5.5: Utdrag fra liste over benyttede reservedeler de siste 3 årene ved InnovaMar

AO	Beskr	StatusBeskr	UtstyrBeskr	PrioritetBeskr	TRL_PART	PAR_DESC	TRL_IO	TRL_QTY
11552	Overhaling av utkaster SL.M 1	Avsluttet	Sløyemaskin 1		10044	Cylinder , CRDSNU-25-100-P-A	-1	2
36940	Bytte sylindre utkaster SL.M 7	Avsluttet	Sløyemaskin 7	0. Akutt	10044	Cylinder , CRDSNU-25-100-P-A	-1	2
37508	feil sløye maskin nr 1	Avsluttet	Sløyemaskin 1	1. Høy - Absolutt	10044	Cylinder , CRDSNU-25-100-P-A	-1	2
44520	Byttet luftsyylinder utskyer sløyemaskin 8	Avsluttet	Sløyemaskin 8	1. Høy - Absolutt	10044	Cylinder , CRDSNU-25-100-P-A	-1	1
44525	Bytte luftsyylinder sløyemaskin 2	Avsluttet	Sløyemaskin 2	1. Høy - Absolutt	10044	Cylinder , CRDSNU-25-100-P-A	-1	1
48081	feil med sløye maskin nr 6	Avsluttet	Sløyemaskin 6	1. Høy - Absolutt	10044	Cylinder , CRDSNU-25-100-P-A	-1	2
52009	Bytte foringer/stempel utkaster SL.M 2	Avsluttet	Sløyemaskin 2	1. Høy - Absolutt	10044	Cylinder , CRDSNU-25-100-P-A	-1	2
52108	sløye maskin nr 2 snurer fisk opp ned	Avsluttet	Sløyemaskin 2	1. Høy - Absolutt	10044	Cylinder , CRDSNU-25-100-P-A	-1	2
52124	Bytte foringer og stempel utkaster SL.M 1	Avsluttet	Sløyemaskin 1	1. Høy - Absolutt	10044	Cylinder , CRDSNU-25-100-P-A	-1	2
92566	feil med utkaster i sløye maskin 3	Avsluttet	Sløyemaskin 3	1. Høy - Absolutt	10044	Cylinder , CRDSNU-25-100-P-A	-1	2
94737	Bytte cylinder på fisk utskyer. Sløyemaskin 5	Avsluttet	Sløyemaskin 5	1. Høy - Absolutt	10044	Cylinder , CRDSNU-25-100-P-A	-1	1
<b>Totalt 10044</b>								<b>19</b>

MTTF estimeres som følger:

$$\text{MTTF}_{\text{artikkel } i} = \frac{\text{Total driftstid for artikkel } i}{\text{Forbruk av artikkel } i} \quad (5.3)$$

Estimert MTTF for artikkel 10044 blir dermed:

$$\begin{aligned}
 \text{MTTF}_{\text{artikkel 10044}} &= \frac{3 \text{ år} \cdot 52 \frac{\text{uker}}{\text{år}} \cdot 5 \frac{\text{dager}}{\text{uke}} \cdot 2 \frac{\text{skift}}{\text{dag}} \cdot 8 \frac{\text{timer}}{\text{skift}} \cdot 8 \text{ maskiner}}{19 \text{ enheter}} \\
 &= 5255 \frac{\text{maskintimer}}{\text{enhet}}
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

Ved å sette formel 5.4 inn i formel 5.2 får vi at parameteren "failurerate" blir for artikkel 10044:

$$\text{failurerate}_{\text{artikkel 10044}} = 1,9030E^{-4} \frac{\text{enhet}}{\text{maskintime}}
 \tag{5.5}$$

Dersom to maskiner med samme sviktfrekvens opereres samtidig og uavhengig av hverandre, inntreffer svikt i gjennomsnitt dobbelt så hyppig som ved drift av kun én maskin. Den totale sviktfrekvensen, eller feilraten, for maskinparken med hensyn til en spesifikk del blir dermed: Feilraten for maskinpark = (antall maskiner i normal drift) · (feilrate for én maskin). I overgangen "Failure" er sviktfrekvensen = (variabelen "working" ) · (parameteren "failurerate").

Dersom annen informasjon om sviktfrekvensen til artikkene er tilgjengelige, kan disse også benyttes i tillegg til, eller i stedet for, verdien estimert ovenfor. På nettsiden til [ROSS Gemini Centre](#) står en utfyllende liste over kilder til pålitelighetsdata. Det er hensiktsmessig å benytte pålitelighetsdata med det mest troverdige opphavet.

## Forbrukt tid

Parameteren "repair\_time" er hvor lang tid det tar å sette en maskin tilbake i drift etter at svikt har inntruffet. Verdien gjelder kun ved svikt i den bestemte delen modellen fokuserer på, så både "repair\_time" og "failurerate" må være estimert for samme artikkel. Listen over medgått arbeidstid fra seksjon 2.5 er sortert etter arbeidsordre (AO). For å estimere tiden det tar å reparere maskinen ved svikt må en vurdere arbeidsordrene i tabell 5.5. Arbeidstiden i de relevante arbeidsordrene er hentet ut fra listen, og samlet i tabell 5.6.

Som det fremkommer av tabellen er det medgått totalt 17 arbeidstimer på 11 arbeidsordre med bytte av artikkel 10044. Dette gir gjennomsnittlig 1,6 timer arbeidstid per havari grunnet denne artikkelen.

Tabell 5.6: Medgått tid til bytte av artikkel 10044

AO	Beskr	StatusBeskr	UtstyrBeskr	PrioritetBeskr	BOO_HOURS	BOO_RATE	BOO_COST
11552	Overhaling av utkaster SL.M 1	Avsluttet	Sløyemaskin 1		2.5	350	875
<b>Totalt 11552</b>					2.5		875
36940	Bytte sylindre utkaster SL.M 7	Avsluttet	Sløyemaskin 7	0. Akutt	0.75	350	262.5
<b>Totalt 36940</b>					0.75		262.5
37508	feil sløye maskin nr 1	Avsluttet	Sløyemaskin 1	1. Høy - Absolutt ti	1	350	350
37508	feil sløye maskin nr 1	Avsluttet	Sløyemaskin 1	1. Høy - Absolutt ti	1	350	350
<b>Totalt 37508</b>					2		700
44520	Byttet luftsylander utskyver sløyemaskin 8	Avsluttet	Sløyemaskin 8	1. Høy - Absolutt ti	1	350	350
<b>Totalt 44520</b>					1		350
44525	Bytte luftsylander sløyemaskin 2	Avsluttet	Sløyemaskin 2	1. Høy - Absolutt ti	0.75	350	262.5
<b>Totalt 44525</b>					0.75		262.5
48081	feil med sløye maskin nr 6	Avsluttet	Sløyemaskin 6	1. Høy - Absolutt ti	1.5	350	525
<b>Totalt 48081</b>					1.5		525
52009	Bytte foringer/stempel utkaster SL.M 2	Avsluttet	Sløyemaskin 2	1. Høy - Absolutt ti	1	350	350
52009	Bytte foringer/stempel utkaster SL.M 2	Avsluttet	Sløyemaskin 2	1. Høy - Absolutt ti	2	350	700
<b>Totalt 52009</b>					3		1050
52108	sløye maskin nr 2 snurer fisk opp ned	Avsluttet	Sløyemaskin 2	1. Høy - Absolutt ti	1	350	350
<b>Totalt 52108</b>					1		350
52124	Bytte foringer og stempel utkaster SL.M 1	Avsluttet	Sløyemaskin 1	1. Høy - Absolutt ti	1	350	350
52124	Bytte foringer og stempel utkaster SL.M 1	Avsluttet	Sløyemaskin 1	1. Høy - Absolutt ti	2	350	700
<b>Totalt 52124</b>					3		1050
92566	feil med utkaster i sløye maskin 3	Avsluttet	Sløyemaskin 3	1. Høy - Absolutt ti	1.5	350	525
<b>Totalt 92566</b>					1.5		525
94737	Bytte cylinder på fisk utskyver. Sløyemaskin 5	Avsluttet	Sløyemaskin 5	1. Høy - Absolutt ti	0.5	350	175
<b>Totalt 94737</b>					0.5		175
<b>Totalt alle AO</b>					<b>17.5</b>	<b>Gjennomsnittlig per AO</b>	<b>1.6</b>

## Leveringstid

Parameteren "restock\_time" er antall timer det tar fra nye artikler bestilles til de er på plass på lageret. Denne kan variere stort fra artikkel til artikkel, og fra leverandør til leverandør. I PetriNet-modellen er det driftstimer som er enheten. Det er derfor viktig at "restock\_time" er oppgitt i antall driftstimer. Dersom leveringstiden fra leverandøren er oppgitt til 3 dager, tilsvarer dette  $3 \text{ dager} \cdot 2 \frac{\text{skift}}{\text{dag}} \cdot 8 \frac{\text{timer}}{\text{skift}} = 48 \text{ driftstimer}$ . For artikkel 10044 vil 48 driftstimer bli brukt som leveringstid fra leverandør.

## Lagerbeholdning og etterbestillingsnivå

De to siste parameterene "restock\_amount" og "restock\_level" er verdiene simuleringene skal finne frem til. Hvordan dette utføres forklares i kapittel 6. I hovedsak går det ut på å gjennomføre simuleringer med ulike verdier av disse parameterene, og se hvilke verdier som gir det mest ønskelige resultatet.

