

Masteroppgave

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

Stian Solem Johansen & Per Sunde

Vedlikeholdsoptimalisering av korrosjon under isolasjon

En case-studie med bruk av empiriske data

Masteroppgave i Organisasjon og ledelse

Sikkerhet, pålitelighet og vedlikehold

Veileder: Jørn Vatn

Februar 2022

Stian Solem Johansen & Per Sunde

Vedlikeholdsoptimalisering av korrosjon under isolasjon

En case-studie med bruk av empiriske data

Masteroppgave i Organisasjon og ledelse
Sikkerhet, pålitelighet og vedlikehold
Veileder: Jørn Vatn
Februar 2022

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



Kunnskap for en bedre verden

Forord

Dette arbeidet er den avsluttende oppgaven i det erfaringsbaserte masterprogrammet i organisasjon og ledelse. Oppgavens spesialisering er innen sikkerhet, pålitelighet og vedlikehold ved institutt for Maskinteknikk og Produksjon ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet. Studien gjennomføres i perioden fra februar 2021 til februar 2022. Oppgaven er et selvstendig arbeid som gjennomføres av studentene selv, men Maintech bistår med empiriske data og spesifikk informasjon. Arbeidet er en vitenskapelig studie der det brukes empiriske data fra Maintechs kundeportefølje.

Temaet for oppgaven er vedlikeholdsoptimalisering av korrosjon under isolasjon. Dette temaet ble til gjennom diskusjoner mellom forfatterne selv, Maintech, veileder samt et opplevd behov fra bransjen.

Formålet med oppgaven er å kunne gi et bidrag til å forbedre vedlikeholdsstrategier innenfor prosessindustri og petroleumsvirksomheten. Dette bidraget baseres på bruk av praktisk erfaring, teorier, modeller og empiriske vedlikeholdsdata fra området. Det antas derfor at lesere av denne oppgaven innehar en grunnleggende kunnskap for vedlikehold, RAMS og prosessindustri. Teori, begrep og ord er likevel beskrevet og forklart på en slik måte at også lesere uten denne kunnskapen skal forstå og ta nytte av arbeidet som er utarbeidet i denne oppgaven.



Stian Solem Johansen



Per Sunde

Trondheim, 26/02/22

Sted og dato

Anerkjennelser

Vi vil gjerne uttrykke vår takknemlighet til professor Jørn Vatn for god støtte, veiledning og kunnskaper i forbindelse med gjennomføring av denne masteroppgaven. Videre ville studien hadde ikke vært mulig uten støtte og bidra fra Maintech. Vi vil derfor takke dem for deres bidrag. Vi vil også takke våre arbeidsgivere Equinor og Axess, for tillit, kunnskap og støtte gjennom hele denne perioden. Periodene med høyt arbeidspress hadde heller ikke vært mulig uten tilpasninger fra omgivelsene i form av våre partnere og familier. Dette arbeidet ble muliggjort på grunn av denne samlede støtten og vi uttrykker vår aller høyeste takknemlighet.

Sammendrag

Denne oppgaven har sett på muligheter for forbedring av vedlikeholdsstrategi knyttet til korrosjon under isolasjon. En Markov degraderingsmodell ble utviklet og benyttet for modellering av tilstandsutvikling og optimalisering av vedlikeholdsstrategier. Dette ble gjort ved å analysere empiriske data fra et prosessanlegg hvor Maintech gjennomfører risikobasert inspeksjon av korrosjon under isolasjon. Disse dataene ble så supplert med litteratur, praktisk kunnskap og kvalitativ informasjon fra Equinor, Axess og Maintech. Dette ble videre benyttet for å modellere ulike vedlikeholdsstrategier knyttet til korrosjon under isolasjon.

Enkelte antagelser ble gjort for å få en modell tilpasset virkeligheten. Blant annet måtte inspeksjonsmatrisen inkluderes på en suboptimal måte. Modellen ble videre brukt til å modellere ulike vedlikeholdsstrategier. Dette ble gjort fra et kostnadsperspektiv, med hensyn til potensialet for lekkasjer.

Markov-modellen fungerte som tiltenkt, og ga klare resultater for strategiene som ble modellert. Resultatene indikerer at det vil være potensiale for forbedring av vedlikeholdsstrategien knyttet til korrosjon under isolasjon. Kostnader hadde en sentral rolle i modelleringen. Resultatene for kostnader viste at i et kortsiktig perspektiv så vil inspeksjonskostnader være dominerende, men i et langsiktig perspektiv vil reparasjoner, eventuelle produksjonstap og ulykker være den dominerende kostnadsposten.

Resultatene viste at vedlikeholdsstrategier bør ses på i et langsiktig perspektiv, og tilpasses anleggets tiltenkte levealder. Data bør også samles inn systematisk gjennom hele anleggets levealder. Modellen viste gode evner for modellering, men vil ha behov for videre validering og tilpasninger for ytterligere forbedringer.

Summary

This assignment has addressed opportunities for improving maintenance strategies related to corrosion under insulation. A Markov degradation model was developed and used for modeling state development and optimization of inspection intervals, methods, and strategies. This was done using empirical data from a process plant where Maintech performs risk-based inspections by stripping and visual inspection. These data were then supplemented by literature, practical knowledge, and qualitative information from Equinor, Axess, and Maintech. This was further used to model different maintenance strategies related to corrosion under insulation.

Some assumptions had to be made to get a model adapted to reality. Among other things, the inspection matrix had to be part of a non-optimal way. This was further used to model optimal intervals, methods, and strategies. This was done from a cost perspective but also in terms of security.

The Markov model worked as intended and gave clear results for the chosen strategies. The results indicated the potential for improving maintenance strategies related to corrosion under insulation. Costs played a central role in the modeling. The results for costs showed that in the short term, inspection costs will be dominant, but in a longer perspective, repairs, production losses, and potential accidents will be the dominant cost provider.

The results showed that maintenance strategies should be seen in a long-term perspective, and adapted to the plant's intended lifespan. Data should also be collected systematically throughout the life of the plant. The model showed good capabilities for modeling but will need further validation and adaptations for further improvements.

Innholdsfortegnelse

Forord	
Sammendrag	ii
Summary	iii
Innholdsfortegnelse	v
Figurliste	vi
Tabelliste	vii
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn	2
1.2 Målsetning	4
1.3 Fremgangsmåte	4
1.4 Oppgavens bidrag	5
1.5 Avgrensninger	5
1.5.1 Case	5
1.5.2 Tidsperiode	5
1.5.3 Pensum og forkunnskaper	5
1.5.4 Data	5
1.5.5 Modellering	5
1.6 Rapportens oppbygning	6
2 Teori	7
2.1 Teoretisk bakgrunn	7
2.1.1 Vedlikeholdsterminologi og målsetning med vedlikeholdsstyring	7
2.1.2 Tradisjonelle strategier for vedlikehold	8
2.1.3 Prediktivt vedlikehold	9
2.1.4 Modellering av feilutvikling	9
2.1.5 Markov-analyse	11
2.1.6 Sannsynlighetsfordelinger	13
2.1.7 Vedlikeholdsoptimalisering	13
2.1.8 Intervall og kostnadsfunksjon	14
2.2 Litteraturstudie	15
2.3 Litteraturgjennomgang	17
2.3.1 Vedlikehold av KUI	17
2.3.2 Prediktivt vedlikehold	18
2.3.3 Digital tvilling	18
2.3.4 Degraderingsmodeller for rørsystemer	21
2.4 Konklusjon og begrunnelse for valg av modell	23
3 Case studie	24
3.1 Korrosjon under isolasjon	24
3.2 Isolasjonssystem	25
3.2.1 Ytterkapsling	25
3.2.2 Isolasjon	25
3.2.3 Overflatebelegg	26
3.3 Forutsetninger for korrosjon under isolasjon	26
3.3.1 Vann	27
3.3.2 Kjemisk innhold i vann	27
3.3.3 Temperatur	27
3.4 Barrierer mot KUI	28
3.4.1 Ytterkapslingens funksjon	28

3.4.2	Overflatebeleggets funksjon	29
3.4.3	Rørspesifikasjoner	29
3.5	Dagens vedlikeholdsstrategi	30
4	Dataanalyse	31
4.1	Markov-diagram	31
4.2	Database	34
4.3	Analyse	34
4.3.1	Overgangsrater	34
4.3.2	Reparasjonsrate og inspeksjonsrate	38
4.3.3	Kostnader	39
4.4	Avgrensninger og antagelser	41
4.4.1	Antagelser i Markov-diagram	41
4.4.2	Avgrensninger i analyse	41
5	Modellering	42
5.1	Kostnader	44
5.2	Modellering av dagens vedlikeholdsstrategi	45
5.3	Modellering av alternative vedlikeholdsstrategier	45
5.3.1	Alternativ strategi 1: Optimalt inspeksjonsintervall	46
5.3.2	Alternativ strategi 2: Hyppig NDT-inspeksjon i "Finding"	47
5.3.3	Alternativ strategi 3: Kun bruk av NDT-inspeksjon	48
5.3.4	Alternativ strategi 4: Bruk av spesialressurser	49
5.3.5	Alternativ strategi 5: Raskere- og dyrere reparasjoner	50
5.3.6	Alternativ strategi 6: Ikke reparasjon av "Light damage"	51
5.3.7	Alternativ strategi 7: Utsatt vedlikehold av "Finding" til revisjonsstans	52
5.3.8	Alternativ strategi 8: Implementering av sensorer og digital tvilling	53
6	Analyse	54
6.1	1: Optimalt inspeksjonsintervall	54
6.2	2: NDT-inspeksjon i "Finding"	54
6.3	3: NDT-inspeksjon i alle tilstander	55
6.4	4: Spesialressurser for bedre nøyaktighet	55
6.5	5: Raskere og dyrere reparasjoner	55
6.6	6: Ingen reparasjon av "Light damage"	55
6.7	7: Utsette reparasjon til revisjonsstans	56
6.8	8: Digital tvilling og fuktsensorer	56
7	Avslutning	57
7.1	Sammendrag og konklusjon	57
7.2	Diskusjon	59
7.3	Videre arbeid	60
8	Vedleggsliste	61
	Referanser	72

Figurliste

1.1	Blokkdiagram som viser fremgangen i arbeidet	5
1.2	Blokkdiagram som viser rapportens oppbygning	6
2.1	Forebyggende vedlikehold til venstre, skjer før utstyrsvikt. Korrigerende vedlikehold til høyre, skjer etter utstyrsvikt	8
2.2	Eksempel på en PF-modell [Selvik and Ford, 2017]	10
2.3	Observerbar gradvis feilutvikling. Vedlikeholdsgrensen er ved aksjonsgrensen.	11
2.4	Viser eksempepl på et Markov-diagram	12
2.5	C(T) er totalkostnad som funksjon av vedlikeholdsintervall. PM er forebyggende- og CM er korrektivt vedlikehold [Tutt, 2012]	14
2.6	Flytskjemaet viser hvordan fremgangsmåte som ble benyttet i litteraturstudiet	16
2.7	Utvikling av vedlikeholdsstrategi fra 1940 - dags dato [Arunraj and Maiti, 2007]	17
2.8	Elementer i en digital tvilling [DNV, 2020b]	20
2.9	De ulike FE-nivåene som DNV har definert [DNV, 2020b]	20
3.1	KUI har utviklet seg under en tilsynelatende fin isolasjon [Kaefer, ud]	24
3.2	Illustrasjonsbilde av hvordan isolasjonen rundt et rør er bygd opp. Ytterkapsling, isolasjon og coating rundt røret [Oceaneering, 2017]	25
3.3	En tydelig skadet ytterkapsling der vann og forurensning kan trenge inn til isolasjonen [Eddysonics, ud]	26
3.4	Sannsynlighet for korrosjon som funksjon av temperatur [Wiggen, 2019]	28
4.1	Markov-diagrammet som er utviklet og vil bli brukt i det videre arbeidet. Overgangene og tilstander med stiplede linjer er inspeksjoner og bekreftede tilstander.	31
4.2	Tilstandene og overgangsratene i Markov-modell	35
4.3	Utsnitt av Markov-diagrammet som skal brukes i modelleringen. Viser $MTTT$ mellom de ulike tilstandene.	37
5.1	Modifisert Markov-diagram. Fjernet tilstandene LD_B og LD_R samt overgangene fra disse.	51
5.2	Trådløse sensorer som er montert på ytterkapslingen til et isolert rør [Indusenz, ud]	53

Tabelliste

2.1 Eksempel på et litteratursøk som ble gjennomført på Oria, Scopus og OnePetro . . .	15
4.1 Forklaring av tilstandene i figur 4.1	32
4.2 Forklaring av overgangsratene i figur 4.1	32
4.3 Forklaring av reparasjonsratene i figur 4.1	33
4.4 Forklaring av inspeksjonsratene i figur 4.1	33
4.5 Beregning av ulike tilstanders Mean-Time-To-Transition, MTTT	35
4.6 Corrosion Rate [mm/y] [API, 2016]	36
4.7 Beregning av MTTT, λ og CR	36
4.8 Reparasjonsrater for de ulike tilstandene	38
4.9 Inspeksjon og reparasjonskostnader av rør [Oceaneering, 2017]	39
4.10 Direkte vedlikeholdskostnader, produksjonsstans, og ulykke	39
4.11 Løpende kostnader i de ulike tilstandene	40
5.1 Overgangsmatrise	42
5.2 Symbolforklaring fra tabell 5.1 og tabell 5.3	42
5.3 Inspeksjonsmatrise	43
5.4 Kostnader	44
5.5 Resultater fra dagens vedlikeholdsstrategi. Resultat i vedlegg 5.1	45
5.6 Resultater av vedlikeholdsstrategi 1: $\tau_1 = 10$, $\tau_2 = 7$ og $\tau_3 = 5$. Resultat i vedlegg 5.2	46
5.7 Resultater av vedlikeholdsstrategi 1: $\tau_1 = 10$, $\tau_2 = 8$ og $\tau_3 = 7$. Resultat i vedlegg 5.2	46
5.8 Endringer sammenlignet med dagens vedlikeholdsstrategi	47
5.9 Resultater av vedlikeholdsstrategi 2: $\tau_1 = 10$, $\tau_2 = 7$ og $\tau_3 = 3$. Resultat i vedlegg 5.3	47
5.10 Resultater av vedlikeholdsstrategi 2: $\tau_1 = 10$, $\tau_2 = 6$ og $\tau_3 = 3$. Resultat i vedlegg 5.3	47
5.11 Endringer sammenlignet med dagens vedlikeholdsstrategi	48
5.12 Resultater av vedlikeholdsstrategi 3: $\tau_1 = 7$, $\tau_2 = 5$ og $\tau_3 = 3$. Resultat i vedlegg 5.4	48
5.13 Endringer sammenlignet med dagens vedlikeholdsstrategi	49
5.14 Resultater av vedlikeholdsstrategi 4: $\tau_1 = 10$, $\tau_2 = 7$ og $\tau_3 = 5$. Resultat i vedlegg 5.5	49
5.15 Endringer sammenlignet med dagens vedlikeholdsstrategi	50
5.16 Resultater av vedlikeholdsstrategi 5: $\tau_1 = 10$, $\tau_2 = 7$ og $\tau_3 = 5$. Resultat i vedlegg 5.6	50
5.17 Resultater av vedlikeholdsstrategi 6: $\tau_2 = 7$ og $\tau_3 = 5$. Resultat i vedlegg 5.7 . . .	51
5.18 Resultater av vedlikeholdsstrategi 6 med bruk av NDT i "Finding": $\tau_2 = 6$ og $\tau_3 =$	
3. Resultat i vedlegg 5.7	52
5.19 Endringer sammenlignet med dagens vedlikeholdsstrategi	52
5.20 Resultater av case 7: Revisjonsstans, $\tau_1 = 10$, $\tau_2 = 10$ og $\tau_3 = 10$. Resultat i vedlegg	
5.8	52
5.21 Endringer sammenlignet med dagens vedlikeholdsstrategi	53
5.22 Resultater av vedlikeholdsstrategi 8: $\tau = 1$ måned. Resultat i vedlegg 5.9	53
6.1 Sammenligning av resultater fra modelleringen. MTTF er tiden det tar mellom	
hver lekkasje. MTTF er oppgitt i prosentvis endring sammenlignet med dagens	
vedlikeholdsstrategi	54

Ordforklaringer

API	American Petroleum Institute. Utgiver er vedlikeholdsstandarder for KUI.
Cladding	Den ytterste kapslingen på isolerte rør. Har som oppgave å holde vann og urenheter borte fra isolasjonsmaterialet.
Coating	Den innerste barrieren som skal beskytte rør mot KUI. Tynt belegg rundt selve røret.
DNV	Det Norske Veritas. Utgiver er vedlikeholdsstandarder for KUI.
EFC	The European Federation of Corrosion. Utgiver er vedlikeholdsstandarder for KUI.
<i>F</i>	Finding. Klassifisering av korrosjonsdybde.
Industri 4.0	Fjerde industrielle revolusjon
Isolasjonssystem	Ytterkapsling, isolasjon, overflatebelegg og rørkvalitet
KUI	Korrosjon under isolasjon er et fenomen som oppstår rundt isolerte rør, tanker og struktur laget av karbonstål.
<i>L</i>	Lekkasje. Ruptur på røroverflate.
Lambda	Overgangsrate mellom tilstander i Markov-modell
<i>LD</i>	Light damage. Klassifisering av korrosjonsdybde.
Maintech AS	Leverer tjenester innen drift og vedlikehold, inspeksjon og materialteknologi til et bredt spekter av kunder.
MTTF	Mean-time-to-failure. Gjennomsnittelig tid til et utstyr feiler.
MTTT	Mean-time-to-transition. Gjennomsnittelig tid mellom to tilstander.
NACE	National Association of Corrosion Engineers. Utgiver er rapporter, undersøkelser og vedlikeholdsstandarder for KUI.
NDT	Non-destructive-testing. Inspeksjonsmetode som ikke krever avisolering.
Nålepikking	Behandling som fjerner det ytterste laget på en overflate
<i>O</i>	Observation. Klassifisering av korrosjonsdybde.
PdM	Predictive maintenance eller prediktivt vedlikehold. Moderne vedlikeholdsstrategi som benytter teknologi og datakraft for å forutse fremtidige vedlikeholdsbehov.

1 Introduksjon

Petroleumsvirksomheten i Norge startet for fullt tidlig på 70-tallet. Siden oppstarten har virksomheten bidratt med over 15 700 milliarder kroner til Norges brutto nasjonalprodukt målt i dagens kroneverdi. Med dette er petroleumsvirksomheten Norges desidert viktigste næring. Equinor, AkerBP og ConocoPhillips er de tre største operatørene på den Norske kontinentalsokkelen, og til sammen driver de i overkant av 100 oljeplattformer og 10 landanlegg.

Gjennom de siste 50 årene har vi sett en betydelig utvikling innen teknologien som driver prosessanleggene, men vedlikeholdet gjennomføres så og si uendret fra oppstarten tidlig på 70-tallet. Vedlikehold utgjør i dag 30-40% av de totale utgiftene til en produksjonsbedrift, og er dermed en av de største utgiftspostene til bransjen. Innenfor industrien har det de siste årene derfor blitt et økt fokus på det som refereres til som neste industrielle revolusjonen, *industri 4.0*. Overgangen til industri 4.0 handler i hovedsak om overgang fra tradisjonelle vedlikeholdsstrategier til *prediktivt vedlikehold* [Wegener, 2020](#). Med synkende oljepriser og eksponentiell vekst i datakraft har bransjen de siste årene rettet fokuset mot industri 4.0 og prediktivt vedlikehold i håp om å øke lønnsomheten.