## 5.4 Simulering

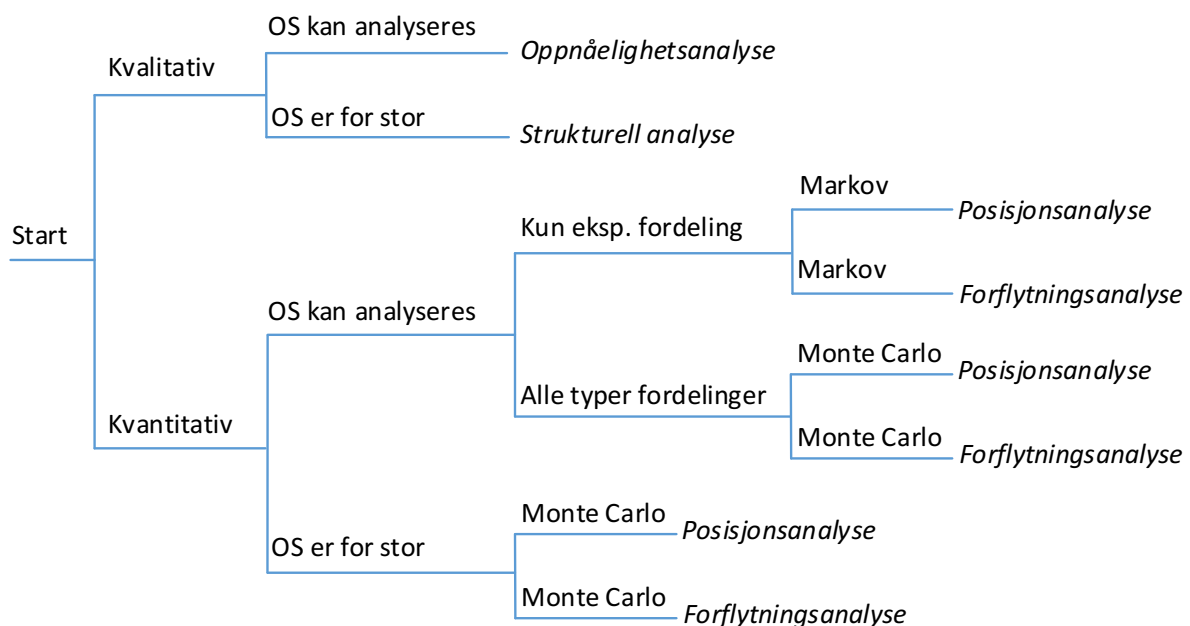
Det er flere typer analyser som kan gjennomføres med PetriNet. Figur 5.7 viser ulike typer analyser, og hvordan valget av analysemetode henger sammen med ønsket resultat og hva

slags type PetriNet som skal analyseres. I følge [NEK EN 62551 \(2012\)](#) er kvalitative analyser egnet for spørsmål som f.eks:

- Kan en spesifikk tilstand oppnås i denne modellen?
- Er det mulig at en spesifikk hendelse finner sted?

Kvantitative analyser er i følge den samme standarden egnet for å kvantifisere tilgjengeligheten av et system. Det blir dermed en kvantitativ analysemetode som er mest relevant i denne oppgaven.

Det neste spørsmålet er om det er mulig å lage et oppnåelighets skjema (OS), eller om det ville inneholde for mange punkter. Et OS er en liste over alle mulige tilstander som kan nås fra en initiell tilstand i modellen. Dersom dette er tilfelle, er neste spørsmål om modellen kun inneholder eksponensielle fordelinger. I så fall kan PetriNet-modellen omformes til en Markov-kjede, og resultatet kan regnes ut. I tilfellet for InnovaMar er det ønskelig at analysen på en enkel måte skal kunne replikeres med små forandringer i parametrene, og eventuelt i selve modellen. Det blir derfor mest aktuelt å benytte den svært anvendbare siste metoden som fremkommer av figur 5.7, nærmere bestemt; Monte Carlo-simuleringer. I [NEK EN 62551 \(2012\)](#) skilles det mellom posisjonsanalyse og forflytningsanalyse, men i kapittel 6 benyttes elementer fra begge disse metodene.



Figur 5.7: Analytiske metoder for PetriNet-modeller. Adoptert av [NEK EN 62551 \(2012\)](#).



### 5.4.1 Monte Carlo

Metoden i Monte Carlo-simuleringer går ut på å benytte tall fra en tilfeldighetsgenerator for å finne estimerte svar på matematiske problemstillinger (NEK EN 62551, 2012). Løsningen finner man ved å simulere tidens løp i modellen, frem til et forhåndsbestemt tidspunkt eller en gitt begivenhet finner sted. Statistiske data (som blant annet gjennomsnittlig antall polletter i de ulike beholderne, antall polletter i beholderne ved gjennomføringens slutt og antall kjøring av overganger) registreres, og prosessen starter på nytt. Dette gjentas et stort antall ganger før sluttresultatet presenteres som et gjennomsnitt av gjennomføringene i simuleringen.

For å bestemme hvor mange gjennomføringer som trengs for modellen i figur 5.6, har det blitt foretatt simuleringer med økende størrelse, og resultatene ble sammenlignet i tabell 5.7. Lengden på hver gjennomføring er satt til 41 600 timer, noe som tilsvarer 10 års drift med gjennomsnittlig 2 skift om dagen, 5 dager i uka.

Tabell 5.7: Antall gjennomføringer per simulering

Gjennomføringer	1E+00	1E+01	1E+02	1E+03	1E+04	1E+05	1E+06	1E+07
<b>Working</b>	7,9961	7,9965	7,9965	7,9966	7,9966	7,9966	7,9966	7,9966
<b>Stopped</b>	0,0039	0,0035	0,0035	0,0034	0,0034	0,0034	0,0034	0,0034
<b>Failed</b>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Repairing</b>	0,0039	0,0035	0,0035	0,0034	0,0034	0,0034	0,0034	0,0034
<b>Spare parts</b>	3,1457	3,3275	3,3703	3,3681	3,3647	3,3626	3,3627	3,3627
<b>Restocks</b>	7,3735	7,1028	6,9589	6,7692	6,7969	6,7931	6,7928	6,7942

Som det fremkommer av tabellen, øker antall gjennomføringer med en faktor på 10 for hver kolonne mot høyre. Verdiene som vises er gjennomsnittlig antall polletter ved hver beholder i simuleringstiden. Forskjellene på kolonnene viser hvor utsatt for statistiske tilfeldigheter resultatene er. Det viser seg at "Restocks" er beholderen som endres mest ved økende antall gjennomføringer. Likevel viser det seg at med  $10^5$  gjennomføringer eller flere er resultatene stabile med minst to desimalers nøyaktighet. Simuleringene utføres derfor med minst  $10^5$  gjennomføringer for å begrense påvirkningen av tilfeldigheter i resultatene.

### 5.4.2 Resultat

Dagens praksis ved InnovaMars hovedlager er å bestille 6 enheter når lagerbeholdning viser 3 gjenstående enheter av artikkel 10044 (SalMar, 2015). I PetriNet-modellen tilsvarer dette at

parameterene "restock\_amount" og "restock\_level" er henholdsvis 6 og -4. Med disse verdiene i modellen, gir en Monte Carlo-simulering resultatet som er vist i tabell 5.8.

Tabell 5.8: "restock\_amount" = 6, "restock\_level" = -4

Name	Number	Sojourn Time	Average token number	Token number at end
Working	1	41600	7.997862776	7.99787
Stopped	2	88.81269254	0.002137224	0.00213
Failed	3	0.095734366	2.30E-06	0
Repairing	4	88.81269254	0.00213492	0.00213
Spare parts	5	41600	6.512718725	6.49455
Restocks	6	40941.11094	5.055166438	9.6669

Verdiene fra denne tabellen som skal benyttes videre i kapittel 6 er gjennomsnittlig antall polletter (Average token number) i beholder 2, og antall polletter ved slutten av simuleringene (Token number at end) i beholder 6. Disse tallene forteller henholdsvis hvor lenge maskinene var ute av drift i simuleringsperioden, og hvor mange etterbestillinger av artikkel 10044 som fant sted.

For at disse verdiene skal tilføre nyttig informasjon i neste kapittel, er det viktig at det finnes et sammenligningsgrunnlag. Monte Carlo-simuleringen blir derfor gjennomført flere ganger, med andre verdier i de to parameterene "restock\_amount" og "restock\_level". Informasjonen fra simuleringene som benyttes videre i kapittel 6 er sammenfattet i tabell 5.9.

Tabell 5.9: Varianter av parameterene "restock\_amount" og "restock\_level"

Restock amount	Restock level	Avg token nr (2)	Avg token nr (5)	Token at end (6)
1	1	0.002137701	1.101625824	52.51826
2	1	0.002137073	1.570660156	26.50071
3	1	0.002138122	2.043795891	17.84337
4	1	0.002136914	2.520369687	13.50031
5	1	0.002137122	2.998528993	10.89994
6	1	0.002138098	3.47896812	9.17189
7	1	0.002137708	3.963505722	7.93224
8	1	0.00213787	4.453047345	7.00326
9	1	0.002137914	4.941540495	6.27833
10	1	0.00213749	5.434442014	5.70233
1	2	0.002137313	2.049694452	53.5082
2	2	0.002136869	2.528217974	26.9984
3	2	0.002138477	3.010015281	18.18055
4	2	0.002137436	3.49479541	13.75313
5	2	0.002137698	3.981401227	11.10447
6	2	0.002137707	4.472308775	9.33595
7	2	0.002137693	4.966427886	8.07518
8	2	0.002137371	5.463857114	7.12626
9	2	0.002137493	5.962300072	6.38904
10	2	0.002136879	6.464803419	5.79925
1	3	0.002137813	3.015813575	54.52189
2	3	0.002137802	3.503787224	27.51041
3	3	0.002137717	3.994150321	18.50611
4	3	0.002137492	4.487703558	14.00295
5	3	0.002137554	4.984817948	11.30231
6	3	0.002137428	5.482802327	9.50221
7	3	0.002137071	5.986112097	8.21503
8	3	0.002137487	6.492263619	7.25154
9	3	0.002137769	7.002193514	6.50299
10	3	0.002137555	7.511833956	5.90305
1	4	0.00213757	3.999972202	55.51588
2	4	0.002136712	4.497035672	27.99649
3	4	0.002137559	4.996151892	18.83946
4	4	0.002137482	5.498654959	14.25267
5	4	0.002138123	6.004517451	11.50679
6	4	0.002137224	6.512718725	9.6669
7	4	0.002137172	7.024710662	8.35768
8	4	0.002137643	7.539514098	7.3775
9	4	0.002137692	8.057733692	6.61508
10	4	0.002137948	8.577649836	6.00267
1	5	0.002138672	4.999971669	56.54356
2	5	0.00213726	5.503658674	28.50365
3	5	0.002136954	6.009858157	19.1669
4	5	0.002137354	6.518752747	14.50351
5	5	0.002136682	7.031239453	11.69865
6	5	0.002137183	7.54793687	9.83501
7	5	0.002137435	8.0653357	8.50199
8	5	0.002137237	8.586620085	7.50099
9	5	0.002137541	9.110910811	6.72401
10	5	0.002137553	9.640503407	6.10292



# Kapittel 6

## PLI

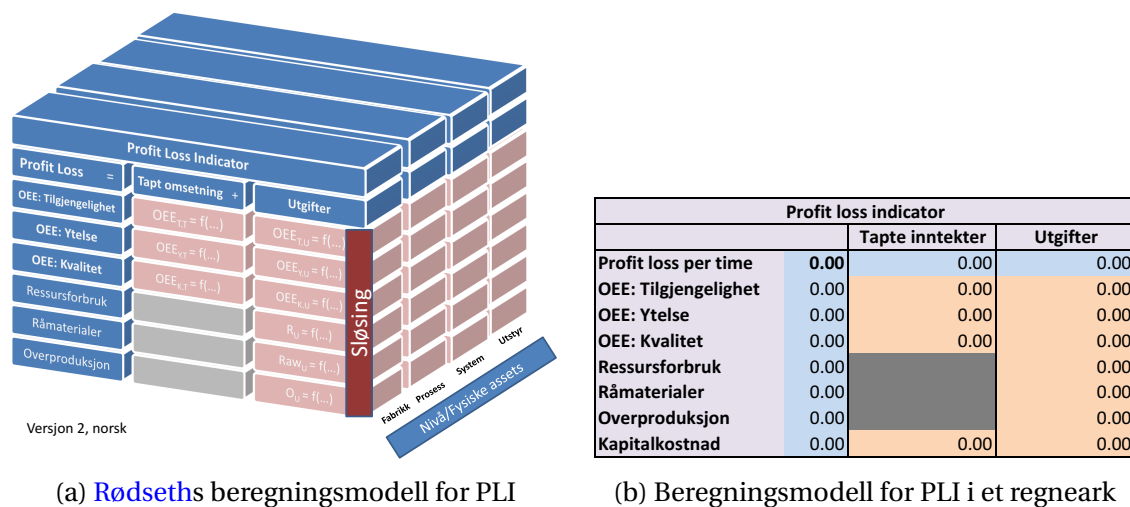
### 6.1 Fremgangsmåte del 2

Dette er andre del av metoden som benytter PetriNet-modellen og beregninger av PLI-verdier for å finne gode reservedelsstrategier. I denne listen presenteres fremgangsmåten for å beregne PLI-verdier på bakgrunn av blant annet simuleringene med PetriNet-modellen. Listen er kun et supplement til forklaringen i resten av kapittelet, og har til hensikt å tydeliggjøre stegene i prosessen.

6. Beregne PLI for hver potensielle reservedelstrategi. Resultatene fra første del av fremgangsmåten fremstår i tabell 5.9. Denne informasjonen skal nå regnes om til PLI-verdier. Radene i tabellen gjenspeiler en variant av reservedelstrategien for artikkelen som ble valgt i steg 1. Kolonnene i tabellen er verdier fra Monte Carlo-simuleringene. Disse benyttes til hver sin utregning av de ulike verdiene i beregningsmodellen for PLI.
7. Sammenligne PLI-verdiene for de ulike reservedelstrategiene. Selve utregningen av PLI-verdiene foregår i et regneark. Dataene fra tabell 5.9 og 6.1 mates direkte inn i formlene i regnearket, og PLI-verdiene skrives ut i en kolonne. Den mest lønnsomme reservedelstrategien for artikkelen vil være den som har lavest PLI-verdi.
8. Kvalitetssikre resultatet fra metoden. Valg av reservedelstrategi kan påvirkes av andre faktorer som ikke lar seg inkludere i modellen. Etter at metoden har funnet et lokalt minimum av PLI-verdiene, kan det være lurt å manuelt vurdere om strategien er praktisk gjennomførbar.

## 6.2 Beregning av PLI

Verdiene fra tabell 5.9 i avsnitt 5.4 inneholder nyttig informasjon om tilgjengeligheten av sløyemaskinene, men det er ikke så lett å ta i bruk informasjonen slik den er fremstilt. For å kunne sammenligne de ulike radene i tabellen, må man ta hensyn til verdien i hver kolonne. Dette kan være vanskelig, siden kolonnene i tabellen har forskjellige enheter. Det er her beregningsmodellen for PLI (se figur 4.3) kommer til nytte. For å kunne sammenligne effekten av ulike reservedelsstrategier på en lettfattelig måte, kan kolonnene regnes om til en felles enhet og samles i én verdi.



Figur 6.1: Beregningsmodell for PLI i regneark

Figur 6.1 viser hvordan beregningsmodellen for PLI fra kapittel 4 kan utformes i et regneark. De røde feltene i 6.1b beregnes individuelt. De blå feltene i kolonnen til venstre summerer utgiftene og de tapte inntektene i de røde feltene. Det blå feltet øverst til venstre er totalsummen som viser tapt fortjeneste per time. Enheten i hver av feltene er kroner per time. Den nederste raden i figuren er lagt til for å kunne inkludere kostnadene ved å eie et lager av reservedeler. Dette forklares videre i avsnitt 6.2.1.

### Absolutt eller relativ PLI

Det å kunne finne absoluttverdien av tapt fortjeneste for et system, en prosess eller hele fabrikk kan i seg selv være nyttig. Dette er tidligere nevnt i kapittel 4. For å kunne finne en god strategi rundt reservedelsproblematikken, derimot, er det ikke nødvendig å gå så kraftig til verks. For å kunne sammenligne de ulike strategiene i tabell 5.9 er det kun nødvendig å se på differansen i PLI-verdi mellom dem. Den relative PLI-verdien vil derfor kun bestå av tall

fra de røde feltene i figur 6.1 som påvirkes når reservedelsstrategien endres.

### 6.2.1 Beregning av de ulike verdiene i modellen

Her vil de ulike radene i figur 6.1b forklares. Detaljer for utregning av verdiene blir gjennomgått. Variabler og konstanter som benyttes i utregningene er listet i tabell 6.1. For å kunne summere de ulike verdiene som utgjør PLI for systemet må de ha samme enhet. Enheten som er valgt er kroner per time. For enkelte artikler vil det muligens være mer intuitivt å benytte kroner per måned, eller kroner per år. Kroner per time er valgt fordi den har en kort nok tidshorisont til å kunne benyttes for alle artikler, uavhengig av forventet levetid.

Tabell 6.1: Variabler som benyttes i utregning av PLI. De orange feltene representerer antagelser uten begrunnelse. Disse verdiene er tatt med i tabellen for å benyttes som eksempler i utregninger senere.

<b>Konstanter [enhet]</b>	<b>Antall</b>
Driftstimer per år [t/år]	4160
Timekostnad stopptid [kr/t]	10000
WACC [/år]	5 %
Redusert tilgjengelighet per maskin uten drift	0.125
<b>Vedrørende artikkel 10044 [enhet]</b>	<b>Antall</b>
Verdi av artikkel [kr/stk]	1158,79
Gebyr bestilling og frakt [kr/bestilling]	200
<b>Vedrørende simuleringen [enhet]</b>	<b>Antall</b>
Timer simulert [t]	41600
Gjennomsnittlig lagerbeholdning	verdi fra tabell 5.9
Gjennomsnittlig antall maskiner uten drift per time	verdi fra tabell 5.9
Bestillinger av reservedeler	verdi fra tabell 5.9

#### **OEE**<sub>Tilgjengelighet</sub>

Denne verdien symboliserer tapt fortjeneste som oppstår fordi maskinene i systemet er ute av drift. Ved full stopp av maskinene i slakteriet regner SalMar med en utgift på 10 000 kroner per time. Pollettene i beholder 2 i PetriNet-modellen representerer maskiner ute av drift. I tabell 5.8 er gjennomsnittlig antall polletter i beholder 2 oppgitt til 0.002137224. Én pollett tilsvarer én maskin. Det er tilsammen 8 maskiner i parallell kobling, noe som medfører at én maskin ute av drift tilsvarer at tilgjengeligheten blir redusert med  $\frac{1}{8}$ . Utregningen blir dermed som følger:

$$OEE_{\text{Tilgjengelighet}} = 0.002137224 \cdot \frac{1}{8} \cdot 10000 \frac{\text{kr}}{\text{time}} = 2.671530084 \frac{\text{kr}}{\text{time}} \quad (6.1)$$

Så lenge de nødvendige artiklene er på lager, vil  $OEE_{\text{Tilgjengelighet}}$  i hovedsak kunne tilskrives tiden det tar å reparere maskinene ved å bytte ut de defekte delene. Dette er en verdi som øker kraftig i de tilfellene hvor det er behov for en reservedel uten at det er noen tilgjengelige på lager. Høyere sviktfrekvens vil derfor trekke opp antallet reservedeler det anbefales å ha på lager, nettopp for å minske risikoen for at et slikt udekket behov skal oppstå.