Tradisjonelt har vedlikeholdsstyringen vært basert på en balansegang mellom korrektivt- og forebyggende vedlikehold, noe som fungerer utmerket på enkelte deler av industrien. Det tradisjonelle vedlikeholdet fungerer derimot ikke optimalt på problematikken knyttet til *korrosjon under isolasjon*, som denne oppgaven skal se nærmere på.

1.1 Bakgrunn

Korrosjon under isolasjon (KUI) er et fenomen som oppstår på isolerte rørsystemer, beholdere og strukturer laget av karbon- og lavlegert stål. KUI oppstår når isolert utstyr eksponeres for vann og oksygen. Formålet med isolasjon kan være mange, men de typiske årsakene er brannisolasjon, termisk isolasjon og støyisolasjon. KUI er et betydelig problem for prosessindustrien, og hvert år brukes det over 1 milliard kroner på vedlikehold bare i Norge. I tillegg til å være en betydelig kostnadspost, utgjør KUI også en stor sikkerhetsrisiko og kan potensielt være årsak til storulykker. En sentral del av årsaken til den store kostnaden, er at det er vanskelig å forutsi hvor eller når korrosjon oppstår.

Tradisjonelt har vedlikeholdsstyringen vært basert på en balansegang mellom korrektiv- og forebyggende vedlikehold. Dette er en metode som fungerer optimalt i mange tilfeller, men for problematikken knyttet til KUI, resulterer metoden i unødvendige inspeksjoner og utgifter. Det er derfor ønskelig å se på metoder for å optimalisere vedlikeholdet, og på den måten både oppnå økonomiske besparelser og forbedret sikkerhet. For å kunne oppnå dette, må en inneha inngående kunnskap om både KUI, vedlikehold og kostnader.

Prediktivt vedlikehold (PdM) er *State-Of-The-Art (STOA)* innen moderne vedlikehold. Den ledende forskningen innen vedlikehold fører i retning av at reaktive- og periodiske vedlikeholdsstrategier blir erstattet av prediktive strategier [Wegener, 2020](#). Kombinasjonen av tilstandsmålinger, komponenthistorikk, statistisk dataanalyse og ekspertanalyser danner grunnlaget for prediktivt vedlikehold. Ved å kombinere disse dataene til et komplekst bilde, kan vi forutse gjenværende levetid og framtidige behov for vedlikehold.

DNV beskriver at forskjellen på prediktivt- og tradisjonelt vedlikehold er at en kan ved hjelp av prediktivt vedlikehold estimere en feilutvikling eller tid til en feil oppstår. Dette er mulig ved hjelp av observasjoner, inspeksjoner, tilstandsmålinger og datadrevne analytiske modeller [DNV, 2019a](#). Modellene omfatter alle metoder som brukes for å kontrollere gitte feilmekanismer knyttet til en funksjon. Modeller vil ved hjelp av en beregnet sannsynlighet estimere levetider, slitasje eller annen degradering som kan føre til feiltilstander. ISO 13381-1 definerer tre metodiske tilnærminger; kunnskapsbasert, fysikk basert og datadrevet.

PdM er altså en moderne vedlikeholdsstrategi som ved hjelp av blant annet datakraft skal forutse når et utstyr har behov for vedlikehold. På denne måten kan en optimalisere hvor og når det er behov for ressurser, basert på modellering av tilstand på utstyr. Strategien krever derimot at en har etablert data og modeller for den feilutviklingen som kan forventes, som av flere ulike grunner kan være utfordrende å utvikle.

Horenbekk gjennomførte i år 2010 en litteraturstudie som blant annet inneholder et rammeverk for vedlikeholdsoptimalisering. Dette rammeverket beskrev praktiske problemer med implementering av vedlikeholdsmodeller i industrien sett fra datidens standpunkt. Datatilgjengelighet ble her trukket frem som en av de største utfordringene i forhold til praktisk bruk innenfor industrien. *Vatn* diskuterte i 2018 ulike muligheter som ligger i begrepet industri 4.0, hvor 4.0 referer til den fjerde industrielle revolusjon [Vatn, 2018a](#). Denne revolusjonen peker på mulighetene som kommer med kommunikasjon over internett, med tanke på sanntidskontroll av prosesser på ulike nivåer. Innbakt i industri 4.0 ligger også konsepter som *cyber-fysiske systemer*, *internet of things*, *cloud computing* og *digitale tvillinger*, hvor hovedfokuset er nye muligheter innen produksjon og vedlikehold.

Litteraturen innen vedlikeholdsoptimalisering produserer årlig et høyt antall modeller til bruk i optimalisering, men få av disse modellene brukes i praksis innen industrien. En av grunnene som trekkes frem er at tilgangen til statistiske data for estimering av modellparametere er begrenset. For å lykkes med å integrere sanntidsmodeller i praksis anbefaler derfor Vatn at det startes med et relativt lite sett standardiserte modeller for kritiske prosesser i verdikjeden til selskapet [\[Vatn, 2018a\]](#).

Industri 4.0 og prediktivt vedlikehold har de siste årene fått mer fokus innen både industrien og litteraturen. Det pekes ofte mot mangelfull tilgang til data som en av de største utfordringene for praktisk utnyttelse. Vi ønsker med denne oppgaven å bidra til å tette dette gapet ved å ta i bruk en etablert Markov-modell for modellering av degradering og tilstandsutvikling. Da korrosjon under isolasjon er et komplekst problem og bør ses både fra et økonomisk og sikkerhetsperspektiv, ønsker vi å inkludere begge disse perspektivene i analysen vår. Dette involverer å finne ut hvilke data som vil være nødvendige for etableringen av modellen, for så å se på mulighetene og utfordringene en slik modell gir, samt diskutere hvordan denne kan brukes i en industriell kontekst.

1.2 Målsetning

Hovedmålet med denne oppgaven er å demonstrere ulike vedlikeholdsstrategier av korrosjon under isolasjon. Vi ønsker å analysere mulighetene for å optimalisere vedlikeholdsstrategien i et valgt prosessanlegg, der målet er å redusere kostnaden og opprettholde eller forbedre dagens sikkerhetsnivå. For å oppnå dette, må følgende delmål oppnås:

1. Presentere vedlikeholdsteori og mulige modeller som kan anvendes for å nå oppgavens målsetning.
2. Presentere litteraturstudie som kartlegger teori og dagens status innen vedlikehold av KUI, PdM og digital tvilling.
3. Analyse av empiriske data og funn.
4. Utvikle og presentere en feilutviklingsmodell for bruk til å sammenligne ulike vedlikeholdsstrategier.
5. Modellere ulike vedlikeholdsstrategier.
6. Presentere og diskutere resultater.
7. Diskutere praktisk bruk, muligheter og eventuelle utfordringer med modellen som utvikles i oppgaven.

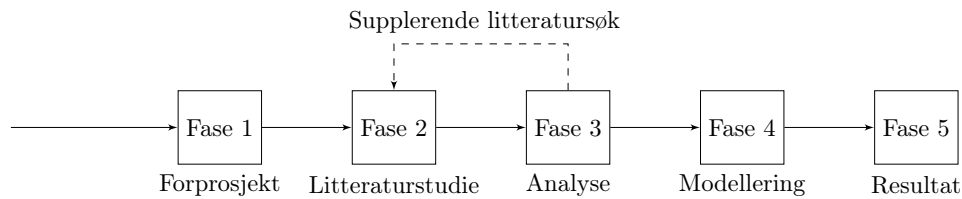
1.3 Fremgangsmåte

Undersøkelse og presentasjon av relevant teori ble en sentral del av oppgaven i startfasen. Videre ble litteraturstudie et hovedmoment, både for å kunne kartlegge dagens situasjon innen PdM og vedlikehold av KUI. Dette for å kunne si noe om utfordringene av implementering av moderne vedlikehold. Hovedmotivasjonen på et tidlig stadiet av oppgaven var å kartlegge i hvor stor grad PdM og industri 4.0 har blitt implementert i vedlikeholdsstrategier av korrosjon under isolasjon. En sentral del av dette ble også å kartlegge i hvor stor grad, og eventuelt hvilke degraderingsmodeller som ble brukt i dette arbeidet.

Neste steg i oppgaven ble å finne empiriske data som kunne brukes for å estimere degraderingsrater og videre brukes i modelleringen. Ulike selskap som jobber med inspeksjon og oppfølging av korrosjon under isolasjon ble kontaktet for et mulig samarbeid. Det ble deretter avtalt at Maintech AS kunne bistå med empiriske data fra et av deres anlegg. Tilgang til deres database ble opprettet, og analyse av disse dataene ble satt i gang. Dataene ble videre analysert og tilpasset parametere for videre bruk inn mot modelleringen. En allerede etablert Markov-tilstandsmodell ble i samarbeid med veileder tilpasset og oppdatert for bruk til modellering av degradering av KUI.

Det ble deretter også gjennomført supplerende litteratursøk i ulike databaser som *Oria*, *Onepetro* og *Scopus*, hvor fokuset var vedlikeholdsoptimalisering ved bruk av PdM. De empiriske dataene som ble brukt i oppgaven kan beskrives som ufullstendige, og en målsetning ble derfor å bruke litteraturen for å kunne supplere disse. Noen justeringer og antagelser av beregningen i dataanalysen ble videre gjort for ytterligere tilpasning til modellen og kostnadsperspektivet i oppgaven.

Siste del av oppgaven handler om analyse av resultat og presentasjon av funn. Praktisk bruk av modellen og anbefalinger for videre innsamling av empiriske data ble diskutert og drøftet.



Figur 1.1: Blokkdiagram som viser fremgangen i arbeidet

1.4 Oppgavens bidrag

Oppgavens bidrag vil være innenfor feltet "Sikkerhet, Pålitelighet og Vedlikehold". Bidraget vil være ved å undersøke og demonstrere metoder for analyse og bruk av empiriske data, til utvikling av vedlikeholdsmodeller som kan benyttes for beslutningsstøtte. Bidraget vil være fra et kostnads- og sikkerhetsperspektiv, sett fra et industrielt ståsted.

1.5 Avgrensninger

1.5.1 Case

Denne oppgaven vil konsentrere seg mot problematikken knyttet til KUI, et fenomen som oppstår på både rør, struktur, bolter og tanker. Utfordringen med KUI oppstår på de fleste materialtypene, uavhengig isolasjonssystem. Da oppgaven gjennomføres i løpet av 52 uker er det hensiktsmessig å begrense omfanget til de mest brukte rør- og isolasjonssystemene.

1.5.2 Tidsperiode

På grunn av den begrensende tidsperioden som arbeidet skal foregå i, er det ikke mulig å gjennomføre fullverdige tester av løsninger og modeller som utarbeides. Det er nærliggende å tro at en kan gjøre tilpasninger av modellen i etterkant av prosjektet.

1.5.3 Pensum og forkunnskaper

Denne oppgaven tar utgangspunkt i pensumet som er undervist i masterprogrammet. Dette i kombinasjon med at forfatterne ikke har bakgrunn fra temaet i denne oppgaven, er noe som kan ha innvirkning på de valgte løsningene.

1.5.4 Data

Det empiriske datagrunnlaget som Maintech bidrar med har varierende kvalitet. Grunnet dette har opphav fra en rekke inspeksjoner fra perioden 2013-2018, og kan være mangelfullt med tanke på inspeksjonspunkter, metoder, identifisering og kvalitet.

1.5.5 Modellering

Modellene som utvikles i denne oppgaven har potensiale for videreutvikling og ytterligere tilpasning til teorier innen vedlikeholdsoptimalisering.

1.6 Rapportens oppbygning

Opgaven er strukturert som figur [1.2](#) illustrerer.

Kapittel 1 presenterer oppgavens bakgrunn, problemstilling og målsetning. Leseren skal sitte igjen med forståelse for hva oppgaven ønsker å bidra med og finne ut av.

Kapittel 2 presenterer teori for å danne en grunnleggende forståelse av den teoretiske bakgrunnen for oppgaven. Her forklares grunnleggende vedlikeholdsteori, et supplerende litteratursøk for bedre forståelse av Risikobasert inspeksjon, prediktivt vedlikehold, digital tvilling, degradering for rørsystemer, og Markov modellering.

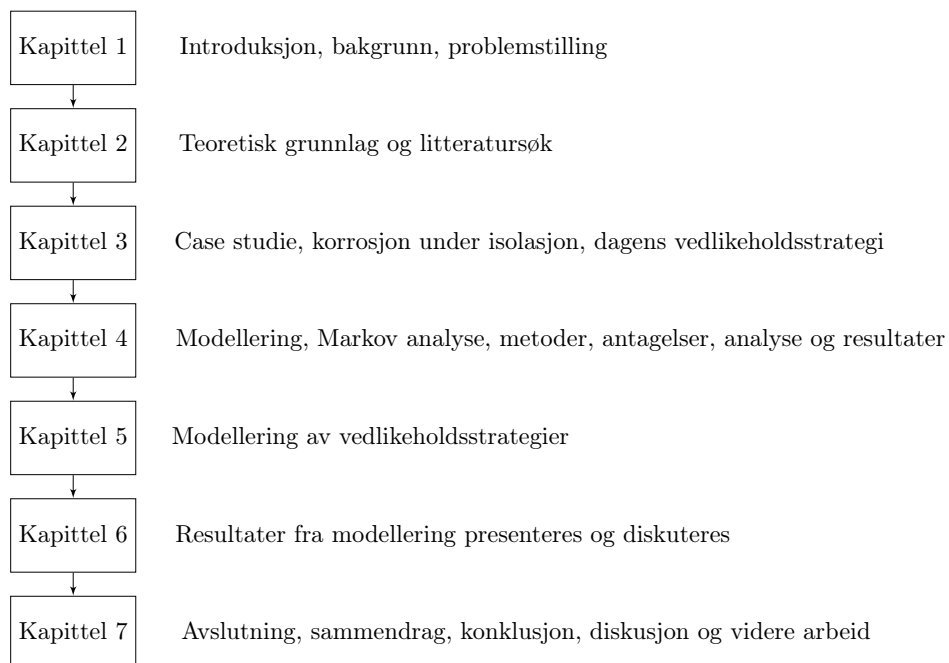
Kapittel 3 introduserer case studien for oppgaven. Dette inkluderer korrosjon under isolasjon, forutsetninger for KUI, og dagens vedlikeholdsstrategi.

Kapittel 4 tar for seg modellering og bruk av Markov analyse, beskriver metoder, antagelser, analyse og resultat for det empiriske datagrunnlaget brukt i oppgaven.

I kapittel 5 brukes Markov modellen for modellering av ulike vedlikeholdsstrategier.

I kapittel 6 presenteres og diskuteres resultatene fra modelleringen av ulike vedlikeholdsstrategier.

Kapittel 7 tar for seg avslutningen for oppgaven. Dette inkluderer sammendrag, konklusjon, diskusjon og anbefaling om videre arbeid.



Figur 1.2: Blokkdiagram som viser rapportens oppbygning

2 Teori

Dette kapitlet er todelt; første del presenterer grunnleggende teori om vedlikehold basert på pensum fra fagene i spesialiseringen "Sikkerhet, pålitelighet og vedlikehold". Dette vil danne det teoretiske grunnlaget for vedlikeholdsoptimaliseringen og det videre arbeidet i denne oppgaven. I andre del av kapitlet beskrives funnene fra gjennomført litteraturstudie. For å nå oppgavens målsetning var det nødvendig å utvide forståelsen og kompetansen rundt sentrale emner i oppgaven.

2.1 Teoretisk bakgrunn

I denne kapitlet beskrives sentrale begreper og tematikk hentet fra pensum. Dette er tema som danner grunnlaget for oppgavens målsetning.

2.1.1 Vedlikeholdsterminologi og målsetning med vedlikeholdsstyring

For å sikre at personer som leser denne oppgaven har etablert forståelse av sentrale definisjoner har vi valgt å ta utgangspunkt i NS-EN 13306:2017 for terminologi innen vedlikehold [Standard, 2018]. NS-EN 13306:2017 er en europeisk standard for vedlikeholdsterminologi, som også er oversatt til norsk. NS-EN 13306:2017 definerer vedlikehold som følgende:

"Kombinasjonen mellom alle tekniske, administrative og ledelsesaktiviteter som har til formål å gjenvinne, opprettholde eller forlenge en tilstand, som gjør en enhet eller en komponent i stand til å utføre en bestemt funksjon."

Andre viktige begreper som defineres i NS-EN 13306:2017 er:

- Pålitelighet: En komponents evne til å utføre en bestemt funksjon, under bestemte betingelser i en bestemt tidsperiode.
- Svikt: Defineres som en hendelse, eller tidspunktet en komponents evne til å utføre en spesifikk funksjon opphører.
- Feil: Defineres som en tilstand hvor en komponent ikke er i stand til å utføre en krevd funksjon, gitt at dette ikke skyldes planlagt vedlikeholdsaktivitet, fravær av eksterne ressurser eller andre aktiviteter.
- Feilmode: Defineres som en mulig feiltilstand hos en komponent om en krevd funksjon ikke er tilgjengelig, eller utføres tilfredsstillende.
- Tilgjengelighet: En komponents evne til å være i den tilstanden som er krevd for at den skal anses som korrekt, under bestemte forhold og at eksterne ressurser er tilgjengelige.

Videre definerer NS-EN 13306:2017 vedlikeholdsstyring, løst oversatt, som *prosessen som ivaretar en organisasjons ressurser, samtidig som kostnader og tidsbruk kontrolleres og optimaliseres for en maksimal effektivitet av produksjonen*. Hovedmålsetningene for vedlikeholdsstyring er i følge NS-EN 13306:2017 å sikre:

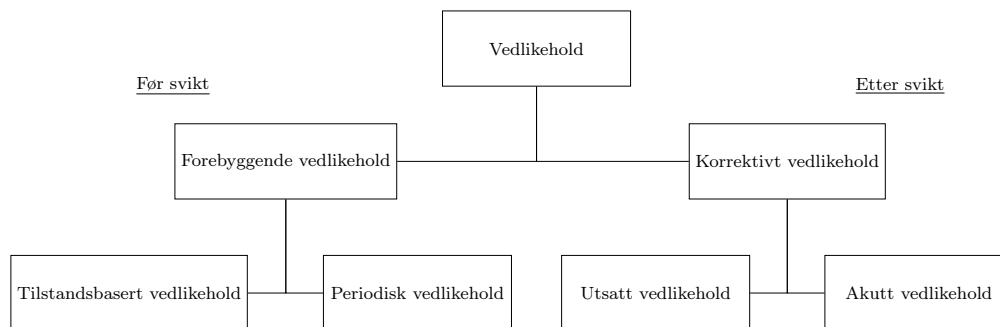
- Tilgjengelighet
- Sikkerhet
- Produktets kvalitet og produksjonsvarighet
- Miljømessige påvirkninger

2.1.2 Tradisjonelle strategier for vedlikehold

Tradisjonelt vedlikehold deles i NS-EN 13306:2017 inn i to hovedkategorier, forebyggende- og korrektivt vedlikehold.

Forebyggende vedlikehold defineres videre som vedlikehold som utføres i bestemte intervaller eller kriterier, og som har til formål å redusere sannsynligheten for svikt eller reduksjon av funksjon i utstyr. Eksempelvis visuell inspeksjon eller periodisk funksjonstest av utstyr.