### Kapitalkostnad

Der  $OEE_{\text{Tilgjengelighet}}$  trekker antall reservedeler opp, vil denne verdien trekke antallet ned. Kapitalkostnad er den tapte fortjenesten bedriften kunne oppnådd ved å benytte kapitalen som er bundet opp i reservedelslageret til andre formål. Oppbundet kapital er produktet av gjennomsnittlig antall artikler på lager og prisen per artikkel. Kostnadene ved denne kapitalen finnes så ved å gange den med bedriftens vektete gjennomsnittlige kapitalkostnad (WACC). Beregning av bedriftens WACC ligger utenfor masteroppgavens omfang, men for å kunne benytte verdien i eksempler er den satt til 5%. I tabell 5.8 er gjennomsnittlig antall polletter i beholder 5 oppgitt til 6.512718725. Siste pris på artikkel 10044 er i følge SalMar (2015) 1158,79 kr. Dette gir følgende utregning:

$$\text{Kapitalkostnad} = \frac{6.512718725 \text{ artikler} \cdot 1158,79 \frac{\text{kr}}{\text{artikkel}} \cdot 5 \frac{\%}{\text{år}}}{4160 \frac{\text{driftstimer}}{\text{år}}} = 0.090707612 \frac{\text{kr}}{\text{time}} \quad (6.2)$$

### Utvalgte ressurser

$OEE_{\text{Tilgjengelighet}}$  trekker antall reservedeler opp, kapitalkostnad trekker antall reservedeler ned, mens ressursforbruket vil i hovedsak ha innflytelse over hvor mange reservedeler som bestilles fra leverandøren om gangen. Denne verdien består av kostnadene når man bestiller artikler. Tabell 5.8 viser at antall polletter i slutten av simuleringen i beholder 6 i gjennomsnitt er 9.6669. Det betyr at det forventes at etterbestillinger utføres 9.6669 ganger i løpet av simuleringsperioden på 10 år, eller ca. 1 gang i året. Dette stemmer bra med loggen i Infor EAM, som oppgir at forsendelser av artikkel 10044 er mottatt 3 ganger siden datainnsamlingen startet. Prisen på bestillingsgebyret og frakten av varene er antatt å være uavhengig av antall varer som bestilles. I tillegg kommer arbeidstidene som medgår til bestilling og mot-



tak av varer for lageransatte. For eksempelutregningen er det antatt en total kostnad på 200 kr per etterbestilling av varer. Utregningen blir som følger:

$$\text{Ressursforbruk} = \frac{9.6669 \text{ bestillinger} \cdot 200 \frac{\text{kr}}{\text{bestilling}}}{41600 \text{ driftstimer}} = 0.046475481 \frac{\text{kr}}{\text{time}} \quad (6.3)$$

### Totalt

OEE<sub>Tilgjengelighet</sub>, kapitalkostnad og ressursforbruk er nå regnet ut hver for seg. De andre feltene fra figur 6.1 vil ikke endres ved å variere etterbestillingsnivå og etterbestillingsantall, og vil ikke utgjøre noen forskjell i den relative PLI-verdien. Disse feltene vil derfor kunne neglisjeres. PLI for artikkel 10044 med verdier fra tabell 5.8 blir dermed:

$$\begin{aligned} \text{PLI}_{10044} &= \text{OEE}_{\text{Tilgjengelighet}} + \text{Kapitalkostnad} + \text{Ressursforbruk} \\ &= 2.671530084 \frac{\text{kr}}{\text{time}} + 0.090707612 \frac{\text{kr}}{\text{time}} + 0.046475481 \frac{\text{kr}}{\text{time}} \\ &= 2.808713177 \frac{\text{kr}}{\text{time}} \\ &\approx 2.80871 \frac{\text{kr}}{\text{time}} \end{aligned} \quad (6.4)$$

## 6.3 Sammenligning av strategier og belutningstaking

Den samme utregning som ble gjort ovenfor kan videre gjennomføres med alle verdiene i tabell 5.9. Resultatet en sitter igjen med kan arrangeres slik som vist i tabell 6.2. Den blå ruten viser gjeldende praksis, mens den grønne ruten viser lavest mulige PLI-verdi blant variantene. Den grønne ruten tilsvarende en strategi hvor etterbestilling av 6 enheter finner sted når lagerbeholdningen er tom. Dette er på ingen måte en fasit for artikkel 10044, siden mange av tallverdiene fra tabell 6.1 som benyttes i utregningene er ubegrunnede gjetninger. Likevel tjener resultatet det formål at det viser fremgangsmåten i metoden for å finne riktig strategi.

Differansen mellom den blå og den grønne verdien utgjør den potensielle besparelsen ved å bytte strategi. For artikkel 10044 er differansen  $2.80871 \frac{\text{kr}}{\text{time}} - 2.76517 \frac{\text{kr}}{\text{time}} = 0.04354 \frac{\text{kr}}{\text{time}}$ , noe som utgjør omlag 181 kr besparelse i året i dette eksempelet.

Tabell 6.2: PLI for variantene i tabell 5.9

Restock level	-1	-2	-3	-4	-5
Restock amount					
1	2.93996	2.95744	2.97639	2.99458	3.01482
2	2.82062	2.83610	2.85331	2.86812	2.88527
3	2.78690	2.80243	2.81675	2.83211	2.84704
4	2.77115	2.78659	2.80169	2.81696	2.83221
5	2.76557	2.78096	2.79571	2.81160	2.82503
6	2.76517	2.77931	2.79383	2.80871	2.82389
7	2.76547	2.78011	2.79421	2.80948	2.82500
8	2.76803	2.78207	2.79714	2.81253	2.82720
9	2.77140	2.78562	2.80100	2.81614	2.83115
10	2.77497	2.78902	2.80495	2.82076	2.83555

## 6.4 Styrker og svakheter ved metoden

Enkelte faktorer som kan påvirke valg av strategi kan være vanskelige å kvantifisere i kroner per tid. Et eksempel på dette kan være risikoaversjon. Dette uttrykket betyr at man tenderer til å velge løsninger med lavest mulig risiko, selv om andre alternativer, rent logisk kan gi høyere forventet avkastning. Dette stemmer overens med sitatet fra Ole Meland om at det er "*lett å bli feig*" i valg av reservedelstrategi, noe som fører til at det er flere deler på lager enn det som er økonomisk optimalt. Metoden presentert i denne masteroppgaven tar ikke hensyn til slike preferanser.

PetriNet-modellen forutsetter at det skal være flere enn null enheter på lager. Kanskje er den optimale løsningen ikke å ha artikkelen på lager, men heller bestille de direkte fra leverandøren når behovet melder seg. I så fall vil ikke PetriNet-modellen, slik den er nå, kunne finne denne strategien. Det mest nærliggende alternativet metoden kan finne, er å bestille 1 enhet når den som er på lager benyttes. Modellen kan imidlertid endres slik at problemet kan løses. Det gjøres ved å sette etterbestillingsnivå lik 0, og samtidig legge inn en begrensning i overgangen "Restock", som går ut på at overgangen kunn kan aktiveres når det er en pollett i beholder 4.

Modellene og metoden knyttet til disse tar ikke hensyn til forebyggende vedlikehold. Dersom vanlig praksis ved forebyggende vedlikehold for en maskin er å bytte ut en slitedel, registreres dette som forbruk av denne artikkelen på lageret. Dette vil påvirke estimatet av sviktfrekvensen for artikkelen. I Infor EAM kan aktiviteter registreres som forebyggende vedlikehold eller korrigerende vedlikehold. I informasjonen hentet ut gjennom Access kan

slike datapunkt sorteres ut, slik at listen kun inneholder den ene eller den andre typen vedlikeholdsaktiviteter. Ved å unnlate å ta med forebyggende vedlikeholdsaktiviteter på denne listen kan man gjøre estimeringen av lagerartikkelforbruket på grunn av uforutsett svikt mer presist. En slik tilnærming fører imidlertid til at deler til de forebyggende vedlikeholdsaktivitetene, og deler til å ha i lagerbeholdningen, må bestilles separat. Årsaken til dette er at estimert forbruk av deler i PetriNet-modellen ikke omfatter delene som går med til forebyggende vedlikehold. Resultatet er at forebyggende vedlikehold vil være en feilkilde til denne metoden, med mindre modellen utvides til å omfatte forebyggende vedlikehold og tilfeldig svikt av enhetene parallellt.

Metoden tar ikke hensyn til degradering av artikler på reservedelslageret, eller risikoen for å sitte igjen med foreldede deler.



# Kapittel 7

## Oppsummering og konklusjon

### 7.1 Oppsummering og konklusjon

SalMar er et fullt ut vertikalt integrert oppdrettskonsern, med virksomhet i hele verdikjeden innen oppdrettslaks. Virksomhetsområdene er settefiskproduksjon, oppdrett, slakting og foredling, samt salg og distribusjon. Slakting og foredling foregår ved InnovaMar, som er et slakteri lokalisert på Frøya i Sør-Trøndelag. Første målsetning i denne masteroppgaven er å beskrive sløyemaskinens posisjon i fiskeforedlingsprosessen ved InnovaMar. Dette er gjort i kapittel 2 ved først å beskrive SalMars virksomhetsområder, for videre å beskrive slaktelinja og sløyeprosessen i større detalj. Sløyemaskinene er en sentral del av SalMars virksomhet, siden hele verdikjeden går gjennom dette leddet i fabrikk før varene selges til kunder.

Den andre målsetningen er å beskrive reservedelsproblematikken for sløyemaskiner. Dette er gjort ved å gjennomgå teori rundt vedlikeholdstyring og reservedelstyring i kapittel 3. Oppetid og tilgjengelighet av utstyret i maskinparken er viktige faktorer for å opprettholde verdiskapning og unngå tap i slakteprosessen. Tilgang på riktig kunnskap, verktøy og ressurser er nødvendig for å sikre høy grad av tilgjengelighet i maskinene. God tilgang på reservedeler er spesielt viktig for sløyemaskinene, siden de består av spesialiserte og unike deler, og driver en stor del av bedriftens verdiskapning. Store reservedelslager fører med seg høye investerings- og driftskostnader. Det er derfor viktig å finne balansen i antall reservedeler; punktet hvor fordelene av flere reservedeler er i likevekt med kostnadene av å skaffe og eie disse delene.

Målsetning nummer tre er å diskutere PetriNet-modeller og PLI-beregninger som beslutningsunderlag i reservedelsproblematikk. Dette gjøres delvis i kapittel 4 og delvis i kapittel 5.

I kapittel 5 presenteres PetriNet-metoden og oppbyggingen av en PetriNet-modell. I kapittel 4 introduseres en beregningsmodell for PLI. Beregningsmodellen blir videre forklart i kapittel 6. PetriNet-modeller er en relativt enkel og fleksibel metode for å simulere effekten av reservedelsstrategier for et system. Resultatene fra simuleringer av PetriNet-modellen kombinert med beregningsmodell for PLI gir en intuitiv og oversiktlig metode for å sammenligne ulike strategier for reservedelsbeholdninger. Det endelige resultatet er i enheten kroner per tid, noe som gir en godt underlag for å fatte beslutninger om strategier.

Den fjerde målsetningen er å anvende PetriNet-teori på sløyemaskiner for å simulere tilgjengeligheten ved ulike beholdninger av reservedeler. Dette er utført i delkapittel 5.3 og 5.4 for én bestemt lagerartikkel, for å illustrere stegene i metoden. Resultatet av simuleringene er gitt i tabell 5.9.

Den femte og siste målsetningen er å presentere en metode for å bestemme antall reservedeler der er nødvendig for SalMar AS å ha på lager for sløyemaskinene ved InnovaMar. Dette er gjort ved å demonstrere metoden i kapittel 5 og 6. I korte trekk går metoden ut på først å hente historiske data fra vedlikeholdsprogrammet Infor EAM som benyttes av SalMar. Dataene benyttes deretter til å estimere sviktfrekvens og reparasjonstid, som plottes inn som parametere i PetriNet-modellen av sløyemaskinene. Monte Carlo-simuleringer med modellen gjennomføres for ulike hypotetiske beholdninger av reservedeler, og for ulike etterbestillingsnivå. Resultatet av simuleringene er estimerte tilgjengelighetsdata, som plottes inn i beregningsmodellen for PLI. Beregningsmodellen for PLI oversetter tilgjengelighetsdataene og annen informasjon fra simuleringene til potensielt tapt fortjeneste i kroner per tidsenhet. Her vil den beste strategien for antall reservedeler på lager, og etterbestillingsnivå for reservedelene fremstå som den med lavest PLI-verdi.

## 7.2 Videre arbeid

Her følger en liste med forslag til videre arbeid basert på arbeidet utført i denne masteroppgaven. Punktene i denne listen vil kunne bidra til å gjøre metoden presentert i masteroppgaven enklere i bruk, eller gi metoden større nøyaktighet og presisjon i estimeringene som utføres med modellene.

- Automatisere overføringen av data fra GRIF til Excel.
- Utvide PetriNet-modellen slik at den inkluderer forebyggende vedlikehold, delvis de-

gradering av utstyret, reparering av ødelagte deler og/eller andre ting som kan øke nøyaktigheten av estimatene.

- Lage PetriNet-modeller for andre system eller prosesser i fabrikk.





# Tillegg A

## Forkortelser

**CPS** Cyber-Physical-System

**DES** Discrete-Event Simulation

**EN** European Norm/Standard

**Infor EAM** Infor Enterprise Asset Management

**IPK** Institutt for produksjon og kvalitetsteknikk

**ISO** International Standard Organisation

**KPI** Key Performance Indicator

**LCP** Lifecycle Profit

**MTPROD** Studieretning for Produktutvikling og Produksjon

**MTTF** Mean Time To Failure

**NEK** Norsk Elektronisk Komite

**NS** Norsk Standard

**NTNU** Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

**OEE** Overall Equipment Efficiency

**OS** Oppnåelighetskjema

**PF-intervall** Potential-to-functional failure interval

**PLI** Profit Loss Indicator

**PUP** Produktutvikling og produksjon

**RAMS** Reliability, Availability, Maintainability and Safety

**RCM** Reliability Centered Maintenance

**SQL** Structured Query Language

**TPM** Total Productive Maintenance

**WACC** Weighted average cost of capital

**WCM** World Class Maintenance

# Tillegg B

## Presentasjon

### PLI-modellering som beslutningsunderlag

Arne W. Lindefjeld



Veileder: Per Schjølberg



Veileder: Ole Meland

## Mål med oppgaven

Lage en metode SalMar kan benytte for å velge hvor mange reservedeler av hver type å ha på lageret.

Kostnader ved å ha delene på lager.

- Lagerkostnader
- Oppbundet kapital
- Foreldede deler



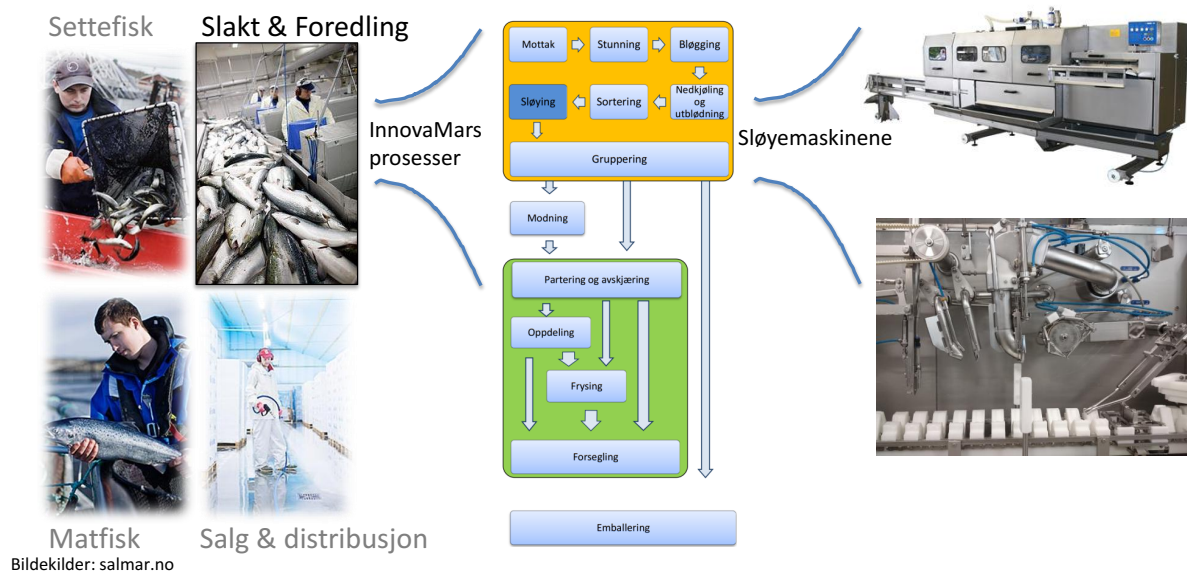
Kostnader ved ikke å ha delene når de trengs.

- Produksjonen stopper når deler går i stykker.