Korrektivt vedlikehold defineres som vedlikehold som utføres etter at en komponent er i feiltilstand eller ikke kan utføre tiltenkt funksjon. Korrektivt vedlikehold har til hensikt å føre komponenten tilbake til en tilstand som gjør det mulig å utføre sin normale funksjon. De ulike strategiene er illustrert i figur 2.1 nedenfor.



Figur 2.1: Forebyggende vedlikehold til venstre, skjer før utstyrssvikt. Korrigerende vedlikehold til høyre, skjer etter utstyrssvikt

Metoden som velges har påvirkning på kostnad og må ses i sammenheng med målsetningene i vedlikeholdsstyringen. Riktig metode eller strategi, kan finnes ved å gjennomføre en RCM-analyse. En RCM-analyse systematisk metode hvor man ser på hovedfunksjoner til et system, bryter disse ned i tilhørende komponenter for så å bruke dette i en beslutningslogikk for å fastsette type vedlikehold [Vatn, 2018b].

Forebyggende vedlikehold sikrer at en kan holde drift i anlegget lengre enn andre typer vedlikehold. I tillegg til dette gir metoden lavere langsiktige kostnader og sikkerheten forbedres. Metoden har også noen negative sider sammenlignet med andre metoder. Forebyggende vedlikehold er mer komplisert å planlegge enn andre metoder, og den krever en høyere investering tidlig.

Korrektivt vedlikehold krever vesentlig mindre planlegging, og metoden er enkel å forstå. Ulempene med metoden er at svikt og stopp i anlegget er uforutsigbart og eventuelt føre til betydelige kostnader. Dette gjør også at metoden kan utgjøre en sikkerhetsrisiko for både ansatte og utstyr [Standard, 2018].

Ved å ta i bruk morgendagens vedlikeholdsstrategi, prediktivt vedlikehold, kan en nyte godt av fordelene fra både forebyggende- og korrektivt vedlikehold, samtidig som ulempene reduseres.

2.1.3 Prediktivt vedlikehold

De siste årene har vi sett at stadig flere bedrifter ser på en overgang fra tradisjonelt vedlikehold til prediktivt vedlikehold. Dette er en type vedlikehold som baserer seg på å forutsi utstyrets tilstand frem i tid. Dette er mulig ved hjelp av observasjoner, inspeksjoner, tilstandsmålinger og datadrevne analytiske modeller [\(DNV, 2019a\)](#).

Hovedmotivasjonen for prediktivt vedlikehold er at en kan forutsi når et utstyr vil svikte, og på den måten planlegge en reparasjon før det fører til kostbart utstyrshavari og produksjonsstans. Når en er i stand til å forutsi hvor lenge det er igjen til et utstyr svikter, kan en også optimalisere tidspunkt og ressursbruk for når reparasjonen skal finne sted.

Fordelene med PdM er mange, men metoden har også noen store ulemper. Den mest sentrale delen av prediktivt vedlikehold, som også er den vanskeligste, er å utvikle prediktive matematiske modeller. I hovedsak må du utvikle en modell som kan behandle flere ulike variabler, samt hvordan disse påvirker hverandre.

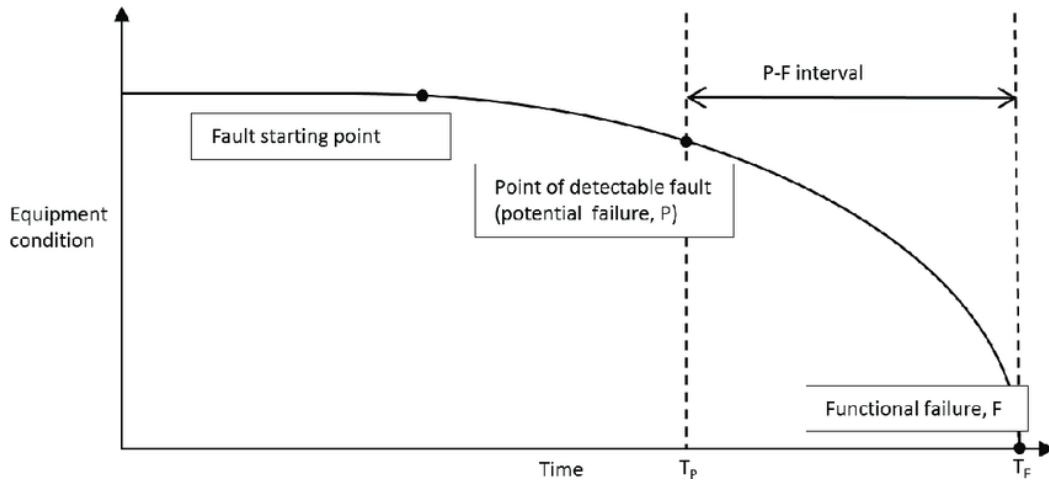
2.1.4 Modellering av feilutvikling

For komponenter hvor feilutvikling kan observeres, eller at tap av funksjon kan måles, kan feilutviklingen modelleres. Inspeksjon av feilutvikling eller funksjon er en naturlig vedlikeholdsstrategi for en slik feilutvikling. Slike modeller kan benyttes til beslutningsstøtte for vedlikeholdsstrategi. Eksempler på dette kan være måling av veggtykkelse på rør og rørsystemer, som følge av korrosjon. [\(Vachtsevanos et al., 2020\)](#) deler modellering av feilutvikling inn i følgende tre typer:

1. Modellbasert prognose: Gjenværende levetid, RUL, beregnes med utgangspunkt i en matematisk degraderingsmodell.
2. Databasert prognose: Degradering detekteres og beregnes ved hjelp av data fra inspeksjoner eller målinger. Bayesiske nettverk og Markov-analyse tilhører denne kategorien.
3. Erfaringsbaserte prognoser: Gjenværende levetid, RUL, beregnes med utgangspunkt i pålitlighetsmodeller utviklet ved bruk av empirisk og/eller statistisk data. Denne fremgangsmåten har likhetstrekk med databasert fremgangsmåte.

2.1.4.1 PF-modell

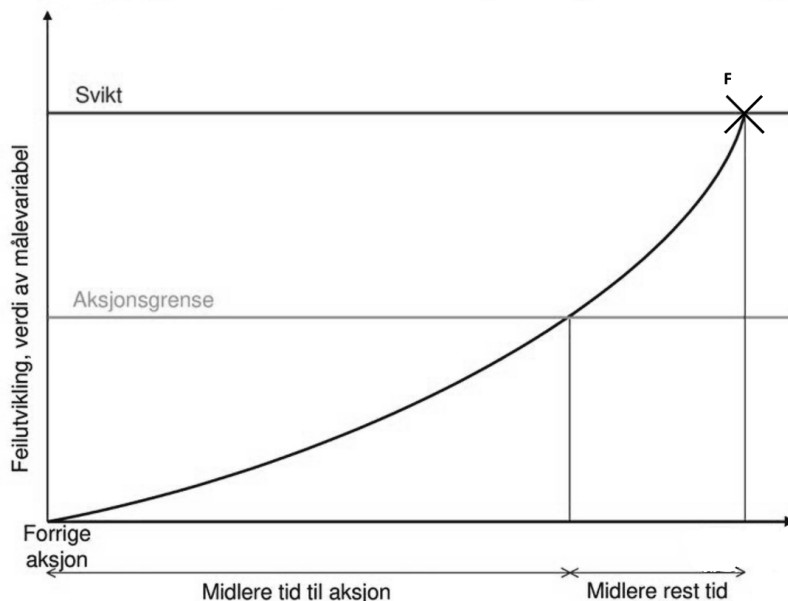
PF-modellen er et eksempel på en modell som brukes for å modellere observerbar feilutvikling. Figur 2.2 viser en klassisk PF-modell. Modellen brukes gjerne der en i en lange perioder ikke har observerbar feilutvikling, for deretter å gå inn i en periode hvor feilutviklingen skjer i et raskere tempo. Det tidspunktet hvor feilutviklingen er først observerbar, betegnes som en potensiell feil, T_p i figur 2.2. Tidspunktet for en eventuell svikt betegnes som en feil, T_f i figur 2.2. PF-intervallet er en stokastisk variabel som betegner tiden mellom en observerbar feilutvikling og tidspunktet for utstyrssvikt [Vatn, 2018b].



Figur 2.2: Eksempel på en PF-modell [Selvik and Ford, 2017]

2.1.4.2 Observerbar gradvis feilutvikling

Det finnes også situasjoner hvor feilutviklingen utvikler seg fra tid $t = 0$, og fortsetter i samme tempo jevnt til systemet eller enheten går til svikt dersom den ikke vedlikeholdes eller skiftes ut. Denne situasjonen kan også modelleres, og en Markov-tilstandsmodell som presenteres i kapittel 2.1.5 kan være en nyttig modell for denne situasjonen. Figur 2.3 viser et eksempel på en observerbar gradvis feilutvikling, med vedlikeholds grense og sviktgrense [Vatn, 2018b].



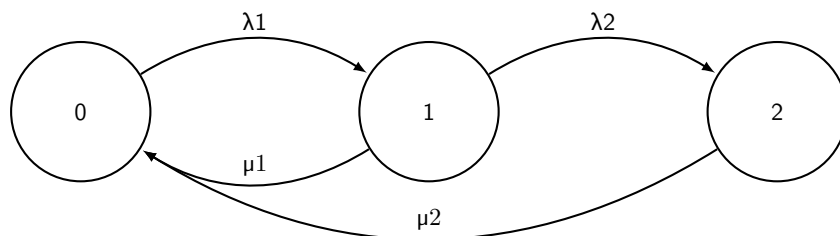
Figur 2.3: Observerbar gradvis feilutvikling. Vedlikeholdsgrensen er ved aksjonsgrensen.

2.1.5 Markov-analyse

Markov-analyse er en vellegnet metode når en skal analysere påliteligheten til et system som funksjon av tid. Fordelen med en markov-analyse, er at en kan analysere systemer med flere enn to systemtilstander [Rausand and Høyland, 2004]. Metoden kan derfor brukes når en skal analysere prosesser som ikke kan modelleres ved hjelp av andre metoder. I en Markov-analyse avhenger overgangen mellom tilstandene kun av nå-tilstand, og ikke hvor lenge et system har vært i en tilstand eller hvordan systemet tidligere har forflyttet seg mellom tilstandene. Dette gjør Markov-analyse til en god metode for å analysere påliteligheten til systemer med feilmekanismer som utvikles og påvirker tilgjengeligheten over lengre tidsperioder. [Vatn, 2018b]

En Markov-prosess er en type stokastiske prosess som inneholder Markov-egenskaper. At prosessen bygger på stokastiske variabler betyr at alle forflytninger mellom tilstander, eller om systemet blir værende i nåværende tilstand, avhenger av tilfeldige sannsynligheter som følge av en sannsynlighetsfordeling. Forflytninger mellom tilstander kalles overganger, som alle har en overgangssannsynlighet knyttet mot seg. Disse forteller om sannsynligheten for at tilstanden skal forandre seg innenfor et gitt tidsrom. Målet er i tillegg å gjøre kvalitative beregninger av hvor ofte de ulike tilstandene besøkes, gjennomsnittlig tid systemet er i de ulike tilstandene, og hvor lang tid det i gjennomsnitt tar før systemet besøker en kritisk tilstand [Vatn, 2018b].

Figur 2.4 viser et eksempel på hvordan feilutvikling i et Markov-diagram kan se ut, med overgangen mellom tilstandene 0, 1, og 2. Der tilstand 0 er 'ny', og tilstand 1 og 2 er feiltilstand. λ representerer sviktrate, og μ er reparasjonsrate.



Figur 2.4: Viser eksempepl på et Markov-diagram

For stokastiske degraderingsprosesser hvor prosessen har Markov-egenskaper, kan vi angi de ulike tilstandene i systemet som x_0 til x_r , hvor x_0 er i "ny" tilstand, og x_r er feiltilstand. Dette intervallet kan vi angi som $\{X(t), t \in \theta\}$, der mengden θ betegner indeksemengden av prosessen, og for hver indeks t , betegner $X(t)$ tilstanden til prosessen ved tid t . [Vatn, 2018b](#)

Ved hjelp av numerisk integrasjon av standard Markov-ligninger kan vi finne sannsynligheten for at systemet er i en tilstand ved et gitt tidspunkt, t . [Vatn, 2018b](#)

$$P_i(t + \Delta t) \approx P_i(t)(1 - \lambda_i \Delta t) + P_{i-1}(t)\lambda_{i-1} \Delta t \quad (2.1)$$

Videre kan vi finne MTTF, Mean time to failure, ved å integrere ligning 2.1

$$MTTF = \int_{t=0}^{\infty} 1 - Pr(t) dt \quad (2.2)$$

Når ligning 2.1 skal brukes i en degraderingsmodell som tillater overganger til vilkårlige tilstander, må en definere matriser med de definerte tilstandene. Dette resulterer i Markovs differensial-ligninger:

$$\mathbf{P}(t) \cdot \mathbf{A} = \dot{\mathbf{P}}(t) \quad (2.3)$$

Dette leder videre til ligning 2.4

$$\mathbf{P}(t + \Delta t) \approx \mathbf{P}(t)[\mathbf{A}\Delta t + \mathbf{I}] \quad (2.4)$$

$\mathbf{P}(t)$ - sannsynlighetsvektor for de ulike tilstandene som er definert i overgangsmatrisen \mathbf{A}

$\dot{\mathbf{P}}(t)$ - tidsderivert sannsynlighet

\mathbf{A} - overgangsmatrisen beskriver overgangsratene mellom systemts tilstander. Matrisen beskriver også reparasjonsratene i systemet.

\mathbf{I} - identitetsmatrise

Videre kan disse differensialligningene benyttes når en skal bestemme sannsynlighet for at et system er i en bestemt tilstand [Vatn, 2018b](#).

Markov-modellen er en fleksibel modell som kan tilpasses til et stort antall systemer. I motsetning til andre modeller er den relativ enkel og kan benyttes til modellering av systemer med et

stort antall tilstander. En kan også inkludere inspeksjons- og reparasjonsregimer inn i modellen, og på den måten få en bedre forståelse for systemet.

Når en skal modellere et system ved hjelp av Markov, krever metoden at en innehar gode data for hvordan systemet oppfører seg og degraderes som funksjon av tid. Markov-modellen er også best egnet der systemet oppfører seg med Markov-egenskaper.

2.1.6 Sannsynlighetsfordelinger

De to mest brukte sannsynlighetsfordelingene i denne sammenhengen Weibull- og eksponentialfordelingen. Levetider for komponenter som er utsatt for aldring er ofte Weibull-fordelte, mens komponenter med konstant sannsynlighet for svikt er ofte eksponentialfordelte. Sannsynlighetsfordelinger er uttrykt ved $f(t)$. [Vatn, 2018b](#).

Eksponentialfordelingen er uttrykt ved:

$$fX(x) = \lambda e - (\lambda x) \quad (2.5)$$

Weibull-fordelingen er uttrykt ved:

$$fX(x) = \alpha \lambda (\lambda t)^{\alpha} - 1 e - (\lambda t)^{\alpha} \quad (2.6)$$

α = alpha, og referer til aldringsparameteren

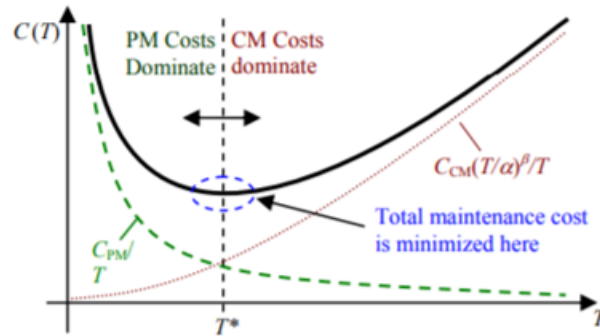
λ = lambda, og referer til feilrate i eksponential fordelingen, og som lokasjonsparameter i Weibull fordelingen [Rausand and Høyland, 2004](#).

2.1.7 Vedlikeholdsoptimalisering

Vedlikeholdsoptimalisering er et av flere fagområder innen vedlikeholdsstyring som har som mål å bidra til høy tilgjengelighet, sikkerhet, inntjening, redusere energiforbruk og redusere utslipp til miljøet.

Vedlikeholdsoptimalisering er et fagfelt innen operasjonsanalyse som tar for seg kvantitative metoder for bruk i utarbeidelse av vedlikeholdsstrategier. Økonomiske aspekter dominerer for det meste metodene som benyttes. De første vitenskapelige tilnærmingene til vedlikeholdsoptimalisering stammer fra 1950- og 1960-tallet hvor det ble startet forsøk på å redusere feil og ikke planlagt nedetid for systemer. Etter at tidsbasert og tilstandbaserte løsninger hadde vært ledende, startet flyindustrien på 60-tallet med det vi i dag referer til som pålitelighetsbasert vedlikehold. Etter hvert ble dette en foretrukket metode også i andre industrier, og er i dag en av de ledende metodene innen vedlikeholdsprogram for å ivareta både kostnader, sikkerhet, og tilgjengelighet for et system [Dekker, 1996](#). Målet med vedlikeholdsoptimalisering er å balansere fordeler og ulemper, ved å utføre vedlikehold, ved bruk av matematiske modeller som tar for seg balansen mellom kostnader, og fordeler relatert til vedlikehold og sviktsannsynlighet, for å finne den optimale løsningen som samtidig også minimerer kostnader [Vatn, 2018b](#)

Da vedlikeholdsoptimalisering i mange tilfeller handler om å minimere både forebyggende- og korrigerende vedlikeholdskostnader, blir dette som regel gjort som funksjon av vedlikeholdsintervallet, τ . Se figur [2.5](#)



Figur 2.5: $C(T)$ er total kostnad som funksjon av vedlikeholdsintervall. PM er forebyggende- og CM er korrektivt vedlikehold [Tutt, 2012]

Figur 2.5 illustrerer balansegangen mellom forebyggende- og korrigerende vedlikeholdskostnader. For et kort vedlikeholdsintervall vil de forebyggende kostnadene være høye, mens de korrigerende vil være lave. Motsatt er det ved lengre vedlikeholdsintervall; de forebyggende kostnadene er lave, mens de korrigerende kostnadene vil være høye, som et resultat av at feilraten øker. Den optimale løsningen for et vedlikeholdsintervall, vil være på det laveste punktet for de totale vedlikeholdskostnadene, hvor både korrigerende- og forebyggende kostnader minimeres som en funksjon av tau [Vatn, 2018b].

2.1.8 Intervall og kostnadsfunksjon

For modellering av vedlikeholdsoptimalisering vil kostnadsfunksjoner og beregning av effektiv feilrate måtte tilpasses den enkelte problemstilling. Vatn (2018) og Rausand og Høyland (2004) presenterer ulike måter dette kan gjøres på. Ifølge Vatn (2018) kan en basis tilnærming for kostnadsfunksjonen skrives på følgende form

$$C(\tau) = \frac{C_{PM}}{\tau} + \lambda_E(\tau) \times [C_{CM} + C_{EP} + C_{ES} + C_{EM}] \quad (2.7)$$

τ = vedlikeholdsintervall

λ_E = effektiv feilrate

C_{PM} = kostnad for forebyggende vedlikehold

C_{CM} = kostnad for korrektivt vedlikehold

C_{EP} = forventet produksjonstap ved en svikt

C_{ES} = forventet sikkerhetstap ved en svikt

C_{EM} = forventet materielltap ved en svikt

Med dette kan vi lese at det optimale vedlikeholdsintervallet, τ , er det som minimerer total kostnaden $C(\tau)$. Vatn (2018) illustrerer flere ulike matematiske metoder som kan brukes for å finne den minimale verdien av tau.