2

NTNU

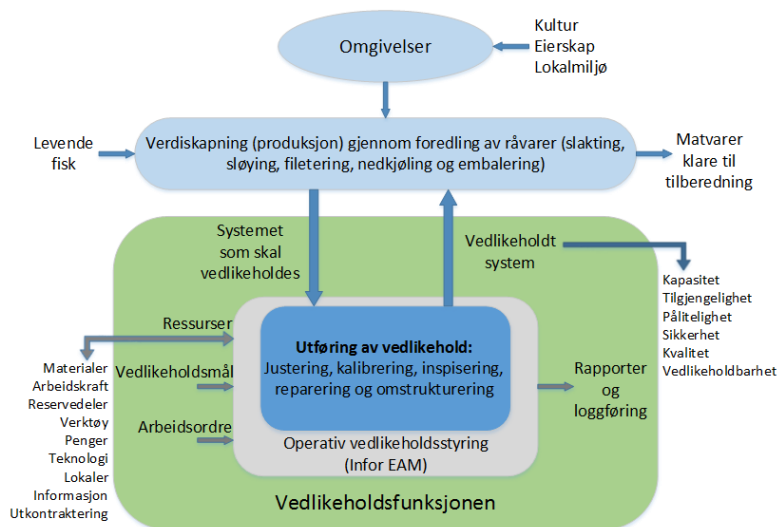
## Oppgavens fokusområde



3

NTNU

# Vedlikehold og reservedeler

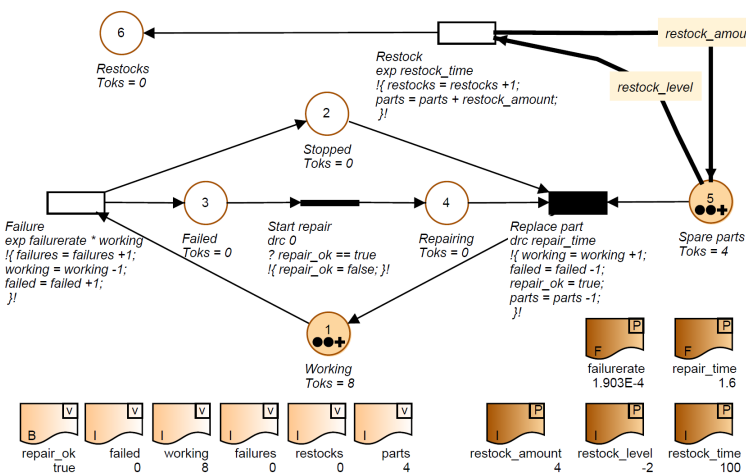


- Ulike typer vedlikehold fordrer ulike mengder reservedeler på lager.

Trenger å vite:

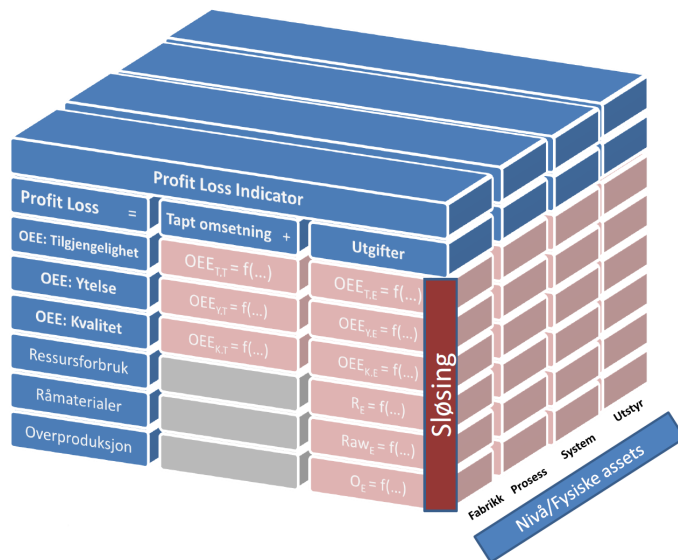
- Når nye deler skal bestilles.
- Hvor mange deler som skal bestilles om gangen.

# PetriNet



- Modell av lagerbeholdning og forbruk av reservedeler.
- Grafisk verktøy.
- Kan utvides til andre deler av maskinparken.
- Fokuserer på en artikkel om gangen.
- Benytter Monte Carlo-simuleringer for å estimere tilgjengelighetsdata.
- Synliggjør påvirkningen valg av reservedelsstrategi har på fabrikken.

## PLI (Profit Loss Indicator)



- Samler forskjellige faktorer i samme enhet (Kroner/tid).
- Forenkler vurderingen av reservedelsstrategier.
- Beregning kan utføres i regneark.
- Kan tilpasses andre forhold etter behov.

6

## Oppsummering

### I PetriNet-modellen:

1. Velg en artikkel som reservedelsstrategi skal bestemmes for.
2. Innhent pålitelighetsdata for artikkelen.
3. Estimer tidsforbruk ved reparasjon, og leveringstid av nye deler.
4. Gjennomfør Monte Carlo-simuleringer for de kombinasjoner av lagerbeholdninger og etterbestillingsnivå som vurderes.
5. Lagre resultatene i et regneark.

### I PLI-modellen:

6. Beregn PLI for hver potensielle strategi.
7. Finn strategien med lavest PLI-verdi.
8. Sjekk at strategien er gjennomførbart.

Reduser profit loss  
→ Spar penger



7

# Tillegg C

## Forstudierapport

### PLI-modellering som beslutningsunderlag

Arne Waagbø Lindefjeld

Januar 2015

Forstudierapport

Institutt for produksjons- og kvalitetsteknikk

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Veileder 1: Professor Per Schjølberg

Veileder 2: Ole Meland

## **Forord**

Som siste del av det 5-årige masterprogrammet Produktutvikling og Produksjon ved NTNU gjennomføres TPK 4950 – Sikkerhet, Pålitelighet og Vedlikehold – masteroppgave. Dette er en forstudierapport, som er ment som et styringsverktøy for å ha kontroll på tid, ressurser og progresjon ved masteroppgaven.

Forstudierapporten er utarbeidet av Arne Waagbø Lindefjeld, stud.Techn. ved NTNUs institutt for Produksjon og kvalitetsteknikk.

Jeg vil gjerne takke mine veiledere; Prof. Per Schølber og Ole Meland for hjelp og støtte i denne forstudien.

Trondheim, 29.01.2015

Arne Waagbø Lindefjeld



# Forstudie

## Introduksjon

Som en del av det fem-årige masterprogrammet Produktutvikling og Produksjon ved NTNU, skal studentene i 10. semester levere en masteroppgave. Oppgaven skal være relatert til fagretningen studentene har valgt, og skal bestå av en for-studierapport og en masteroppgave.

Oppgavebeskrivelsen er formulert av veileder og ansvarlig professor, Per Schjølberg, i samarbeid med veileder og representant for SalMar AS, Ole Meland. Masteroppgavens tittel er *PLI-modellering som beslutningsunderlag*.

## Problemformuleringen

1. Diskutere Markov modeller og Petri-net modeller som underlag i beregninger av PLI.
2. Beskrive sløyemaskinens viktighet i fiskeforedlingsprosessen ved InnovaMar.
3. Analysere reservedelsproblematikken for sløyemaskiner.
4. Anvende Markov og Petri-net teori på sløyemaskiner for å simulere tilgjengelighet ved ulike beholdninger av reservedeler.
5. Forbedringsforslag knyttet til sløyemaskinene.

## Involverte parter:

### NTNU

Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet (NTNU) er Norges nest største universitet, med hovedansvar for den høyere teknologiutdanningen i Norge. Universitetet består av 48

instituttet, fordelt over 7 fakulteter. Dette prosjektet gjennomføres ved institutt for Produksjons og kvalitetsteknikk. Hovedretningen er innen sikkerhet, pålitelighet og vedlikehold (RAMS), med spesialisering innen vedlikeholdsstyring. Veileder fra instituttet er professor Per Schjølborg.

## **SalMar AS**

Siden SalMar ble grunnlagt i 1991, har selskapet vokst til å bli Norges tredje største oppdretter av atlantisk laks. Selskapet har virksomheter innen settefiskproduksjon, oppdrett, slakt, foredling, salg og distribusjon. Det er særlig SalMar Processing, med virksomhetsområdene slakting og foredling, som er involvert i denne prosjektoppgaven.

InnovaMar er navnet på slakte- og foredlingsanlegget som er samlokalisert med hovedkontoret på Frøya i Sør-Trønderlag. Med en topp moderne maskinpark er vedlikehold en viktig del av hverdagen hos SalMar Processing. Dette prosjektet gjennomføres i samarbeid med teknisk avdeling hos SalMar, gjennom vedlikeholdssjef Ole Meland.

## **Mål med prosjektet**

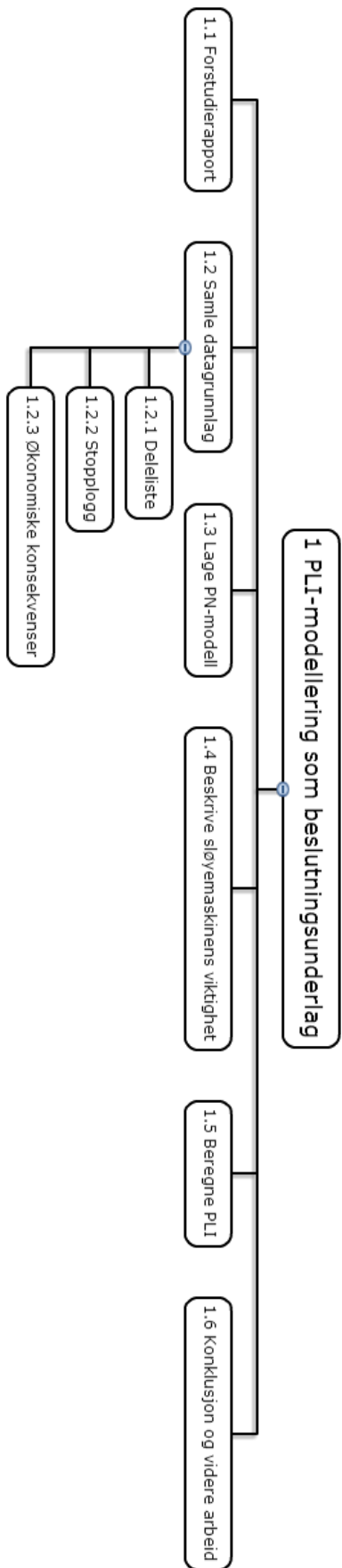
Målet med masteroppgaven er å finne et nyttig og begrunnet beslutningsunderlag ved valg av strategi for reservedelsbeholdningen for sløyemaskiner ved InnovaMar. Dersom metoden som benyttes i arbeidet med masteroppgaven gir godt resultat, kan den utvides til å omfatte andre deler av fabrikken. Dersom sluttresultatet ikke gir nevneverdig nytteverdi, er målet at arbeidet med masteroppgaven skal gi innsikt i alternative metoder som kan forsøkes for å finne en gunstig reservedelstrategi.