2.2 Litteraturstudie

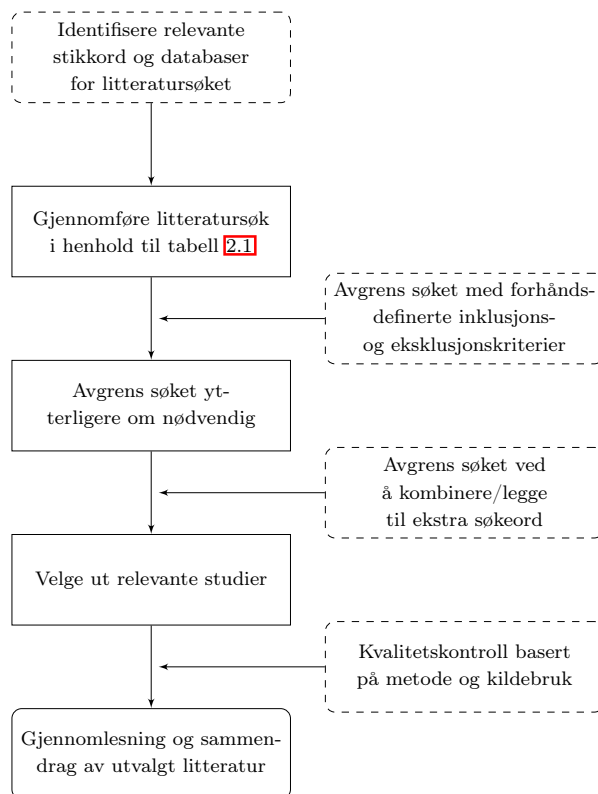
Kapittel 2.1 presenterer grunnleggende vedlikeholdsteori hentet fra pensum relatert til utdanningen. For å få mer kunnskap om prediktivt vedlikehold, Markov-analyse og bruken av digital tvilling, ble det gjennomført et systematisk litteratursøk i startfasen av oppgaven. I denne fasen av oppgaven var prediktivt vedlikehold og bruken av digital tvilling ment å bli viet mer oppmerksomhet enn det gjorde.

Tabell 2.1: Eksempel på et litteratursøk som ble gjennomført på Oria, Scopus og OnePetro

Database	Søkeord	Avgrensning	Antall treff
Oria	Corrosion under insulation + Predictive maintenance	2010-2021	434
	Markov model + Pipe+Corrosion under insulation	2010-2021	53
	Digital twin + Predictive maintenance + Corrosion under insulation	2010-2021	31
	Digital twin + Markov model + Corrosion	2010-2021	71
	Predictive maintenance + Markov model + Corrosion	2010-2021	313
Scopus	Corrosion under insulation + Maintenance	2010-2021	63
	Markov model + Predictive maintenance	2010-2021	121
	Digital twin + Markov model	2010-2021	41
	Corrosion under insulation + Markov model	2010-2021	2
OnePetro	Corrosion under insulation + Predictive maintenance + Digital twin	2010-2021	25
	Corrosion under insulation + Predictive maintenance + Markov model	2010-2021	6
	Markov model + Corrosion under insulation	2010-2021	8
	Predictive Maintenance + Markov model	2010-2021	165

Tabell 2.1 presenterer tre utvalgte databaser samt søkeord som ble benyttet i søket. *Corrosion under insulation*, *Markov model*, *Digital twin* og *Predictive maintenance* er fire essensielle stikkord for oppgaven, og det ble derfor lagt fokus på disse gjennom flere litteratursøk. De fleste søkene som ble gjennomført hadde et stort antall treff, og det var nødvendig å utvikle en strategi for å velge ut relevant litteratur.

Som Tabell 2.1 viser, ga flere av søkene et stort antall treff. Det var derfor nødvendig å utvikle en strategi for å velge ut relevant litteratur. Figur 2.6 viser et flytskjema som ble utviklet for å finne frem til relevant litteratur. Det var også nødvendig å utvikle både inklusjons- og eksklusjonskriterier for å avgrense treffene. *Corrosion under insulation*, *Markov-modelling*, *Digital twin* og *Predictive maintenance* ble alle søkt på hver for seg, men også i kombinasjon med hverandre slik som tabell 2.1 viser. Dette ga oss gode treff som benyttes videre i dette kapittelet.



Figur 2.6: Flytskjemaet viser hvordan fremgangsmåte som ble benyttet i litteraturstudiet

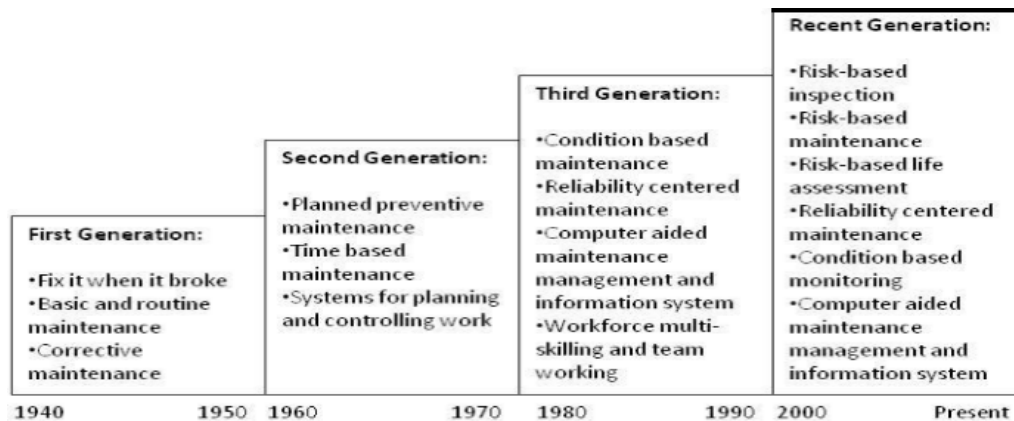
Videre i gjennomgangen av litteratur ble følgende metode for gjennomgang av relevante treff fra søkeprosessen utarbeidet.

1. Alle relevante treff ble lest gjennom og vurdert som relevant eller ikke relevant.
2. De som ble ansett som relevant ble så sendt videre til medforfatter for diskusjon og avgjørelse om inkludering eller ekskludering.
3. Eksempler på inklusjonskriterier som ble brukt er: Bruk av sensorer, rørsystemer, modellering av degradering, inspeksjon, industri 4.0, vedlikeholdsstrategi, vedlikeholdsoptimalisering.
4. Eksempler på eksklusjonskriterier som ble brukt er: Maskiner, pumper, feil utstyr, feil materialer, målinger av vibrasjon, roterende utstyr.
5. Alle treff som ble ansett som relevante ble tildelt en karakter for relevans tilknyttet de ulike aspektene inkludert i litteratursøket.
6. Alle artikler ansett som relevante ble lagret og prioritert etter karakter.
7. Notater fra alle artikler samlet under en hovedkategori for hvert aspekt inkludert i litteratursøket.
8. Artiklene ble så vurdert, og gitt prioritering ut fra endelig relevans, for inkludering i oppgaven.
9. Artikler med høyest prioritering inkludert i oppgaven.

2.3 Litteraturgjennomgang

2.3.1 Vedlikehold av KUI

Parallelt med utviklingen innen industrien og teknologiske nyvinninger har også vedlikeholdsstrategien utviklet seg. Figur 2.7 viser hvordan vedlikeholdsstrategien har utviklet seg fra kun å drive med korrektivet vedlikehold til dagens sofistikerte metoder der tilstandsovervåkning, sensorteknologi, risiko, sannsynlighet og utstyrspålitelighet danner grunnlaget for vedlikeholdet. Utviklingen har i stor grad blitt presset fremover av ønske om å øke effektivitet og lønnsomhet (Arunraj and Maiti, 2007).



Figur 2.7: Utvikling av vedlikeholdsstrategi fra 1940 - dags dato (Arunraj and Maiti, 2007)

Figur 2.7 viser hvordan dagens vedlikeholdsstrategi også baserer seg på risikobasert inspeksjon, RBI. Denne metoden blir i hovedsak benyttet på statisk utstyr som for eksempel korrosjon under isolasjon (Arunraj and Maiti, 2007). Begrepet risiko beskriver "hendelser som kan inntreffe som har konsekvenser for noe som er av verdi for oss mennesker. Konsekvensene kan være knyttet til for eksempel liv og helse, miljø eller økonomiske verdier. Der er alltid minst ett utfall som oppfattes som negativt eller uønsket." (SNL, 2019), men fra teorien kan vi ofte lese at risiko er produktet av sannsynligheten for svikt og sannsynlige konsekvenser. Innen vedlikehold benyttes risiko for å bestemme hvor og når en skal drive vedlikehold for å begrense risiko, forekomst og konsekvens av feil som oppstår.

Når en planlegger inspeksjonsintervall ved av KUI, er det sannsynligheten for svikt det som avgjør intervallet (Giribone and Valette, 2014). Sannsynlighet for svikt er sentralt innen RBI og vedlikehold av KUI. Sannsynligheten defineres som gjennomsnittsfrekvensen eller frekvensen av for eksempel lekkasje eller rørbrudd (Giribone and Valette, 2014).

Når en skal bestemme sannsynlighet for lekkasje, kan det baseres på både kvalitative- og kvantitative metoder. Ved en kvalitativ vurdering av sviktsannsynlighet benytter en i hovedsak tekniske vurderinger og ekspertuttalelser for å beskrive sannsynligheten. For at denne vurderingen skal benyttes konsekvent er det essensielt å definere kriterier for at sannsynligheten plasseres inn i kategorier fra "svært usannsynlig" til "høyst sannsynlig". Innspill fra eksperter kan være verdifullt innen kvalitativ vurdering, men det kan også være kilde til tilfeldighet og usikkerhet da subjektive meninger kan påvirke resultatet (Arunraj and Maiti, 2007).

Sannsynligheten for lekkasje kan også baseres på en semikvantitativ metode. Denne metoden

er en blanding av kvalitativ- og kvantitativ metoden, der hovedvekten bør legges på numeriske data. *American Petroleum Institute* har i en årrekke hatt veletablerte retningslinjer for metoden [API, 2016], men de senere årene har både DNV og *European Committee for Standardization* lansert retningslinjer for metoden [DNV, ud]. Metodens numeriske datagrunnlag hentes fra flere ulike kilder, både fra litteraturen og vedlikeholdsdata fra ulike bransjer, anlegg eller bedrifter. Dette er noe som kan avvike fra reell sviktsannsynlighet, da datagrunnlaget hentes fra ulike kilder som kanskje ikke representerer de faktiske forhold.

Fullkvalitativ metode er også et alternativ når en skal bestemme sannsynligheten for lekkasje. Metoden baserer seg kun på faktiske data som er samlet inn, for eksempel historiske data eller inspeksjonsdata hentet fra vedlikeholdssystemet. Dataene blir videre analysert ved hjelp av matematiske modeller, logiske skjema eller andre modeller. Metodens største svakhet er at den baserer seg på historiske data, noe som det kan være begrenset tilgang på [Khan and Haddara, 2003].

2.3.2 Prediktivt vedlikehold

De siste årene har litteraturen rundt prediktivt vedlikehold hatt en økende trend. Flere studier har kartlagt hvilke metoder som er, eller kan implementeres for prediktivt vedlikehold innen dagens industri. [Coand et al., 2020] [Selcuk, 2016] [Wegener, 2020] flere ulike løsninger, med ulike analysemetoder og algoritmer blir presentert. Men felles for metodene var at de alle hadde et felles mål om å fastslå mulig degradering eller begynnende feil. Målet var at dette skulle brukes som beslutningsstøtte ved planlegging av vedlikehold, og på den måten sikre høy effektivitet og lavest mulig kostnad. Prediktivt vedlikehold omtales her som intelligent vedlikehold, og de mener at det bare er snakk om tid før det utvikles metoder som er overlegne sammenlignet med dagens vedlikeholdspraksis. Sanntidsovervåking omtales som grunnpilaren for å kunne utnytte prediktive vedlikeholdsstrategier til det maksimale. Dataprosessering og analyse av dataene som samles inn trekkes også frem som den største utfordringen for implementering.

[Park, 2016] mener at 30% av alle vedlikeholdskostnader forårsakes av mangelfull planlegging, og at prediktivt vedlikehold kan være en del av løsningen for å få denne kostnaden lavere. [Selcuk, 2016] tok for seg implementering av prediktivt vedlikehold for forbedring av vedlikeholdsstrategier for en fabrikk. Han peker på tekniske aspekter som hvilket utstyr og hvordan dette kan tilstandsovervåkes som en del av en prediktiv vedlikeholdsstrategi. Utfordringene som trekkes frem er behovet for beslutningsstøtteverktøy for å håndtere dataene som blir samlet inn [Selcuk, 2016].

2.3.3 Digital tvilling

Innen industri 4.0 og prediktivt vedlikehold er det ofte snakk om det relativt nye begrepet, digital tvilling. Det finnes ingen eksakt definisjon av en digital tvilling. Definisjonen varierer ut fra hvilket felt den blir brukt i, og i hvilken kontekst. Basert på litteratursøket har vi kommet frem til noen definisjoner vi vil trekke frem for å beskrive hva en digital tvilling er.

[Liu et al., 2020] startet med å definere en digital tvilling som *modellering og simulering med høy troverdighet, uten sanntids kontakt med det fysiske objektet*. Etter hvert har definisjonen av en digital tvilling gradvis inkludert toveis kommunikasjon og kartlegging av det fysiske objektet, og de konkluderer med at en digital tvilling er en *digital enhet som reflekterer den fysiske enhetens oppførsel, som kontinuerlig oppdateres gjennom hele livssyklusen*.

[Trauer et al., 2020](#) beskriver tre karakteristikk som en digital tvilling må inneholde. De mener at den må:

- Være en virtuell dynamisk representasjon av den fysiske enheten eller systemet.
- Være automatisk toveis datakommunikasjon mellom den digitale tvillingen og systemet.
- Inneholde data fra alle faser av enhetens eller systemets livssyklus.

Basert på dette presenterer de følgende definisjon:

"En digital tvilling er en virtuell dynamisk representasjon av et fysisk system, som er koblet sammen gjennom hele livssyklusen, for toveis data utveksling."

Fra disse definisjonene kan vi si at en digital tvilling er en digital modell av en fysisk enhet eller et system, laget for å simulere faktisk oppførsel i sanntid fra den reelle verden. Målet og funksjonen til den digitale tvillingen er at den reelle verden skal analyseres, optimaliseres og forutses ved bruk av digitale hjelpemidler. Den digitale tvillingen blir på denne måten et bindeledd mellom den reelle og den virtuelle verden.

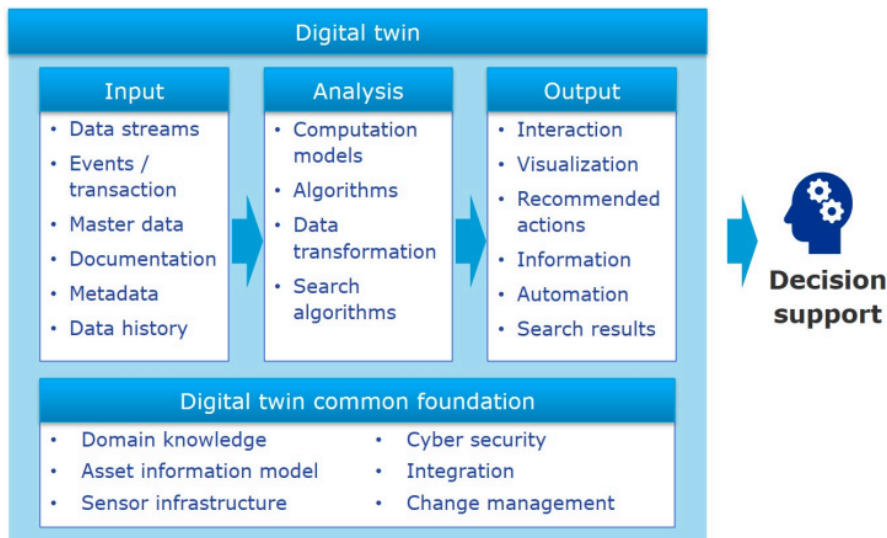
Siden digitale tvillinger er på full fart inn i industrien og har som mål å påvirke beslutninger som tas; har DNV laget en standard for anbefalt praksis. Hensikten er å sikre at digitale tvillinger fungerer som spesifisert og at de er pålitelige. Hovedmålsetningen med standarden er å beskrive en strukturert og systematisk prosess for utvikling, samtidig som den skal angi krav for kvaliteten og påliteligheten til digitale tvillinger. Dette med mål om å forsikre troverdige resultat fra digitale tvillinger [\(DNV, 2020b\)](#). Hovedfokuset er at digitale tvillinger skal bidra i beslutningsstøtte, og på den måten bidra til forbedring og støtte av virksomhetens beslutninger innenfor økonomi- og ressursstyring.

Fra litteraturen finner vi at digitale tvillinger blir benyttet til en rekke ulike formål. Blant annet blir det benyttet i sanntidsberegning av gjenværende levetid for strukturer på brokraner [\(Dong et al., 2021\)](#), der sanntidsdata samles inn fra ulike kilder. Videre ses informasjonen i sammenheng med geometriske egenskaper, lasttilstand, servicekarakteristikk og sviktmekanismer. Ved bruk av denne informasjonen dannes styrke, feilanalyse og livssyklusmodeller, som videre gir grunnlag for å si noe om unormale forhold og gjenværende levetid i kranstrukturen. Resultatet av dette er at den digitale tvillingen kan si noe om utvikling av sprekke-dannelser og forbedre beregningseffektiviteten, som igjen endrer de tradisjonelle inspeksjonsintervaller.

DNV har også laget en definisjon av digital tvilling. Deres definisjon er som følger [2.8](#)

"En digital tvilling er en virtuell representasjon av et system eller en enhet, som kalkulerer systemtilstander og gjør ulike systemtilstander tilgjengelige gjennom integrerte modeller og data, med hensikten og gi beslutningsstøtte gjennom hele livssyklusen."

Fra DNVs definisjon kan vi lese ut at en digital tvilling består av input, analyse og toveis datautveksling som skal gi beslutningstøtte. Figur [2.8](#) illustrerer dette:

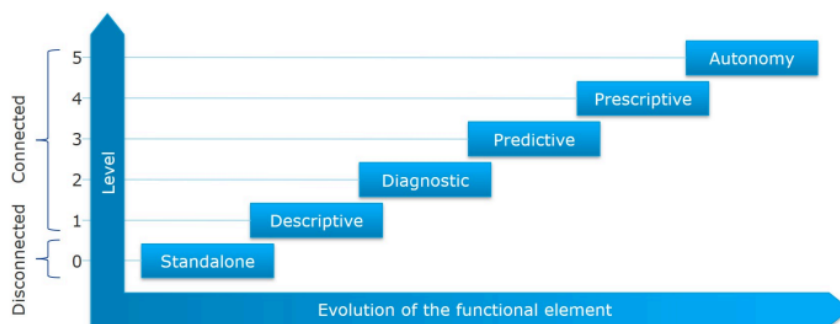


Figur 2.8: Elementer i en digital tvilling [DNV, 2020b]

Videre deler standarden digitale tvillinger inn i funksjonelle elementer, FE. Funksjonelle elementer defineres som:

"En del eller en modul av en digital tvilling som har den hensikt å gi brukeren beslutningsstøtte i avgjørende beslutninger."

Hvert funksjonelt element kategoriseres inn i ulike kapasitetsnivåer, hvor kapasiteten øker for hvert nivå. Hvert kapasitetsnivå bør implementeres for alle funksjonelle nivåer, da en digital tvilling kan inneholde funksjonelle elementer på alle nivåer. Kapasitetsnivåene kan brukes for å beskrive ambisjonsnivået, og hva den nåværende kapasiteten er. Figur 2.9 illustrerer dette:



Figur 2.9: De ulike FE-nivåene som DNV har definert [DNV, 2020b]

De seks ulike kapasitetsnivåene er beskrevet som følgende fra [DNV, 2020b]:

- 0: Frittstående. Den fysiske enheten eksisterer nødvendigvis ikke, og ingen data er tilgjengelig fra enheten. De funksjonelle elementene kan beskrive og forutse systemtilstander og oppførsel basert på manuelle data.
- 1: Beskrivende. Det funksjonelle elementet kan beskrive den nåværende tilstanden for systemet eller enheten. Samtidsdata er tilgjengelig fra enheten og kan beskrive det faktiske sys-

temet ved å angi status, alarmer og hendelser. Det kan også angi informasjon om nåværende og historiske tilstander.

- 2: Diagnostisk. Det funksjonelle elementet kan angi diagnostisk informasjon som tilstandsindikatorer og støtte brukeren med tilstandsmålinger, feilmålinger og feilsøking.
- 3: Prediktiv. Det funksjonelle elementet kan forutsi systemets fremtidige tilstander, ytelse og gjenværende levetid (RUL). Tilstandsindikatorer blir ytterligere vektlagt for å gi støtte for prognostisering.
- 4: Forskrivende. Det funksjonelle elementet kan gi anbefalte handlinger basert på tilgjengelige forutsetninger. Det kan også optimalisere fremtidige handlinger ved å evaluere påvirkningen for hver handling, innenfor systemets begrensninger.
- 5: Autonom. Det funksjonelle elementet kan erstatte brukeren ved å ta selvstendige valg og ta kontroll over handlingene for systemet autonomt.

Bruken av digitale tvillinger er spesielt nyttig i prediktivt vedlikehold. Digitale tvillinger vil kunne redusere behovet for inspeksjoner i felten, og kan gi et bedre estimat på gjenværende levetid til utstyret. Dette vil kunne bidra med lavere total kostnader, redusere risiko og bidra til mer effektive løsninger for administrasjon av ressurser [Bhalla, 2019]. Selv om det har vært mye snakk om digital tvilling, er de fortsatt ikke en veletablert praksis innen industrien. En av grunnene til dette er at kostnader og ressurser for å planlegge, utvikle, implementere og drifte digitale tvillinger har vært høy. Selv om sensorer og andre hjelpemidler har blitt billigere de siste årene, vil teknologiene som brukes for å overføre og behandle data kreve utvikling og tilpasning for å kunne implementeres og brukes [Bhalla, 2019].

2.3.4 Degraderingsmodeller for rørsystemer

Inn mot prediktivt vedlikehold og digitale tvillinger er det også viktig å ha gode, matematiske modeller som beskriver degraderingsprosessen av utstyret. Når en skal utvikle slike modeller, kan en starte med å definere sviktsannsynligheten. Når en skal bestemme sviktsannsynlighet i rørsystemer finnes det flere ulike metoder. Fra litteraturen kan vi lese at sannsynligheten blant annet estimeres kvantitativt ved hjelp av statistikk fra databaser eller vedlikeholdssystem [Fleming and Lydell, 2004]. Den store svakheten med en statistisk tilnærming er at databasens datagrunnlag kan ha varierende kvalitet og verifikasjon av dataene. Fleming og Lydell mener at denne mangelen på verifikasjon og validering kan påvirke kvaliteten til sviktsannsynligheten, noe som er metodens største utfordring. De mener også at metoden i stor grad lider av det faktum at vedlikehold, kvalitet i arbeidet, klima og ytre påkjenninger påvirker dataene som genereres, og derfor er datagrunnlaget kanskje ikke relevant for alle applikasjoner.

Den enkleste metoden for å bestemme sviktfrekvens i rørsystemer er å basere den på innsamlet data fra ulike organisasjoner som arbeider med rørsystemer. Ofte er feilene definert som lekkasje eller brudd i ytterveggen på røret. Datagrunnlaget hentes fra store anlegg, bransjer, organisasjoner, kommersielle databaser eller litteraturen. Det er utarbeidet standardiserte lekkasjefrekvenser for ulike rørsystemer, disse kan sees i referansene [Simola et al., 2004] og [API, 2016].

Da sviktfrekvenser hentet fra databaser kan være både manglende og av dårlig kvalitet finnes det alternative fremgangsmåter. Det å analysere nedbrytningsraten av metall kan være nyttig for å analysere når rørsystemer vil gå over i sviktet tilstand. Meeker og Escobar har skrevet en omfattende guide om nedbrytningsrate [Meeker and Escobar, 2014], og de mener at analysen har

stort potensiale for beregning av pålitelighet. Fremgangsmåten krever at en har nedbrytningsdata som implementeres inn i en egnet modell.

Det finnes en rekke ulike modeller som er utviklet innen pålitelighet. Linære nedbrytningsmodeller har i litteraturen blitt benyttet til mange formål, blant annet sprekkdannelse i metall, gropkorrosjon og korrosjonshastighet [Yahaya et al., 2009](#). I systemer der nedbrytning av rørenes veggtykkelse er ønsket variabel, må en samle store mengder med kontinuerlige målinger av veggtykkelsen [Barringer, 1997](#). Dette gjorde Barringer i 1997, da han brukte Weibull-fordeling for å analysere veggtykkelse og bestemme inspeksjonsintervaller.

I tillegg til den fremgangsmåten som er beskrevet i dette kapitlet finnes det også andre måte å baserer seg på beregne sviktsannsynlighet. Følgende tre metoder er også mulige ved beregning:

- Strukturell pålitelighetsanalyse: Metoden baserer seg på å sammenligne rørets nåværende forhold med maksimal designforhold. På denne måten kan en finne ut når røret ikke er pålitelig lenger. Metoden blir ansett som aktuell innen rørsystemer da den kan håndtere ulike usikkerheter kvantitativt [Fleming and Lydell, 2004](#).
- Logisk regresjonsanalyse: I analyser hvor rørenes veggtykkelse ikke er tilgjengelig, kan en ved hjelp av rapporter fra KUI-inspeksjon bestemme sannsynligheten for KUI ved hjelp av logistisk regresjonsanalyse. En trenger da resultat som sier at enten "korrosjon ble funnet" eller "ingen korrosjon funnet" [Hosmer Jr et al., 2013](#). Mokhtar har benyttet denne metoden for å forutsi KUI [Mokhtar et al., 2015](#).
- Markovanalyse: Øvrige modeller beskrevet i dette kapittel sier kun om tilstanden er i svikt eller fungerer. Ved Markovanalyse kan en modellere flere tilstander, og på den måten også modellere inspeksjon- og reparaasjonsregimer. På grunn av oppgavens innhold vil vi videre gå dypere inn på markovanalysen.

2.3.4.1 Markovanalyse av rørsystemer

Som nevnt er de modellene som ble beskrevet tidligere i dette kapitlet kun beregnet for to tilstander; svikt eller OK. I praksis går røret gradvis over fra OK til svikt; og det er i slike tilfeller at markov-analyse er en relevant metode. I tillegg til at en kan innføre flere ulike tilstander på røret, kan en også inkludere inspeksjon- og reparaasjonsregimer inn i modellen, og på denne måten kan en beregne sviktsannsynligheter. I litteraturen kan en finne at metoden har blitt brukt for en rekke formål:

- Modellering av tilstand på broer og fortausystemer [Morcoux et al., 2002](#).
- Modellering av tilstanden på avløpsrør og vannrør [Wirahadikusumah et al., 2001](#).
- Modellering av rørsystemer i finske atomkraftverk for å bestemme sviktsannsynlighet [Cronvall and Männistö, 2009](#).
- Modellering av påliteligheten i rørledninger, spesielt med tanke på samspillet mellom inspeksjon- og reparaasjonsstrategier [Fleming, 2004](#)

Fleming konkluderte sin studie med at Markov-modellen er et egnet modelleringsteknikk når en skal studere virkningen av ulike strategier for risikobasert inspeksjon. Han mente at dersom en benytter gode parametere i modellen er den i stand til å angi rørsystemers pålitelighet svært nøyaktig [Fleming, 2004](#).

Når en skal utvikle en Markov-modell, er overgangssannsynlighetene helt avgjørende. Det er disse som gir sannsynligheten for at et system endrer tilstand, og derfor også for å forutsi når systemet endrer tilstand.

2.4 Konklusjon og begrunnelse for valg av modell

På bakgrunn av det som er presentert i Kapittel 2.1 og 2.2 ble det gjort en vurdering på at Markov-modellering er en egnet metode, selv om at ikke alle aspekter vil la seg inkludere i modellen. I samarbeid med veileder valgte vi å gå videre med en Markov-modell.

En Markov-modell er en fleksibel modell som kan brukes til å modellere både degradering, inspeksjonsregimer og reparasjonsregimer. Dette er noe som kan gi en god forståelse for oppførselen til systemet og bidra til beslutningsstøtte. Dette kan gjøres ved at degradering klassifiseres inn i ulike tilstander og tilhørende overgangsrater. Målet med bruk av modellen er å simulere ulike optimaliseringsstrategier, som videre skal danne begrunnelsen for optimaliserte vedlikeholdsstrategier. Analyse av tilgjengelige empiri og litteratur gjør at vi kan tilpasse dataene slik at de er tilpasset modellens nødvendige parameter.

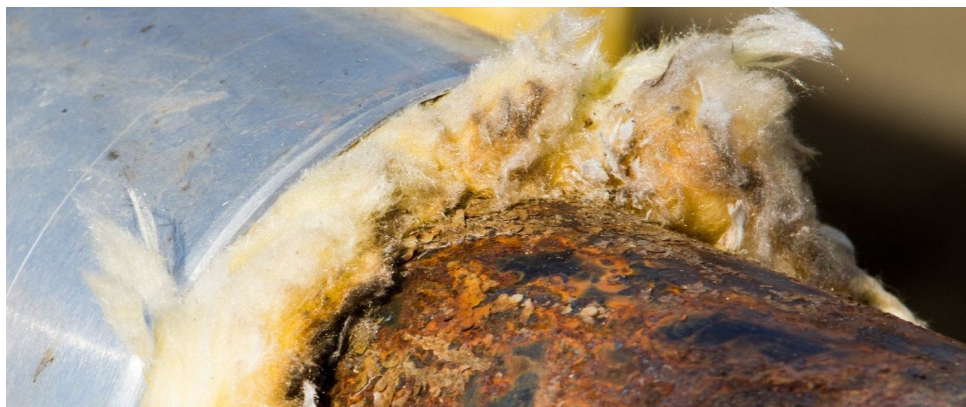
Markov modellering bruker matriseregning som i utgangspunktet krever bruk av matriseprogrammer som Matlab eller tilsvarende. En allerede utviklet VBA kodet Microsoft Excel applikasjon vil bli benyttet i denne oppgaven. Dette kombinert med andre utfordringer, kan tenkes å sette enkelte begrensninger for oppgaven. Vi anser derfor Markov modellering som en relevant metode, men at enkelte aspekter vil være utfordrende og inkludere i modelleringen. For at modellens konfigurasjon skal fungere, vil det derfor være nødvendig med enkelte antagelser og tilpasninger, som potensielt kan påvirke resultatene i negativ grad. Disse antagelsene vil bli videre diskutert i avslutning og diskusjonsdelen av oppgaven.

3 Case studie

I dette kapitlet presenterer vi hvordan og hvorfor KUI oppstår, isolasjonssystemets oppbygning samt dagens vedlikeholdsstrategi. Dette kapitlet danner grunnlaget for det videre arbeidet i oppgaven.

3.1 Korrosjon under isolasjon

Korrosjon under isolasjon er et svært omfattende problem, ikke bare innen olje- og gassindustrien, men også annen industri hvor rør isoleres av ulike årsaker [Ervik, 2020]. De vanligste årsakene for isolasjonsbehov er brannisolasjon, termisk isolasjon og støvisolasjon [Oceaneering, 2017]. KUI er et enormt problem for prosessindustrien, og hvert år brukes det over 1 milliard kroner på vedlikehold bare i Norge. I tillegg til å være en betydelig kostnadspost, utgjør KUI også en stor sikkerhetsrisiko og kan potensielt være årsak til storulykker [Ervik, 2020]. En sentral del av årsaken til den store kostnaden og sikkerhetsrisikoen, er at det ikke finnes noen gode metoder for å forutsi hvor eller når korrosjon oppstår. Dagens praksis er derfor at en må avisolere tusenvis av kilometer med rørledninger kun for å inspisere - og ofte avdekker inspeksjonene ingen korrosjon.



Figur 3.1: KUI har utviklet seg under en tilsynelatende fin isolasjon [Kaefer, ud]

Dagens vedlikeholdsstrategi baserer seg på risikobasert inspeksjon. Dette er en metode som ikke avdekker feilutvikling på et tidlig stadiet, noe som resulterer i at rørledninger ofte må rehabiliteres når funn oppstår. Rehabilitering av rørledninger koster mellom 7000-70.000NOK per løpemeter [Oceaneering, 2017], noe som er en av faktorene for at det brukes over 1 milliard kroner på vedlikehold av KUI bare i Norge [Ervik, 2020].

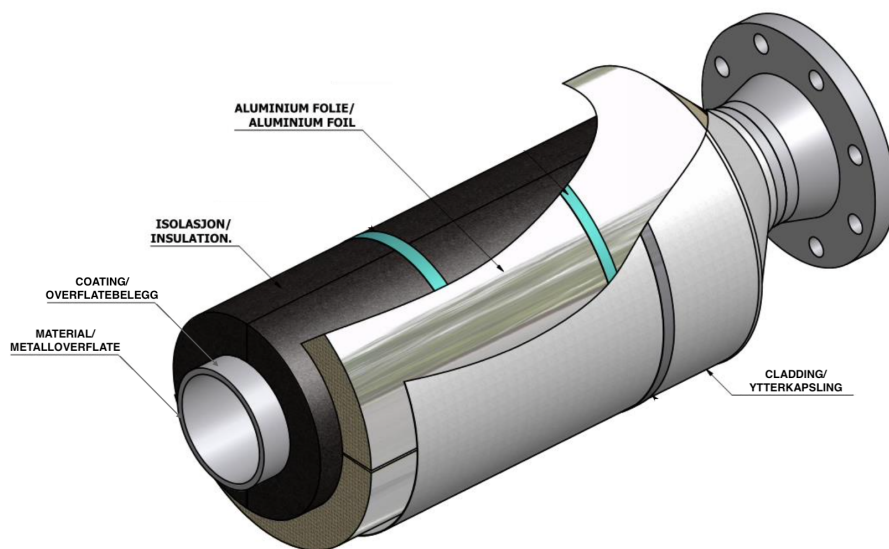
I tillegg til den økonomiske utfordringen knyttet til KUI er det også store utfordringer knyttet til lekkasjer og potensielle storulykker. I en studie utført av Exxon Mobile er KUI den største årsaken til rørlekkasjer innen industrien [Lettich, 2005], noe som har resultert i tap av menneskeliv, personskader, brann og forurensning [Isopartner, 2020]. Studien forteller også at 40 til 60 prosent av vedlikeholdskostnadene på rørledninger er knyttet til KUI.

Prosessanlegge i olje- og gassindustrien er ofte svært komplekse rørsystemer, noe som vanskeliggjør vedlikeholdsarbeidet. I tillegg til at geometrien i rørsystemene kan være utfordrende, har mangel på en veletablert vedlikeholdsstrategi vært et problem i bransjen. De siste 15 årene er det i hovedsak 3 strategier som har vært industriledende - API 583, NACE SP0198 og EFC 55 [Wiggen, 2019]. Selv

om disse standardene har vært anerkjent i bransjen, har de aldri fått fotfeste i Norge, og bedriftsin-
terne metoder har i stor grad blitt praktisert [DNV, 2020a]. Fellesnevneren for alle metodene og
standardene, er at de er risikobaserte metoder.

3.2 Isolasjonssystem

Isolasjonssystemet som benyttes på rør er i hovedsak delt i tre; ytterkapsling, isolasjon og overflate-
belegg. Disse tre delene har ulike formål og finnes i ulike varianter. I tillegg til disse kommer selve
røret med ulike spesifikasjoner. Sammen danner disse fire et isolasjonssystem, som blant annet
avgjør hvor motstandsdyktig et rør er for korrosjon.



Figur 3.2: Illustrasjonsbilde av hvordan isolasjonen rundt et rør er bygd opp. Ytterkapsling,
isolasjon og coating rundt røret [Oceaneering, 2017]

3.2.1 Ytterkapsling

Det finnes ulike ytterkapslinger brukt på norsk sokkel og landbaserte anlegg. Aluminium og rust-
fritt stål er materialene som dominerer i bransjen. Overflatebehandlet stål er også en variant som
benyttes, men hovedsakelig på landbaserte anlegg [Oceaneering, 2017]. Formålet med ytterkaps-
lingen er å holde isolasjonen og røret beskyttet fra vanninntrengning, fukt og forurensninger.

3.2.2 Isolasjon

Både rørsystemer, strukturer, tanker og beholdere isoleres. Typiske formål er brann, støy- og ter-
misk isolasjon. Det finnes en rekke ulike isolasjonsløsninger, som alle har sine styrker og svakheter.
De to mest brukte isoleringsløsningene som er brukt innen norsk industri er mineralull og celleglass
[Oceaneering, 2017]. Celleglass har en positiv påvirkning på KUI sammenlignet med mineralull
[API, 2016].

3.2.3 Overflatebelegg

Overflatebelegg er en overflatebehandling av selve røret. Ulike produkter males eller sprøytes på røret, og på den måten påfører vi røroverflaten bestemte egenskaper. I sammenheng med KUI, vil den ønskede egenskapen være å danne en forsterket røroverflate med formål om å bedre korrosjonsmotstand. Ifølge Petroleumstilsynets rapport [Oceaneering, 2017](#) er *fenolepoksy* og *termisk sprøytet aluminium (TSA)*, de mest brukte løsningene for både karbonstål og rustfritt stål i norsk industri.

3.3 Forutsetninger for korrosjon under isolasjon

For at korrosjon under isolasjon skal oppstå og utvikle seg må det være en rekke forutsetninger til stede [Oceaneering, 2017](#):

- Vanninntrenging gjennom åpninger i ytterkapslingen.
- Manglende eller degradert overflatebelegg.
- Vann, salter og forurensninger inn til metalloverflate. Dette kan komme fra nedbør, høy luftfuktighet, kondens, vasking av anlegget og testing av sprinkleranlegg.
- Temperatur. KUI regnes gjerne ikke som et problem ved driftstemperaturer rundt 0°C eller lavere, men øker til betydelige korrosjonsrater rundt 100°C, i størrelsesorden 1 mm/ år. Ved enda høyere temperaturer avtar KUI-problemet igjen ettersom vannet i større grad fordampes fra overflaten. Systemer med varierende driftstemperatur er spesielt utsatt, trolig pga. gjentatt fordampning og kondensering inne i isolasjonen.