## **Prosjektets fremgang**

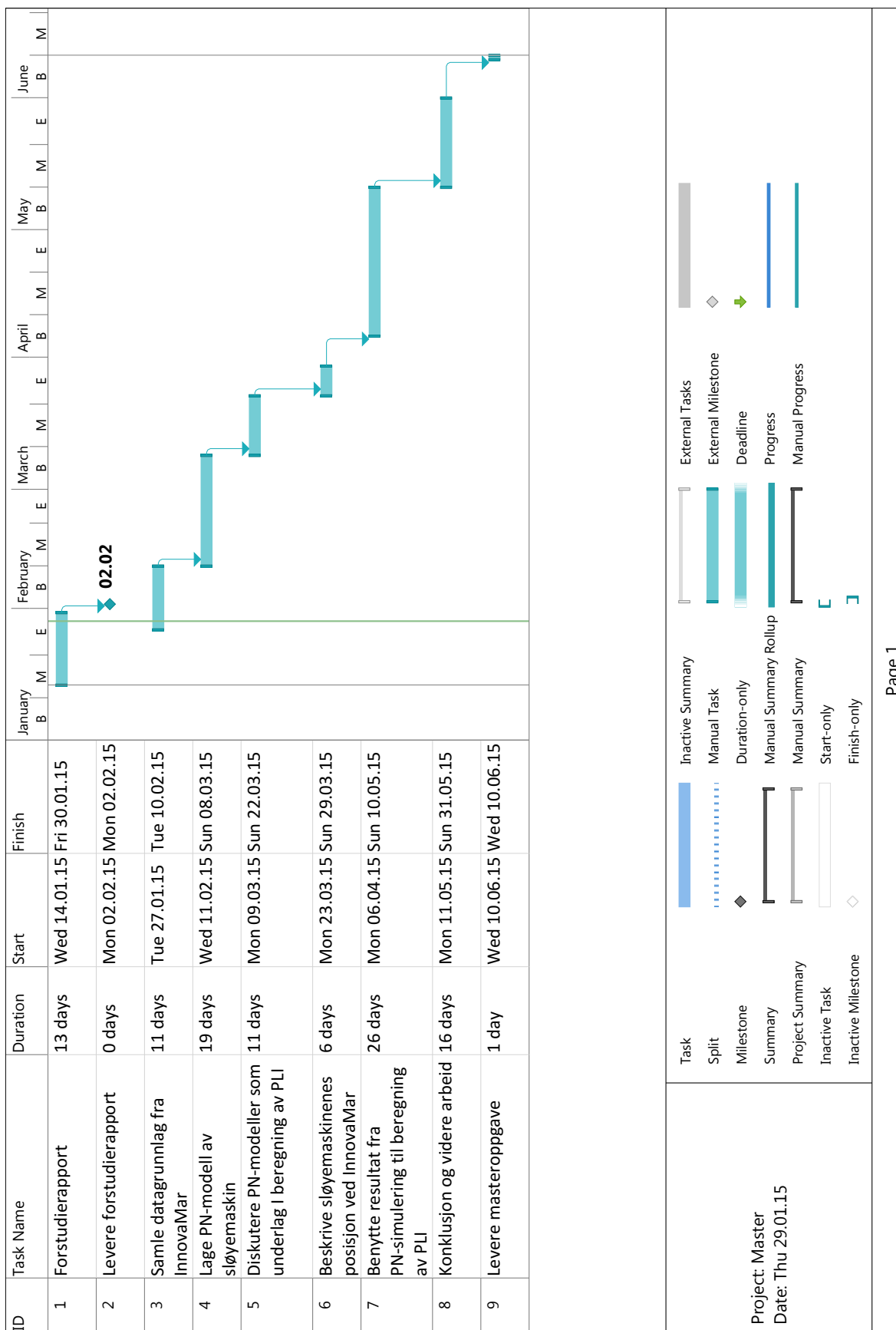
En vanlig studentuke består av omtrent 50 arbeidstimer. Et semester består av 30 studiepoeng. Masteroppgaven krediteres 30 studiepoeng, og utgjør dermed hele arbeidsbelastningen i 10. semester. Dette medfører en forventet belastning på gjennomsnittlig 10 timer per uke-dag i arbeidet med masteroppgaven.

De ulike arbeidspakkene i prosjektet er illustrert i form av en WBS i figur C.1. Den antatte arbeidsbelastningen av hver arbeidspakke fremkommer i Gantt-skjemaet i figur C.2.

Dette benyttes også til å holde oversikt over masteroppgavens fremgang. Flere av oppgavene i problemstillingen innebærer å reise til Frøya for å studere maskinparken og vedlikeholdssystemet SalMar benytter. Dette må koordineres med bedriften, og er avhengig av deres driftsplan. Det er derfor sannsynlig at detaljene i Gantt-skjemaet må justeres etterhvert, og at mange av datoene som settes opp i denne planen forskyves.



Figur C.1: WBS



Figur C.2: Fremdriftsplan

## Kost, tid og ressurs

Kost, tid og ressurs		
<b>Prosjekt:</b>		<b>Dato:</b>
PLI-modellering som beslutningsunderlag		28.01.2015
<b>Arbeidspakke nummer:</b>	<b>Arbeidspakke:</b>	<b>Ansvarlig:</b>
1.2	Samle datagrunnlag ved InnovaMar	Arne Waagbø Lindefjeld
<b>Arbeidsoppgaver:</b>		
1.2.1 Deleliste til sløyemaskin		
1.2.2 Stopplogg sløyemaskin		
1.2.3 Kostnader og økonomiske konsekvenser		
<b>Mål:</b>		
Skaffe til veie og muliggjøre bruk av pålitelighetsdata, deleliste og tilhørende kostnader fra sløyemaskinene til bruk i PN-modeller og PLI-modeller.		
<b>Beskrivelse av innhold:</b>		
Liste av mulige reservedeler til sløyemaskin med kostnader.		
Detaljert stopplogg for sløyemaskiner.		
Kostnader ved stopp av ulike lengder.		
<b>Litteratur og kilder:</b>		
Infor EAM		
SalMar AS' internserver		
<b>Metode:</b>		
Hente ut data fra Infor og internserver.		
Manuelt sortere data etter relevans og anvendelighet.		
Samtale med ansatte i teknisk avdeling for å bekrefte/avkrefte validiteten av data.		
<b>Utfordringer:</b>		
Skille mellom relevant og urelevant stopp av sløyemaskin.		
Skaffe tilstrekkelig datagrunnlag. Stoppårsaker og materiellforbruk er bare registrert de siste 2,5 år.		
Klare å bearbeide data slik at den blir anvendbar i videre arbeidspakker.		
<b>Resultat:</b>		
Valid data som kan benyttes i analyser og simuleringer.		
<b>Estimerte tid og ressurser</b>		
<b>Planlagt start:</b>	<b>Planlagt slutt:</b>	<b>Arbeidsdager:</b>
27.01.2015	10.02.2015	11

<b>Kost, tid og ressurs</b>		
<b>Prosjekt:</b>		<b>Dato:</b>
PLI-modellering som beslutningsunderlag		28.01.2015
<b>Arbeidspakke nummer:</b>	<b>Arbeidspakke:</b>	<b>Ansvarlig:</b>
1.3	PN-modellering av sløyemaskin	Arne Waagbø Lindefjeld
<b>Arbeidsoppgaver:</b>		
1.3 Lage PN-modell		
<b>Mål:</b>		
Utvikle en realistisk og tilstrekkelig detaljrik modell av sløyemaskinene for å simulere tilgjengeligheten av utstyret.		
<b>Beskrivelse av innhold:</b>		
PN-modell av sløyemaskinene i slaktelinja ved InnovaMar. Simuleringer av tilgjengelighet ved ulike reservedelsbeholdninger.		
<b>Litteratur og kilder:</b>		
NEK IEC 62551 Egnet program for PN-modellering		
<b>Metode:</b>		
Gradvis bygge opp PN-modellen og teste funksjonaliteten underveis. Vurdere grupperinger av ulike reservedelstyper. Samtale med ansatte ved IPK med kunnskap om PN.		
<b>Utfordringer:</b>		
PN-modellering er lite brukt i Norge, det er derfor et lite sammenligningsgrunnlag. Vanskelig å vite om PN-modellen har mangler og begrensninger som gjør den lite anvendbar.		
<b>Resultat:</b>		
Estimerte tilgjengelighetsdata for sløyemaskinene i hypotetiske situasjoner.		
<b>Estimerte tid og ressurser</b>		
<b>Planlagt start:</b>	<b>Planlagt slutt:</b>	<b>Arbeidsdager:</b>
11.02.2015	08.03.2015	19

<b>Kost, tid og ressurs</b>		
<b>Prosjekt:</b>		<b>Dato:</b>
PLI-modellering som beslutningsunderlag		28.01.2015
<b>Arbeidspakke nummer:</b>	<b>Arbeidspakke:</b>	<b>Ansvarlig:</b>
1.4	Beskrive sløyemaskinens viktighet	Arne Waagbø Lindefjeld
<b>Arbeidsoppgaver:</b>		
1.4 Beskrive sløyemaskinenes rolle i slaktelinja ved InnovaMar.		
<b>Mål:</b>		
Tydeliggjøre behovet for en begrunnet reservedelsstyring ved InnovaMar.		
<b>Beskrivelse av innhold:</b>		
Beskrivelse av sløyemaskinenes rolle i den daglige driften ved InnovaMar. Beskrivelse av situasjonen vedrørende reservedelsproblematikken for sløyemaskinene.		
<b>Litteratur og kilder:</b>		
Infor EAM Ole Meland Ansatte ved SalMar Observasjoner og egne erfaringer i fabrikken		
<b>Metode:</b>		
Beskrive sløyemaskinenes funksjon og virkemåte ut i fra samtaler med nøkkelpersonell ved SalMar og egne observasjoner og erfaringer i fabrikken. Beskrive reservedelsstyringen som benyttes ved SalMar basert på samtale med Ole Meland.		
<b>Utfordringer:</b>		
Beskrive systemet objektivt, uten for mye synsing og subjektive meninger.		
<b>Resultat:</b>		
Et kapittel i masteroppgaven som begrunner valget av problemstilling og behovet for nye løsninger.		
<b>Estimerte tid og ressurser</b>		
<b>Planlagt start:</b>	<b>Planlagt slutt:</b>	<b>Arbeidsdager:</b>
23.03.2015	29.03.2015	6



<b>Kost, tid og ressurs</b>		
<b>Prosjekt:</b>		<b>Dato:</b>
PLI-modellering som beslutningsunderlag		28.01.2015
<b>Arbeidspakke nummer:</b>	<b>Arbeidspakke:</b>	<b>Ansvarlig:</b>
1.5	Beregne PLI	Arne Waagbø Lindefjeld
<b>Arbeidsoppgaver:</b>		
1.5 Benytte resultat fra PN-simulering til beregning av PLI.		
<b>Mål:</b>		
Finne en økonomisk begrunnelse for valg av strategi for reservedelsstyring ved InnovaMar.		
<b>Beskrivelse av innhold:</b>		
Beskrivelse av de økonomiske konsekvensene ved ulike valg av reservedelsløsninger.		
<b>Litteratur og kilder:</b>		
Kildesøk i databaser om PLI Kostnadsdata fra SalMar (kostnader ved nedetid og lagerføring av reservedeler) Estimerte tilgjengelighetsdata fra PN-simuleringene		
<b>Metode:</b>		
Føre tilgjengelighetsdata fra simuleringer med PN-modellen inn i PLI-modellen, sammen med kostnadsdata og andre hensyn. Justere reservedelsbeholdningen for å minimere totale kostnader i PLI-modellen.		
<b>Utfordringer:</b>		
Finne relevante og korrekte kostnadsdata ved drift av InnovaMar. Bruke PLI-modellen på en slik måte at resultatene kan benyttes som beslutningsunderlag.		
<b>Resultat:</b>		
Beslutningsunderlag ved valg av strategi for reservedelsstyring ved InnovaMar.		
<b>Estimerte tid og ressurser</b>		
<b>Planlagt start:</b>	<b>Planlagt slutt:</b>	<b>Arbeidsdager:</b>
06.04.2015	10.05.2015	26

<b>Kost, tid og ressurs</b>		
<b>Prosjekt:</b>		<b>Dato:</b>
PLI-modellering som beslutningsunderlag		28.01.2015
<b>Arbeidspakke nummer:</b>	<b>Arbeidspakke:</b>	<b>Ansvarlig:</b>
1.6	Konklusjon og videre arbeid	Arne Waagbø Lindefjeld
<b>Arbeidsoppgaver:</b>		
1.6 Trekke konklusjoner og gi forslag til videre arbeid. Fullføre masteroppgaven og ferdigstille rapporten.		
<b>Mål:</b>		
Sammenfatte masteroppgaven til et helhetlig resultat som har nytteverdi for Sal-Mar. Fullføre og levere rapporten innen tidsfristen.		
<b>Beskrivelse av innhold:</b>		
Fulstendig masteroppgave med nyttige konklusjoner ut i fra arbeidet som er gjennomført.		
<b>Litteratur og kilder:</b>		
Kildesøk i databaser om PLI Tilgjengelighetssimuleringer fra PN-modellen av sløyemaskinene Estimater av kostnader ved ulike reservedelsløsninger fra PLI-modellen		
<b>Metode:</b>		
Rapporten skrives i $\LaTeX$ , og kilder håndteres i programmet Zotero.		
<b>Utfordringer:</b>		
Registrere og håndtere feilkilder på en god måte. Trekke konklusjoner fra arbeidet og skille ut nyttig informasjon og kunnskap.		
<b>Resultat:</b>		
Beslutningsunderlag ved valg av strategi for reservedelsstyring ved InnovaMar.		
<b>Estimerte tid og ressurser</b>		
<b>Planlagt start:</b>	<b>Planlagt slutt:</b>	<b>Arbeidsdager:</b>
11.05.2015	31.05.2015	16

# Bibliografi

- Ahmad, M. and Benson, R. (1999). *Benchmarking in the Process Industries*. IChemE.
- Baader, F. P. M. (2015). nettside: [http://www.baader.com/en/products/fish\\_processing/-salmonides/salmon\\_and\\_seatrout/gutting.html](http://www.baader.com/en/products/fish_processing/-salmonides/salmon_and_seatrout/gutting.html).
- Booty, F. (2002). The hidden factory. *Works Management*, 55(5):18–21.
- Drath, R. and Horch, A. (2014). Industrie 4.0: Hit or Hype? [Industry Forum]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 8(2):56–58.
- Dunn, S. (2007). The fourth generation of maintenance.
- Global Forum of Maintenance & Asset Management (2014). *The Asset Management Landscape*.
- Hide, M. (2013). Fourth generation maintenance.
- ISO 13306 (2010). *Vedlikehold: Vedlikeholdsterminologi*. Standard Norge.
- ISO 55000 (2014). *Forvaltning av anlegg og verdier. Oversikt, prinsipper og terminologi*. Standard Norge.
- Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., and Wahlster, W. (2013). *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the Future of German Manufacturing Industry; Final Report of the Industrie 4.0 Working Group*. Forschungsunion.
- Kennedy, W. J., Wayne Patterson, J., and Fredendall, L. D. (2002). An overview of recent literature on spare parts inventories. *International Journal of Production Economics*, 76(2):201–215.
- Koch, A. (2011). *OEE for the Productionteam: The complete OEE user guide*. CreateSpace Independent Publishing Platform.

- Ling Wang, Jian Chu, and Weijie Mao (2008). An optimum condition based replacement and spare provisioning policy based on markov chains. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 14(4):387–401.
- Mishra, R. P., Anand, G., and Kodali, R. (2007). Strengths, weaknesses, opportunities, and threats analysis for frameworks of world-class maintenance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 221(7):1193–1208.
- Moubray, J. (1991). *Reliability-centred maintenance*. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance*. Industrial Press, New York.
- NEK EN 62551 (2012). *Analysis techniques for dependability. Petri net techniques*. Norsk elektroteknisk komite.
- NS-ISO 15341 (2007). *Vedlikehold: Hovedindikator for ytelse innenfor vedlikehold*. Standard Norge.
- Per Schjøberg (2014). Forelesningsnotat TPK 4140 - maintenance management.
- Pete Abilla (2015). Lean Six Sigma: What is a Hidden Factory?
- Petri, C. and Reisig, W. (2008). Petri net. *Scholarpedia*, 3(4):6477.
- Rausand, M. (2014). *Reliability of safety-critical systems: theory and application*. Wiley, Hoboken, New Jersey.
- Rødseth, H. *Fremtidig publisering av kubemodellen*. PhD thesis.
- Revelle, J. B. (2013). Out of Hiding. *Quality Progress*, 46(3):50–51.
- Robinson, S. (2014). Discrete-event simulation: A primer. In Brailsford, S., Churilov, L., and Dangerfield, B., editors, *Discrete-Event Simulation and System Dynamics for Management Decision Making*, pages 10–25. John Wiley & Sons Ltd.
- ROSS Gemini Centre. Reliability Data - nettside: <https://www.ntnu.edu/ross/info/data>.
- SalMar (2015). Interndokument: Data fra Infor EAM.
- SalMar ASA (2015). nettside: <http://salmar.no/om-SalMar>.

The Institute of Asset Management (2014). *An anatomy of asset management*.

Valmot, A. O. R. Slik skal sensorer og big data ta over styring av byene - nettside: <http://www.tu.no/it/2015/06/09/slik-skal-sensorer-og-big-data-ta-over-styring-av-byene>.

Wilson, A. (2013). *Asset Management - Focusing on Developing Maintenance Strategies and Improving Performance*. Conference Communication.