Figur 3.3: En tydelig skadet ytterkapsling der vann og forurensning kan trenge inn til isolasjonen [Eddysonics, ud](#)

3.3.1 Vann

Hovedårsaken til korrosjonsutvikling er vann og fuktighet. For at metall skal korrodere, må både vann og oksygen være til stede, og korrosjon vil ikke oppstå uten en av disse faktorene [Vachtsevanos et al., 2020](#). Vann vil normalt inneholde oppløst oksygen, altså oksygen som er oppløst i vann. Dette oppløste oksygenet kan bidra til et korroderende miljø, og dersom dette fjernes er vann nærmest ikke korroderende. Det samme gjelder dersom vannet holdes nøytralt eller delvis alkalisk. Vann som trenger gjennom isolasjonen, inneholder ofte kjemisk og sure løsninger [Vachtsevanos et al., 2020](#).

Normalt vil vann kunne tilføres fra to kilder, interne eller eksterne. Vann kommer ofte fra eksterne kilder som nedbør, sjø, damp, sprøytetøv eller driv fra nærliggende kilder som kjøletårn og lignende. Vannet trenger inn i isolasjonssystemet gjennom små åpninger eller skader i ytterkapslingen. Selv om vanninntrenging fra eksterne kilder elimineres fullstendig, kan det fortsatt dannes fukt internt i det isolerte systemet. Interne kilder kan være kondens, vannlekkasjer eller systemlekkasjer. Kondens kan oppstå når temperaturen på metalloverflater er lavere enn duggpunktet i atmosfæren. Kondens kan da samles mellom metallet og isolasjonen og skape et korroderende miljø [Vachtsevanos et al., 2020](#).

3.3.2 Kjemisk innhold i vann

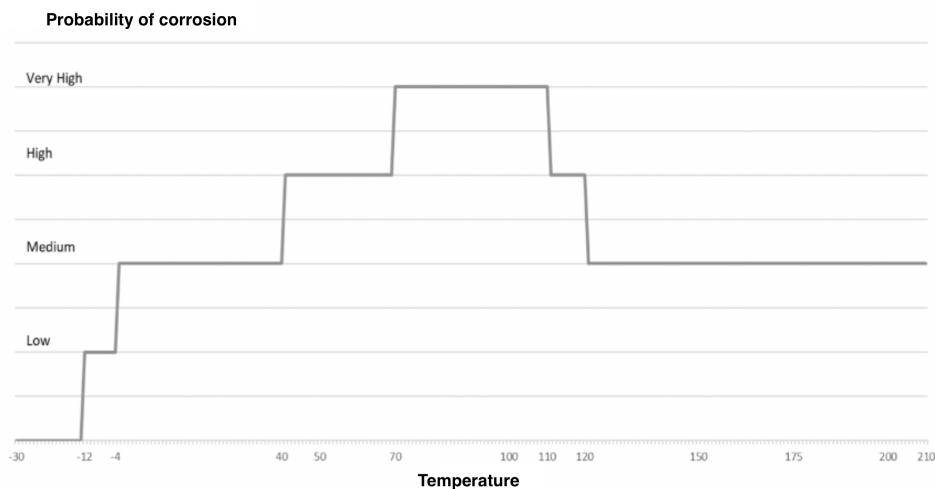
Det kjemiske innholdet i vann spiller en viktig rolle for at korrosjon skal kunne oppstå. Når klor kombineres med grunnstoffer, dannes det kjemiske forbindelser som kalles klorider. Klorider kan komme fra regnvann, havet, veisalt, planter eller fra vann som brukes til brannslukking og vasking. Også vanlige isolasjonsmaterialer kan inneholde klorider. Utsettes disse for fuktighet kan klorider som frigjøres danne et fuktighetslag på røroverflaten, som videre kan resultere i korrosjon. Det vil derfor være viktig at disse materialene kontrolleres nøye og ikke inneholder skadelige syrer som kan redusere pH-verdiene. Går pH-verdiene under 4, vil korrosjonen øke dramatisk. Karbonstål er spesielt utsatt for denne formen for korrosjon [Vachtsevanos et al., 2020](#)

3.3.3 Temperatur

Driftstemperaturen er også en viktig faktor når det kommer til korrosjon. Rørsystemer som operer i temperaturområdet mellom -12 og 121 grader, er ifølge [API, 2016](#) svært utsatt for korrosjon. Området mellom 49 og 93 grader er det optimale temperaturområdet for korrosjonsdannelse. [API, 2020](#) og [API, 2016](#) kommer også med noen generelle bemerkninger rundt temperatur og korrosjonsdannelse.

- Temperaturer mellom 0 og 100 grader tillater vann å eksistere i væskeform. I dette temperaturområdet vil korrosjonsraten dobles for hver 15-20 grader økning i temperatur. Det maksimale korrosjons potensialet ligger vanligvis mellom disse to punktene.
- Som en generell regel er anlegg som er lokalisert i områder med en høy forekomst av nedbør eller i varmere marine områder, mer utsatt for korrosjon enn anlegg i kjøligere, tørrere, eller innlandsområder.
- Uavhengig av miljøet, er anlegg som er lokalisert i nærheten av kjøletårn eller dampventiler mer utsatt for korrosjon.
- KUI er spesielt aggressivt i områder hvor driftstemperaturer fører til gjentagende eller konstant kondens og fuktighet fra miljøet.

- Systemer med karbonstål som opererer i temperaturområdet over 121 grader, men har en varierende driftssyklus eller er utsatt for gjentagende stans i driften, er mer utsatt for KUI.
- Kaldt utstyr som kontinuerlig opererer i temperaturer under det atmosfæriske duggpunktet.
- To temperatur/korrosjons-tilstander som er spesielt merket:
 1. Sykliske temperaturer som bidrar til økt fare for KUI. For eksempel i regenereringsprosesser hvor utstyr utsettes for sykliske temperaturer. Eksempelvis om utstyr utsettes for 300 grader i perioder, mens normaltemperaturen er 50 grader. Dette resulterer i økt sannsynlighet for KUI da den varme temperaturen skaper raskere fordampning av fuktighet, men fuktigheten blir sperret inne i isolasjonen istedenfor at den fordamper. Dette skaper korrosivt miljø.
 2. Fraværet av temperatur under lengre nedstengninger av anlegg, hvor vannansamlinger oppstår, uten at det fryser eller fordamper vil også skape et korrosivt miljø.



Figur 3.4: Sannsynlighet for korrosjon som funksjon av temperatur [Wiggen, 2019](#)

3.4 Barrierer mot KUI

Isolasjonssystemet er bygd opp som barrierer for å hindre ansamling av vann, fuktighet eller forurensning mot rørets overflate. Forutsetningene for at korrosjon skal kunne oppstå, er at disse barrierene brytes. Styrken og påliteligheten til disse barrierene avhenger av en rekke ulike faktorer, men påvirkes også av ytre påvirkninger og naturlig slitasje [Oceaneering, 2017](#).

3.4.1 Ytterkapslingens funksjon

Som beskrevet i kapittel [3.3](#) er det en rekke forutsetninger som må være til stede for at KUI skal oppstå. Vann, fukt og forurensning må trenge seg gjennom isolasjonen for å komme i kontakt med røroverflaten. Ytterkapslingens hovedoppgave er å holde isolasjonen beskyttet fra vanninntrengning. Kapslingens kvalitet og tilstand er derfor en sentral faktor. Dårlig kvalitet, aldring, mekanisk påvirkning, kompleks rørgometri og gjentatte inspeksjoner vil øke sannsynligheten for vanninntrengning [Vachtsevanos et al., 2020](#).

3.4.2 Overflatebeleggets funksjon

Overflatebelegget er siste barriere mellom røroverflaten og påvirkning fra omgivelsene. Tilstanden til overflatebelegget er derfor en viktig faktor for å unngå korrosjon. Overflatebelegget degraderer generelt som en funksjon av tid, og jo eldre belegget er jo større er sannsynligheten for KUI. Lav kvalitet på overflatebelegget gir redusert beskyttelse, og kan i ytterste konsekvens gjøre overflaten mer utsatt for korrosjon. Årsaken er at dette kan akselerere korrosjon på områder med svakt belegg. På grunn av dette bør konstruksjonen av utstyr gjennomgås i detalj for å identifisere risikoområder som kan skape "hotspots" for vannansamlinger som kan gi økt sannsynlighet for korrosjon. Tradisjonelt bestemmes overflatebeleggets tilstand av følgende faktorer [DNV, 2019b]:

- Alder på overflatebelegg
- Type overflatebelegg
- Kvalitetskontroller og utførelse av arbeid
- Fuktighetsforhold
- Temperatur – Eventuelle variasjoner i overflate temperaturer i forhold til anbefalinger

3.4.3 Rørspesifikasjoner

Rørspesifikasjonen i isolasjonssystemet spiller også en sentral rolle for korrosjonsutvikling. Denne barrieren bestemmes av hvor motstandsdyktig ulike materialer er for korrosjonsutvikling, men også hvor mye materialdegradering en kan tillate. Korrosjonsutvikling påvirkes også av temperatur og eventuelle temperatursvingninger [Vachtsevanos et al., 2020]. Karbonstål og rustfritt stål er de mest vanlige materialene som benyttes. Materialbarrieren klassifiseres ut fra følgende faktorer [DNV, 2019b]:

- Type materiale
- Temperatur på overflate av materiale
- Variasjon i temperatur
- Forurensninger
- Rørets diameter
- Rørets veggtykkelse

3.5 Dagens vedlikeholdsstrategi

I Norge er det olje- og gassindustrien som har de største utfordringene med korrosjon under isolasjon. Frem til de siste årene det vært lite samarbeid om standardisering av metoder og strategier for å håndtere problemet. API 583, NACE SP0198 og EFC 55 [Wiggen, 2019] er de tre største standardene for vedlikehold av KUI, men ingen av disse har fått fotfeste i Norge. Bedriftsinterne metoder har i stor grad blitt praktisert [DNV, 2020a]. Det har over lengre tid vokst frem er større behov for en felles industriell standard, og på bakgrunn av dette har flere av de største aktørene gått sammen for utvikling av en standard. Denne har fått navnet DNV GL RP-G109. I likhet med API 583, NACE SP0198 og EFC 55, er også dette en risikobasert vedlikeholdsstandard.

Maintech AS er et selskap som jobber med drift, vedlikehold, inspeksjon og materialteknologi - og en av deres hovedområder er korrosjon under isolasjon. Maintech tar utgangspunkt i DNV GL RP-G109, men benytter også egne vurderinger. Fra DNV GL RP-G109 tar de utgangspunkt i en risikoanalyse med inputparametere som alder, material, temperatur, overflatebelegg, isolasjonstype, type ytterkapsling, lokasjon, tidligere vedlikehold, diameter og vegtykkelse [DNVGL-RP-G109, 2020]. Basert på denne risikoanalysen vil et antall inspeksjonspunkter bli plukket ut. På grunn av tilgjengelige ressurser, har de et mål om at alle inspeksjonspunkter skal gjennomgås i løpet av 20 år. Fysiske skader, fukt, degradering eller andre tegn til redusert funksjon i isolasjonssystemet kartlegges og loggføres i en database. Et typisk inspeksjonspunkt som velges ut på bakgrunn av risikovurderingen, vil være gjennomsnittlig avisolering av 10 meter for visuell inspeksjon. Dette da korrosjonen har en tendens til å spre seg horisontalt på røret, og at utsatte områder blir hardt rammet.

Da inspeksjonene er både tid- og ressurskrevende, vil Maintech som hovedregel utbedre samtlige skader eller degraderinger. Finnes det ingen tegn til dette, vil inspeksjonspunktene isoleres for å gjenoppta sin funksjon. Finnes det tegn til korrosjon eller skade på røret; vil det gjennomføres en vurdering som klassifiserer rørets overflate i en av fire klassifiseringer:

- OK - Ingen synlig skade
- Light damage - Korrosjon med dybde opp til 0,5mm
- Observation - Korrosjon med dybde over 0,5mm
- Finding - Korrosjon med dybde over 1/3 av vegtykkelse

Dersom rørets overflate klassifiseres med "Light damage" eller "Observation", gjennomføres *nålepikking* og nytt overflatebelegg påføres. Dersom rørets overflate klassifiseres med "Finding" må det gjennomføres en større reparasjon eller utskifting. Som tommelfingerregel er dette korrosjon med dybde over 1/3 av rørets vegtykkelse, men bedriftsinterne retningslinjer legges også til grunn. Grensen kan derfor være både over og under denne. I tillegg til disse klassifiseringene, er det også mulig at rørsystemet går over i en femte klassifisering; "Lekkasje". Dette innebærer ruptur i rørvegg.

Reparasjonskostnaden til de ulike klassifiseringene varierer. Dersom et rør avisoleres og røroverflaten må utbedres vil dette generere en kostnad på nye materialer, bruk av utstyr og arbeidstimer. For tilstanden "Finding" og tilstanden "Lekkasje" vil det også generere kostnader for bytte av rørlengde, produksjonstap, og kostnader ved en eventuell ulykke. Vi har gjort antagelser på hvilke kostnader de ulike klassifiseringene genererer senere i oppgaven.

Det finnes også metoder for inspeksjon som ikke krever avisolering. Disse metodene måler materialer uten at de mekaniske eller kjemiske egenskapene til objektet blir påvirket. Metodene kalles ofte *NDT-inspeksjon*, som står for *Non-destructive-testing*. Eksempler på hva metodene kan basere seg på er ultralyd og radiografi [Vachtsevanos et al., 2020].

4 Dataanalyse

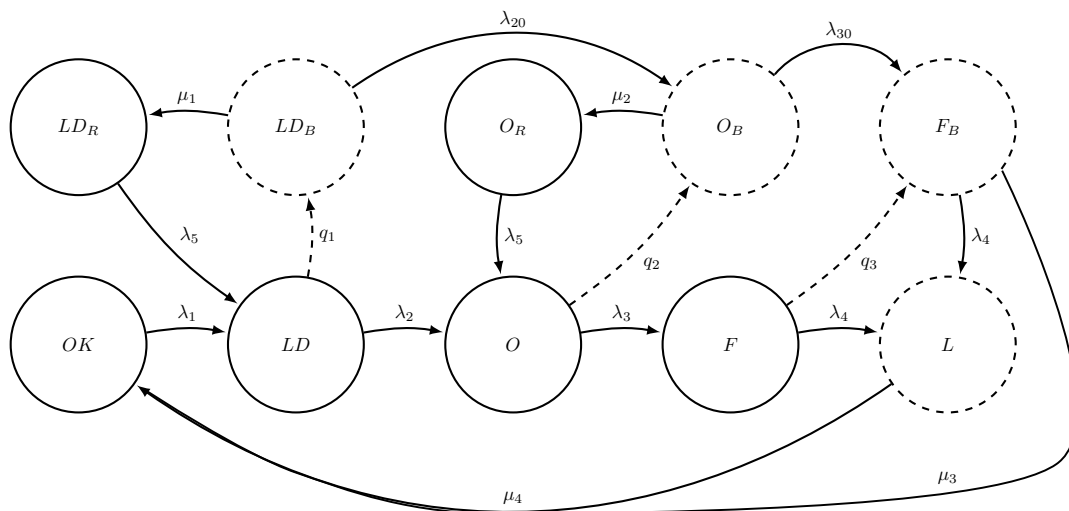
Som beskrevet i kapittel 1.2 er målet med oppgaven å optimalisere vedlikeholdsstrategien med hensyn på kostnad og sikkerhet. Vi skal videre i oppgaven se på hvilke strategier som potensielt kan bidra til å redusere kostnader, samtidig som vi opprettholder eller forbedrer sikkerhetsnivået. For å oppnå dette har vi på bakgrunn av kapittel 3.5 utviklet et Markov-diagram som er illustrert i figur 4.1. Videre i dette kapitlet skal vi analysere og bruke empiriske data, litteratur og uttalelser fra Maintech for å tilpasse modellen.

4.1 Markov-diagram

I oppgaven har vi valgt å ta utgangspunkt i dagens vedlikeholdsstrategi som er beskrevet i kapittel 3.5. Ut fra dette har vi utviklet et Markov-diagram som er presentert i figur 4.1. Ved utvikling av diagrammet valgte vi å beholde Maintechs 4 klassifiseringer, OK , LD , F og O . Dette er skjulte tilstander som ikke kan bekreftes uten en inspeksjon. Vi har også lagt til en ny tilstand som er lekkasje, L . Vi antar at "Leakage" ikke er en skjult tilstand.

Videre har vi lagt til tre bekreftede tilstander, LD_B , O_B og F_B . Disse tre tilstandene er kun mulig etter en eventuell inspeksjon har bekreftet tilstanden. I disse tilstandene vil en typisk opprette en arbeidsordre for reparasjon, men det er også mulighet for at tilstanden forverres dersom ikke reparasjon skjer raskt nok. Vi har derfor lagt inn overganger fra LD_B til O_B , og fra O_B til F_B .

Etter at vi har bekreftet en tilstand og opprettet en arbeidsordre, vil modellen som hovedregel gå videre til tilstand LD_R og O_R . Dette er reparerte utgaver av "Light damage" og "Observation". I praksis renses røroverflaten og det legges det på et nytt overflatebelegg. Dersom vi kommer i tilstand F_B eller L , må vi i praksis bytte til et nytt rør, og dermed ender tilbake i tilstand OK .



Figur 4.1: Markov-diagrammet som er utviklet og vil bli brukt i det videre arbeidet. Overganger og tilstander med stiplede linjer er inspeksjoner og bekreftede tilstander.

Tabell 4.1 viser forklaring av de ulike tilstandene i Markov-diagrammet. Kapittel 3.5 beskriver hvilken korrosjonsdybde som definerer tilstandene.

Tabell 4.1: Forklaring av tilstandene i figur 4.1

Tilstand	Beskrivelse
<i>OK</i>	Skjult tilstand. Ingen skade på røroverflate
<i>LD</i>	Skjult tilstand. Korrosjonsdybde mellom 0-0.5mm
<i>O</i>	Skjult tilstand. Korrosjonsdybde mellom 0.5-1.5mm
<i>F</i>	Skjult tilstand. Korrosjonsdybde mellom 1.5-4mm
<i>L</i>	Antar bekreftet tilstand. Korrosjonsdybde over 4mm resulterer i lekkasje
<i>LD_B</i>	Bekreftet tilstand. Etter en inspeksjon som har avdekket tilstand <i>LD</i>
<i>O_B</i>	Bekreftet tilstand. Etter en inspeksjon som har avdekket tilstand <i>O</i>
<i>F_B</i>	Bekreftet tilstand. Etter en inspeksjon som har avdekket tilstand <i>F</i>
<i>LD_R</i>	Reparert tilstand. Etter en inspeksjon har har avdekket tilstand <i>LD</i> og reparasjon er gjennomført. I praksis "Light damage" med nytt overflatebelegg.
<i>O_R</i>	Reparert tilstand. Etter en inspeksjon som har avdekket tilstand <i>O</i> og reparasjon er gjennomført. I praksis "Observation" med nytt overflatebelegg.

Tabell 4.2 forklarer overgangsratene i diagrammet. Det er disse overgangsratene vi skal bestemme i dette kapitlet. λ_{20} og λ_{30} er i de tilfellene hvor reparasjon ikke gjennomføres raskt nok, og tilstanden forverres mens en venter på reparasjon.

Tabell 4.2: Forklaring av overgangsratene i figur 4.1

Overgangsrate	Beskrivelse
λ_1	Overgangsrate fra "OK" til "Light damage".
λ_2	Overgangsrate fra "Light damage" til "Observation".
λ_3	Overgangsrate fra "Observation" til "Finding".
λ_4	Overgangsrate fra "Finding" til "Leakage"
λ_5	Overgangsrate fra "Light damage, repaired" til "Light damage", samt "Observation, repaired" til "Observation". I praksis tiden det tar å bryte ned et nytt overflatebelegg.
λ_{20}	Overgangsrate fra "Light damage, bevisst" til "Observation, bevisst". I de tilfellene hvor reparasjon ikke gjennomføres raskt nok etter en inspeksjon.
λ_{30}	Overgangsrate fra "Observation, bevisst" til "Finding, bevisst". I de tilfellene hvor reparasjon ikke gjennomføres raskt nok etter en inspeksjon.

Tabell 4.3 forklarer reparasjonsratene i diagrammet. Fra kapittel 3.5 vet vi at "Light damage" og "Observation" repareres med nålepikking og nytt overflatebelegg, mens "Finding" og "Leakage" krever at røret byttes.

Tabell 4.3: Forklaring av reparasjonsratene i figur 4.1

Reparasjonsrate	Beskrivelse
μ_1	Reparasjonrate av "Light Damage". Nålepikking og nytt overflatebelegg.
μ_2	Reparasjonrate av "Observation". Nålepikking og nytt overflatebelegg.
μ_3	Reparasjonrate av "Finding". Bytte av korrodert rør.
μ_4	Reparasjonrate av "Leakage". Bytte av korrodert rør

Tabell 4.4 forklarer inspeksjonsratene i diagrammet. Dette sier noe om hvor ofte vi inspiserer basert på hvordan tilstand vi befinner oss i. I praksis vil disse være bestemt av deterministiske intervaller. Vi antar konstante rater i modelleringen.

Tabell 4.4: Forklaring av inspeksjonsratene i figur 4.1

Inspeksjonsrate	Beskrivelse
q_1	Inspeksjonsrate når vi befinner oss i "Light damage".
q_2	Inspeksjonsrate når vi befinner oss i "Observation".
q_3	Inspeksjonsrate når vi befinner oss i "Finding".

4.2 Database

De empiriske dataene i denne oppgaven er hentet fra ett av anleggene der Maintech gjennomfører inspeksjoner. Inspeksjonene og eventuelle funn er strukturert i en database. Eksempel fra databasen kan leses i vedlegg 4.1. Databasen inneholder 2300 inspeksjoner gjennomført i perioden 2007-2021. Av disse er det avdekket 533 korrosjonsfunn av ulik alvorlighetsgrad.

Ved inspeksjoner blir følgende parameter loggført:

- ID til inspeksjonspunkt
- Rørets spesifikasjoner
- Ytterkapslingens type og tilstand
- Isolasjonens type og tilstand, fuktig eller tørr
- Overflatebeleggets type og tilstand
- Røroverflatens tilstand, KUI
- Operasjonstemperatur
- Geografisk plassering

4.3 Analyse

For enklere analyse er korrosjonsfunnene strukturert i et regneark, og delt inn ulike grupper basert på rørspekifikasjon, geografisk plassering og isolasjonsoppbygning. Som beskrevet i kapittel [3.3](#) og [3.4](#) er dette faktorer som direkte påvirker utviklingen av korrosjon.

For å nå oppgavens målsetning om å optimalisere vedlikeholdsstrategien av korrosjon under isolasjon, er det nødvendig å utvikle en modell som kan simulere dagens vedlikeholdsstrategi. I kapittel [4.1](#) har vi presentert et Markov-diagram med tilhørende overgangsrater. For å bestemme disse ratene tar vi utgangspunkt i empiriske data fra Maintechs database.

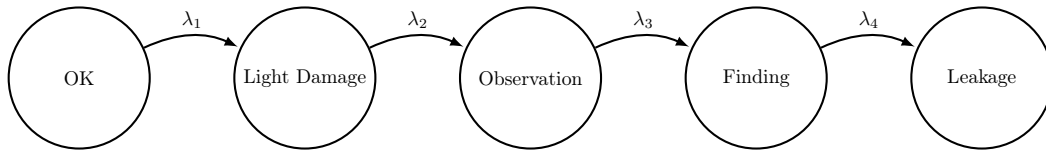
Videre i dette kapittelet skal vi analysere og bestemme følgende størrelser:

- Overgangsrater
- Kostnader
- Reparasjonsrate og inspeksjonsrate

4.3.1 Overgangsrater

Maintechs database inneholder et stort spekter av ulike rørspekifikasjoner og inspeksjoner. Vi må derfor avgrense analysen til en definert, homogen gruppe av rørspekifikasjoner. Vi har valgt å analysere rør med følgende spesifikasjon:

- Rør laget av karbonstål
- Rørdiameter mellom 25-100mm
- Vegtthkkelse mellom 5-6mm
- Installasjonsår 2007
- Driftstemperatur 40-120°C



Figur 4.2: Tilstandene og overgangsratene i Markov-modell

Tabell 4.5: Beregning av ulike tilstanders Mean-Time-To-Transition, $MTTT$

	OK til Light Damage	OK til Observation
Antall funn	97	9
$MTTT$	7,4 år	10,9 år
λ	0,0112612612612	0,007635073

Dette er den gruppen med størst datagrunnlag. Her er det gjort 97 funn som er klassifisert "Light damage" og 9 som er klassifisert med "Observation". Databasen inneholder ingen funn av "Finding".

Som vi kan lese fra tabell 4.5 går det i gjennomsnitt 7.4 år for at et rør går fra tilstand "OK" til tilstand "Light damage". Fra tilstand "OK" til tilstand "Observation" går det i gjennomsnitt 10.9 år. Fra dette må vi anta $MTTT$ mellom "Light damage" og "Observation" er differansen mellom de to, $10.9 - 7.4 = 3.5$ år. $MTTT$ beregnet vi ved å finne gjennomsnittlig tid det tar fra et nytt rør klassifiseres med de ulike tilstandenene. Vi ønsker i denne, og videre formler å gjøre om fra år til måneder, og deler derfor på 12. λ er beregnet ved hjelp av følgende ligning: [Rausand and Høyland, 2004](#)

$$\lambda = \frac{1}{MTTT \times 12mnd} \quad (4.1)$$

Da de empiriske dataene ikke inneholder inspeksjoner som har avdekket "Finding" eller "Leakage", må vi basere oss på litteraturen når $MTTT$ og λ skal bestemmes for disse. Fra kapittel 3.5 kan vi lese hvilken korrosjonsdybde som ligger til grunn for de ulike tilstandenene. Dersom vi tenker at en gjennomsnittlig "Light damage" har 0.25mm korrosjon, og at dette tar 7.4år, kan vi beregne ved hjelp av ligning 4.2 at overgangen til "Light damage" har en korrosjonsrate på 0.033784mm/år. For "Observation" har vi en gjennomsnittlig korrosjonsdybde på 1.0mm, 0.75mm dypere enn "Light damage" på 3.5 år, noe som gir en korrosjonsrate 0.2142857mm/år. Denne korrosjonsraten ligger relativt nærme det vi kan lese ut fra tabell 4.6 [API, 2016](#), 0.254mm/år. Vi velger derfor å benytte denne korrosjonsraten i den videre analysen.

$$CR = \frac{\Delta Korrosjon}{MTTT} \quad (4.2)$$

$\Delta Korrosjon$ = Antall millimeter i forskjell mellom tilstanden, i snitt.

For tilstanden "Finding" antar vi en gjennomsnittlig dybde på 2.75mm, dette er 1,75mm dypere enn en gjennomsnittlig "Observation". Ved hjelp fra korrosjonsrate hentet fra tabell 4.6 [API, 2016](#) kan vi dermed beregne $MTTT$ og λ .

Tabell 4.6: Corrosion Rate [mm/y] API, 2016

Temperature [°C]	Marine	Temperate	Dry	Severe
-12	0	0	0	0
-8	0.025	0	0	0
6 - 71	0.127	0.076	0.025	0.254
107	0.025	0	0	0.051
121	0	0	0	0

$$MTTT = \frac{\Delta Korrosjon}{CR} \quad (4.3)$$

Ved hjelp av ligning 4.3 finner vi ut at $MTTT$ til "Finding" er 6,9 år. På samme måte kan vi beregne $MTTT$ for "Leakage". En gjennomsnittlig "Leakage" har en dybde på 4mm, 1,25mm dypere enn en gjennomsnittlig "Finding". Ved hjelp av ligning 4.3 finner vi ut at $MTTT$ til "Leakage" er 4.9 år. Ved hjelp av ligning 4.4 kan vi da beregne λ for "Observation" og "Leakage". Vi går her bort fra forutsetningen om eksponential fordeling, og velger en pragmatisk tilnærming. Dette valget vil bli videre drøftet i diskusjonskapittelet.

$$\lambda = \frac{CR}{\Delta Korrosjon \times 12 months} \quad (4.4)$$

Tabell 4.7 viser $MTTT$ og λ for de ulike overgangene. Her kan vi se at CR er svært lav de første årene, noe som kan forklares med at overflatebelegget funksjon er intakt, og at det degraderes som funksjon av tid.

Tabell 4.7: Beregning av $MTTT$, λ og CR

Overganger	Korrosjon	$Korrosjon$	$MTTT$	CR [mm/år]	λ
LD	0<0.5mm	0.25mm	7.4år	0.034	0.011261
O	0.5<1,5mm	1.00mm	3.5år	0.214	0.023810
F	1.5<4mm	2,75mm	6.9år	0.254	0.012077
L	4<	4mm	4.9år	0.254	0.017007

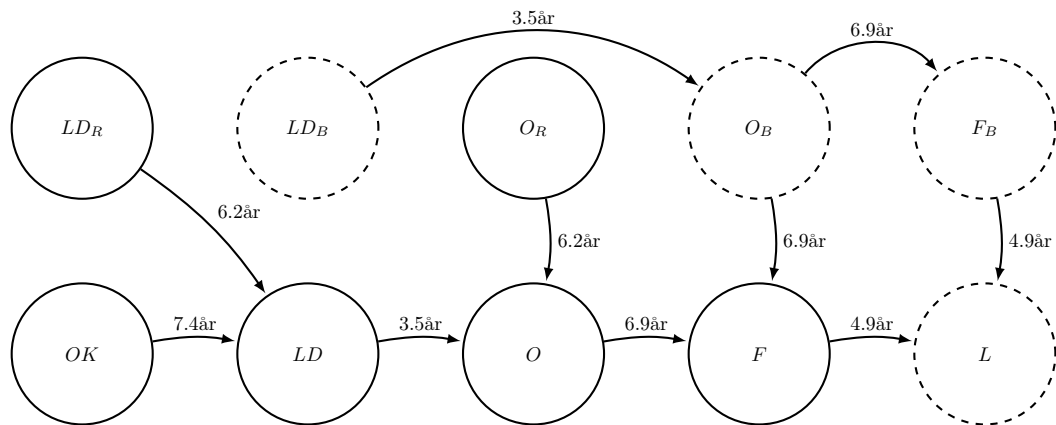
Funnene så langt i dette kapittelet er presentert i tabell 4.7. Videre må vi bestemme λ_5 som er overgangen mellom en LD_R og LD , samt O_R og O . Etter korrosjonsfunn i LD og O , blir røret behandlet med nytt overflatebelegg. Overgangen tilbake til LD og O , er i praksis tiden det tar for at det nye overflatebelegget er brutt ned. Derfor antar vi at overgangen mellom LD_R og LD , samt O_R og O er den samme.

Vi vet at en gjennomsnittlig "Light damage" har en korrosjonsdybde på 0.25mm og at dette tar 7.4år. I løpet av denne tiden brytes overflatebelegget ned, og 0.25mm korrosjon oppstår. Vi vet

også at korrosjonsraten for "Finding" er $0.21428571\text{mm}/\text{år}$, og i denne tilstanden har overflatebelegget blitt brutt ned. Dersom vi antar at vi har samme korrosjonsrate etter at overflatebelegget er brutt ned i "Light damage", kan vi ved hjelp av ligning 4.5 si at overflatebelegget brytes ned i løpet av 6.2år. Ved hjelp av ligning 4.4 gir dette en λ_5 på 0.01344086 .

$$MTTT_5 = 7.4 - \frac{\text{Korrosjon}}{CR} = 6.2 \quad (4.5)$$

Figur 4.3 viser et utsnitt av Markov-diagrammet som er utviklet for denne oppgaven, og viser $MTTT$ mellom de ulike tilstandene.



Figur 4.3: Utsnitt av Markov-diagrammet som skal brukes i modelleringen. Viser $MTTT$ mellom de ulike tilstandene.

De siste overgangsratene som er presentert i Markov-diagrammet er λ_{20} og λ_{30} . Dette er tiden det tar for at en bekreftet tilstand forverrer seg i påvente på at reparasjonen gjennomføres. I praksis kan de beviste tilstandene være et ubeskyttet rør som står eksponert for ytre påvirkninger, noe som også kan påvirke overgangsraten fra tilstandene. På grunn av manglende data på dette, antar vi at disse overgangene har samme verdi som λ_2 og λ_3 .

4.3.2 Reparasjonsrate og inspeksjonsrate

Som beskrevet i kapittel 3.5 gjennomfører Maintech umiddelbar utbedring dersom inspeksjonene avdekker funn. Videre i oppgaven tar vi utgangspunkt i at dette er noe de gjør i alle situasjoner der korrosjonen blir klassifisert som "Light damage", "Observation" eller "Finding". Da tilstandene har ulik fremgangsmåte, vil de også ha ulik reparasjonstid.

Reparasjonsraten er beregnet ut fra gjennomsnittlig tid det vil ta å gjennomføre en reparasjon etter at det er avdekket korrosjon. Reparasjonstidene er basert på antagelser gjort etter samtaler med Maintech. For en klassifisering innenfor "Light damage", antar vi en reparasjonstid på to uker. For en klassifisering innenfor "Observation", antas det en gjennomsnittlig reparasjonstid på én måned. For en klassifisering innenfor "Finding", antas det at det vil ta gjennomsnittlig to måneder. Reparasjonstiden etter en "Leakage", antar vi være 5 måneder. Reparasjonsraten, μ , estimeres så ut fra ligning 4.6 og er presentert i tabell 4.8.

$$\mu = \frac{\text{Reparasjoner/mnd}}{12\text{mnd}} \quad (4.6)$$

Etter uttalelser fra Maintech angående inspeksjoner som ikke har vært vellykket, har vi antatt en sannsynlighet på at inspeksjoner i dagens vedlikeholdsstrategi har 95 prosent sannsynlighet for å være vellykket.

Tabell 4.8: Reparasjonsrater for de ulike tilstandene

Reparasjon av	Reparasjonstid[mnd]	μ (år)
Light damage	0.5	0.166667
Observation	1	0.083333
Finding	2	0.041667
Leakage	5	0.016667

Fra kapittel 3.5 vet vi at Maintech har som mål om at alle inspeksjonspunkt skal inspiseres i løpet av en 20-årsperiode. Dette er grunnen for at inspeksjonsintervallene τ_1 , τ_2 og τ_3 settes til 240 måneder, noe som tilsvarer 20 år. Vi vet at rørenes geometri kan vanskeliggjøre inspeksjonene, og derfor har vi valgt å anta at 95% av inspeksjonene er vellykkede. Ved hjelp av ligning 4.7 hentet fra Rausand and Høyland, 2004 beregner vi inspeksjonsratene q_1 , q_2 og q_3 . I tillegg til en forenkling ved å innføre P Insp på 95%, velger vi også å sette inspeksjonsraten lik 1 delt på τ

$$q = \frac{1}{\tau} \times P_{INSP} \quad (4.7)$$

4.3.3 Kostnader

Vedlikeholdskostandene knyttet til korrosjon under isolasjon har vi valgt å dele opp i to kostnadsposter; direkte- og løpende kostnader.

Direkte vedlikeholdskostnader er de kostnadene som kommer fra selve inspeksjon og reparasjon av rørsystemene. Hovedsakelig er dette kostnader som kommer fra materialer og tidsbruk. Kostnader for avisolering, reparasjon av overflatebehandling og reisolering av ti løpemetere rør kan leses ut fra tabell 4.9

Tabell 4.9: Inspeksjon og reparasjonskostnader av rør [Oceaneering, 2017](#)

Dimensjon	Totalkostnad (kNOK), 10 løpemetere rør
2"	70-120
8"	100-240
18"	200-700

Siden vi har avgrenset denne analysen rørstørrelser opp til 4", antar vi at kostnadene for inspeksjon, avisolering, reparasjon og reisolering ligger i det øvre sjiktet av kostnadene for reparasjon av 2" rør.

Med utgangspunkt i tabell 4.9 har vi antatt direkte kostnader slik som tabell 4.10 viser. Tilstand "Light damage" og "Observation" krever en relativt liten jobb etter at rørene er avisolert, mens tilstandene "Finding" og "Leakage" krever produksjonsstans ved rørbytte. Dette er grunnen for at de har egne kostnader har kostnader knyttet opp mot produksjonsstans. Tilstanden "Leakage" har også kostnader knyttet mot en potensiell ulykke.

Tabell 4.10: Direkte vedlikeholdskostnader, produksjonsstans, og ulykke

Kostnad	Material [NOK]	Produksjonsstans	Ulykke
Inspeksjon	120.000	Ikke aktuelt	Ikke aktuelt
Light damage	20.000	Ikke aktuelt	Ikke aktuelt
Observation	40.000	Ikke aktuelt	Ikke aktuelt
Finding	100.000	1.500.000	Ikke aktuelt
Leakage	150.000	1.500.000	2.000.000

Videre har vi løpende kostnader som øker lineært med tiden en befinner seg i de ulike tilstandene. Økende korrosjon gjør at en større del av rørmaterialet korroderer bort, samtidig som at korrosjonene sprer seg horisontalt på overflaten. Dette gjør at kostnaden for utbedring og reparasjon øker for hver tidsenhet systemet er i de ulike tilstandene. Fra kapittel 4.3.1 vet vi også at korrosjonsraten øker mellom tilstandene, som også kan bidra til økte kostnader. Kostnadene er antagelser basert på gjennomsnittskostnader for inspeksjoner og reparasjoner for korrosjon under isolasjon hentet fra [Oceaneering, 2017](#).

Tabell 4.11: Løpende kostnader i de ulike tilstandene

Tilstand	Løpende kostnader [NOK/mnd]
Light damage	2 500
Observation	4 000
Finding	15 000

4.4 Avgrensninger og antagelser

4.4.1 Antagelser i Markov-diagram

- Vi antar at lekkasjer oppdages umiddelbart.
- Vi antar at overgangen mellom bevist-tilstand til neste bevist-tilstand har den samme overgangsraten som skjult-tilstand til neste skjult-tilstand.
- Vi benytter tre uavhengige inspeksjonsintervall som er basert på hvilken tilstand røret befinner seg i. Dette er noe som kan være vanskelig å si med nøyaktighet i praksis, men vil benyttes i den videre modelleringen for utprøving av ulike vedlikeholdsstrategier.

4.4.2 Avgrensninger i analyse

På grunn av databasens innhold og oppbygning, har vi i dette kapittelet sett bort fra enkelte faktorer som påvirker korrosjonsdannelse. Som beskrevet i kapittel [4.3.1](#) har vi samlet inspeksjoner med følgende spesifikasjoner:

- Rør laget av karbonstål
- Rørdiameter mellom 25-100mm
- Veggtykkelse mellom 5-6mm
- Installasjonsår 2007
- Driftstemperatur 40-120°C

Dette betyr at vi har utelukket enkelte faktorer som påvirker korrosjonsdannelse. Fra kapittel [3.1](#) vet vi at faktorer som klima, plassering i anlegget og ulike isolasjonssystem kan ha innvirkning på korrosjon, men disse faktorene er ikke inkludert i vår analyse.

Da analysen er gjennomført på inspeksjoner med nevnte spesifikasjoner, er funnene fra analysen ikke universelle. Fra kapittel [3.1](#) vet vi at rørdiameter, overflatetemperatur og rørmateriell påvirker korrosjonsdannelse i stor grad, og derfor er ikke denne analysen representativ for alle rørspekifikasjoner i anlegget.

Vi antar at korrosjonsraten innenfor de ulike tilstandene er lineær. Dette er noe som støttes av litteraturen såfremt forholdene er konstante ([Vachtsevanos et al., 2020](#)). Vi vet også fra kapittel [3](#) at korrosjonsraten avhenger av forhold som temperatur, fuktighet, medium og geografi. Vi antar derfor videre i analysen at disse forholdene vil være konstante innenfor de ulike tilstandene.

Korrosjon vil føre til lekkasje i rør når veggtykkelsen reduseres til et nivå som ikke er i stand til å støtte det indre trykket. Hvilket trykk et rørsystem er utsatt for, og er i stand til å tåle, bestemmes av type medium, temperatur, kvalitet på stålet og en rekke andre faktorer. Det vil derfor være vanskelig å si konkret hvor mye korrosjon et rør vil kunne tåle før det fører til en lekkasje. Vi har derfor med bakgrunn i egne erfaringer, og samtaler med Maintech valgt å anta at en gjennomsnittlig lekkasje vil kunne oppstå ved korrosjon over 4mm på de rørene vi har inkludert i analysen.

5 Modelling

I dette kapitlet skal vi ved hjelp av Markov-diagrammet fra kapittel 4.1 modellere ulike vedlikeholdsstrategier. I arbeidet med modelleringen tar vi utgangspunkt i en allerede etablert Markov-modell i Microsoft Excel, og videreutvikler denne slik at den reflekterer Markov-diagrammet. Tabell 5.1 viser overgangsmatrisen i modellen.

Tabell 5.1: Overgangsmatrise

Til →		<i>OK</i>	<i>LD</i>	<i>O</i>	<i>F</i>	<i>L</i>	<i>LD_B</i>	<i>LD_R</i>	<i>O_B</i>	<i>O_R</i>	<i>F_B</i>
Fra	<i>OK</i>		λ_1								
↓	<i>LD</i>			λ_2							
	<i>O</i>				λ_3						
	<i>F</i>					λ_4					
	<i>L</i>	μ_4									
	<i>LD_B</i>			λ_{20}				μ_1			
	<i>LD_R</i>		λ_5								
	<i>O_B</i>				λ_{30}					μ_2	
	<i>O_R</i>			λ_5							
	<i>F_B</i>	μ_3				λ_4					

Tabell 5.2: Symbolforklaring fra tabell 5.1 og tabell 5.3

Symbol	Beskrivelse	Rate
Overgangsrate λ_1	Overgangsrate fra <i>OK</i> til <i>LD</i>	0.011261
Overgangsrate λ_2 og λ_{20}	Overgangsrate fra <i>LD</i> til <i>O</i> samt <i>LD_B</i> til <i>O</i>	0.023810
Overgangsrate λ_3 og λ_{30}	Overgangsrate fra <i>O</i> til <i>F</i> samt <i>O_B</i> til <i>F</i>	0.012077
Overgangsrate λ_4	Overgangsrate fra <i>F</i> til <i>L</i> samt <i>F_B</i> til <i>L</i>	0.017007
Overgangsrate λ_5	Overgangsrate fra <i>LD_R</i> til <i>LD</i> samt <i>O_R</i> til <i>O</i>	0.013441
Reparasjonsrate μ_1	Reparasjon av Light Damage. Nålepikking og ny coating	0.166667
Reparasjonsrate μ_2	Reparasjon av Observation. Nålepikking og ny coating	0.083333
Reparasjonsrate μ_3	Reparasjon av Finding. Bytte av korrodert rør	0.041667
Reparasjonsrate μ_4	Reparasjon av Leakage. Bytte av korrodert rør	0.016667
Inspeksjonsintervall t_1	Inspeksjonsintervall	120mnd
Inspeksjonsintervall t_2	Inspeksjonsintervall	120mnd
Inspeksjonsintervall t_3	Inspeksjonsintervall	120mnd
Inspeksjonsnøyaktighet P_{INSP}	Sannsynlighet for vellykket inspeksjon	95%

I tillegg til en overgangsmatrise har vi satt opp en inspeksjonsmatrise. Tabell 5.3 viser inspeksjonsmatrisen. Siden vi bestemte oss for å ta utgangspunkt i en allerede etablert Markov-model, har vi ikke tatt inspeksjonsmatrisen med i den videre modelleringen. Matrisen kunne vært integrert i modellen ved hjelp av for eksempel MatLab. Som beskrevet i kapittel 4.3.2 har vi sagt at en vanlig inspeksjon av har 95% sannsynlighet for å lykkes. Det vil si at det er 5% sannsynlighet for at modellen blir stående i samme tilstand etter en inspeksjon.

Tabell 5.3: Inspeksjonsmatrise

Til →		<i>OK</i>	<i>LD</i>	<i>O</i>	<i>F</i>	<i>L</i>	<i>LD_B</i>	<i>LD_R</i>	<i>O_B</i>	<i>O_R</i>	<i>F_B</i>
Fra	<i>OK</i>	1									
↓	<i>LD</i>		$1 - P_{INSP}$				P_{INSP}				
	<i>O</i>			$1 - P_{INSP}$					P_{INSP}		
	<i>F</i>				$1 - P_{INSP}$						P_{INSP}
	<i>L</i>					1					
	<i>LD_B</i>						1				
	<i>LD_R</i>							1			
	<i>O_B</i>								1		
	<i>O_R</i>									1	
	<i>F_B</i>										1

Markov-modellen vil så beregne en sannsynlighet for å være i de ulike tilstandene, men vi er også interessert i frekvensen for hvor ofte vi besøker de ulike tilstandene. Ved å multiplisere sannsynligheten for å være i en tilstand, med overgangsraten til "neste" tilstand, kan en beregne hvor ofte en besøker "neste" tilstand. Ligning 5.1 benyttes for dette [Rausand and Høyland, 2004](#).

$$Frekvens_{tilstand+1} = P_{tilstand} \times \lambda_{tilstand+1} \quad (5.1)$$

Videre skal sannsynlighet og frekvens for de ulike tilstandene multipliseres med kostnader. På den måten kan vi sette en totalpris på de ulike vedlikeholdsstrategiene.

5.1 Kostnader

For å bestemme kostnadsnivået for de ulike vedlikeholdsstrategiene vil vi videre sette opp kostnadsligninger. Tabell 5.4 viser kostnadene som er hentet fra kapittel 4.3.3 samt symbolene som blir brukt i kostnadsligningene.

Tabell 5.4: Kostnader

Kostnad	Sum	Symbol
Inspeksjon [NOK/10 meter]	120.000	C_{INSP}
reparasjon av LD [NOK/10 meter]	20.000	$CREP_{LD}$
reparasjon av O [NOK/10 meter]	40.000	$CREP_O$
reparasjon av F [NOK/10 meter]	100.000	$CREP_F$
reparasjon av L [NOK/10 meter]	150.000	$CREP_L$
Løpende kostnad i LD [NOK/mnd]	2.500	C_{LD}
Løpende kostnad i O [NOK/mnd]	4.000	C_O
Løpende kostnad i F [NOK/mnd]	15.000	C_F
Produksjonstap	1.500.000	C_{PRO}
Ulykkeskostnad	2.000.000	C_{ULY}

Ligning 5.2 viser kostnadsligningen for inspeksjonskostnadene. Kostnadene er hentet fra tabell 5.4. Her blir kostnaden per inspeksjon dividert på hvor ofte en gjennomfører inspeksjonene, og på den måten finner vi gjennomsnittlig kostnad per måned.

$$Cost_I = \frac{C_{INSP}}{\tau_1} + \frac{C_{INSP}}{\tau_2} + \frac{C_{INSP}}{\tau_3} \quad (5.2)$$

Videre viser ligning 5.3 kostnaden av å være i de ulike tilstandene. Fra kapittel 4.3.3 er dette løpende kostnader som akkumuleres som følge av at korrosjonen sprer seg horisontalt på røret. Kostnaden for de ulike tilstandene multipliseres med sannsynligheten for å være i de ulike tilstandene.

$$Cost_P = C_{LD}(P_{LD} + P_{LDB}) + C_O(P_O + P_{OB}) + C_F(P_F + P_{FB}) \quad (5.3)$$

Etter at inspeksjonene har avdekket skade på rørene, må disse repareres. I ligning 5.4 multipliseres reparasjonskostnaden og besøksfrekvensen til de ulike reparerttilstandene. Besøksfrekvensen til "Finding, reparert" og "Lekkasje" multipliseres også med produksjonstap, da disse krever utbygging av rør. Besøksfrekvensen til "Lekkasje" multipliseres også med en ulykkeskostnad.

$$Cost_R = (F_{LDR} \times CREP_{LD}) + (F_{OR} \times CREP_O) + (F_{FR} \times (CREP_F + C_{PRO})) + (F_L \times (CREP_L + C_{PRO} + C_{ULY})) \quad (5.4)$$

I ligning 5.5 summeres alle kostnadene for en gjennomsnittlig månedlig kostnad, og det er dette resultatet som avgjør kostnaden av de ulike vedlikeholdsstrategiene.

$$Cost_{TOT} = Cost_I + Cost_P + Cost_R \quad (5.5)$$

5.2 Modellering av dagens vedlikeholdsstrategi

Som beskrevet i kapittel 3.5 har Maintech som mål om å inspisere samtlige punkter i løpet av 20 år. Vi antar at de inspiserer like mange punkt hvert år, noe som betyr et gjennomsnittlig inspeksjonsintervall på 10 år. Vi vet også at de reparerer alle funn uavhengig av tilstand. Tabell 5.5 viser resultatet av å modellere dagens vedlikeholdsstrategi i modellen vi har utviklet. Fra tabellen kan vi lese at dagens vedlikeholdsstrategi koster i snitt 13.500 kroner månedlig, der 3000 kroner går til inspeksjon. Vi ser også at det er 41 år mellom hver "Leakage".

Tabell 5.5: Resultater fra dagens vedlikeholdsstrategi. Resultat i vedlegg 5.1

Dagens vedlikeholdsstrategi med inspeksjon hvert 10 år.	
Total kostnad/mnd [NOK]	13.500
Inspeksjonskostnad/mnd [NOK]	3000
Tid mellom hver "Leakage" [år]	41

5.3 Modellering av alternative vedlikeholdsstrategier

Fra kapittel 5.2 har vi beregnet prisen og lekkasjefrekvensen av dagens vedlikeholdsstrategi. Videre i kapitlet vil vi simulere alternative vedlikeholdsstrategier. Følgende strategier vil bli simulert:

1. Optimalt inspeksjonsintervall med hensyn på kostnad og sikkerhet.
2. Hyppig NDT-inspeksjon i "Finding".
3. Kun bruk av NDT-inspeksjon.
4. Bruk av spesialressurser for å avdekke korrosjon.
5. Bruk raskere og dyrere reparasjoner.
6. Ingen inspeksjon i "Light damage"
7. Utsette reparasjon av "Finding" til revisjonsstans.
8. Implementering av sensorer og digital tvilling.

5.3.1 Alternativ strategi 1: Optimalt inspeksjonsintervall

Den første vedlikeholdsstrategien vi har valgt å simulere er å modifisere dagens vedlikeholdsstrategi i håp om å få ned kostnadene samtidig som vi beholder eller forbedrer sikkerheten. I motsetning til dagens vedlikeholdsstrategi har vi i denne simuleringen variert inspeksjonsintervallene basert på hvilken tilstand røret er i. Vi har beholdt τ_1 til 10 år, da dette er dagens vedlikeholdsstrategi og et intervall som viser seg å være optimalt.

Tabell 5.6 viser resultatene av å sette τ_2 og τ_3 til henholdsvis 7 og 5 år. Vi ser at sammenlignet med dagens vedlikeholdsstrategi oppnår vi en marginal besparelse på månedlig totalkostnad, men inspeksjonskostnaden øker med nesten 50%. Dette kommer av hyppigere inspeksjoner, men besparelsene kommer av færre lekkasjer og større reparasjoner. Videre ser vi at tiden mellom hver lekkasje øker fra 41 til 49 år.

Tabell 5.6: Resultater av vedlikeholdsstrategi 1: $\tau_1 = 10$, $\tau_2 = 7$ og $\tau_3 = 5$. Resultat i vedlegg 5.2

		Differanse fra dagens vedlikeholdsstrategi
Kostnad/mnd [NOK]	13.500	-0,1%
Inspeksjonskostnad/mnd [NOK]	4430	47,6%
Tid mellom hver "Leakage" [år]	49	19%

Et annet alternativ kan vi lese fra tabell 5.7. Her har vi justert τ_2 og τ_3 til henholdsvis 8 og 7 år. Med dette oppnår vi en økt besparelse på månedlig totalkostnad, samtidig som månedlig inspeksjonskostnad er betydelig lavere enn hva vi kan lese fra tabell 5.6. Her oppnår vi også en forbedring av sikkerheten, da lekkasje oppstår i gjennomsnitt hvert 45 år.

Tabell 5.7: Resultater av vedlikeholdsstrategi 1: $\tau_1 = 10$, $\tau_2 = 8$ og $\tau_3 = 7$. Resultat i vedlegg 5.2

		Differanse fra dagens vedlikeholdsstrategi
Kostnad/mnd [NOK]	13.420	-0,69%
Inspeksjonskostnad/mnd [NOK]	3680	22,6%
Tid mellom hver "Leakage" [år]	45	9,5%

Som følge av hyppigere inspeksjoner ser vi at med denne strategien kan kostnadene øke på kort sikt, men totalen vil gi lavere kostnad, samtidig som vi har en betydelig økning i sikkerheten ved lekkasje i gjennomsnitt hvert 45 år .

5.3.2 Alternativ strategi 2: Hyppig NDT-inspeksjon i "Finding"

Fra alternativ strategi 1 har vi erfart at hyppigere inspeksjon i spesielt "Finding" vil øke tiden mellom hver lekkasje. I alternativ strategi 2 vil vi se på muligheten for ytterligere hyppighet for inspeksjoner i "Finding". På grunn av arbeidsomfanget av tradisjonelle inspeksjoner er det lite realistisk med hyppige inspeksjoner på denne måten, og vi vil derfor basere denne simuleringen på NDT-inspeksjon. NDT-inspeksjon baserer seg på røntgen eller ultralyd, og krever ikke avisolering. Ulempene med metodene er mange [Amer et al., 2018], og studier viser gjennomsnittlig nøyaktighet på rundt 50% [Stephens, 2000].

Tabell 5.8 viser endringene vi gjorde når vi simulerte denne strategien. I tillegg til å endre inspeksjonsnøyaktigheten og inspeksjonskostnaden måtte vi også øke kostnaden av å reparere "Finding". Dette da tradisjonell inspeksjon inkluderer kostnaden av avisolering og reisolering, og dette er noe som må gjøres dersom NDT-inspeksjon avdekker korrosjon.

Tabell 5.8: Endringer sammenlignet med dagens vedlikeholdsstrategi

Endringer	Dagens verdi	Ny verdi
Inspeksjonskostnad for τ_3 [NOK]	120.000	40.000
Kostnad for å reparere "Finding" [NOK]	100.000	200.000
Inspeksjonsnøyaktighet for τ_3	95%	50%

Tabell 5.9 og 5.10 viser resultatene av å justere på τ_2 og τ_3 . Vi ser at sammenlignet med dagens vedlikeholdsstrategi oppnår vi en besparelse på rundt 5% på totalkostnaden, men inspeksjonskostnaden øker med rundt 20%. Dette kommer av hyppigere inspeksjoner, men besparelsene kommer av færre lekkasjer og større reparasjoner. Videre ser vi at tiden mellom hver lekkasje øker fra 41 til 48 og 49 år.

Tabell 5.9: Resultater av vedlikeholdsstrategi 2: $\tau_1 = 10$, $\tau_2 = 7$ og $\tau_3 = 3$. Resultat i vedlegg 5.3

		Differanse fra dagens vedlikeholdsstrategi
Kostnad/mnd [NOK]	12.800	-5,3%
Inspeksjonskostnad/mnd [NOK]	3540	18%
Tid mellom hver "Leakage" [år]	48	16.4%

Tabell 5.10: Resultater av vedlikeholdsstrategi 2: $\tau_1 = 10$, $\tau_2 = 6$ og $\tau_3 = 3$. Resultat i vedlegg 5.3

		Differanse fra dagens vedlikeholdsstrategi
Kostnad/mnd [NOK]	12.800	-5,29%
Inspeksjonskostnad/mnd [NOK]	3780	26%
Tid mellom hver "Leakage" [år]	49	19.8%

5.3.3 Alternativ strategi 3: Kun bruk av NDT-inspeksjon

I denne strategien skal vi se på effekten av å bytte ut alle de tradisjonelle inspeksjonene med NDT-inspeksjoner. I likhet med alternativ vedlikeholdsstrategi 2, må vi her justere enkelte parametere i modellen. Tabell 5.11 viser endringene som var nødvendige. Studier viser gjennomsnittlig nøyaktighet på rundt 50% (Stephens, 2000) ved NDT-inspeksjon, og nøyaktigheten for inspeksjoner ble derfor satt til 50%. Vi reduserte også kostnadene av selve inspeksjonen, men vi måtte også øke kostnaden av reparasjon, da avisolering og reisolering fortsatt er nødvendig.

Tabell 5.11: Endringer sammenlignet med dagens vedlikeholdsstrategi

Endringer	Dagens verdi	Ny verdi
Inspeksjonskostnad [NOK]	120.000	40.000
Kostnad for å reparere "Ligh damage" [NOK]	20.000	120.000
Kostnad for å reparere "Observation" [NOK]	40.000	140.000
Kostnad for å reparere "Finding" [NOK]	100.000	200.000
Inspeksjonsnøyaktighet	95%	50%

Tabell 5.12 viser resultatene av å kun benytte NDT-inspeksjon. Vi ser at sammenlignet med dagens vedlikeholdsstrategi oppnår vi en besparelse på nesten 11% på totalkostnaden, samtidig som inspeksjonskostnaden reduseres med 25%. Videre ser vi at tiden mellom hver lekkasje øker fra 41 til 45 år. Lavere inspeksjonskostnader samtidig som store reparasjoner unngås, er årsaken til denne reduksjonen i kostnad.

Tabell 5.12: Resultater av vedlikeholdsstrategi 3: $\tau_1 = 7$, $\tau_2 = 5$ og $\tau_3 = 3$. Resultat i vedlegg 5.4

		Differanse fra dagens vedlikeholdsstrategi
Kostnad/mnd [NOK]	12.100	-10.6%
Inspeksjonskostnad/mnd [NOK]	2250	-25%
Tid mellom hver "Leakage" [år]	45	9%

5.3.4 Alternativ strategi 4: Bruk av spesialressurser

Fra kapittel 4.3.2 vet vi at dagens inspeksjoner har en nøyaktighet på 95%. I denne vedlikeholdsstrategien simulerer vi effekten ved bruk av spesialverktøy eller spesialkompetanse til inspeksjonene. Her vil vi oppnå inspeksjonsnøyaktighet på 100%, men inspeksjonskostnaden øker. Tabell 5.13 viser endringene som ble gjort ved denne simuleringen.

Tabell 5.13: Endringer sammenlignet med dagens vedlikeholdsstrategi

Endringer	Dagens verdi	Ny verdi
Inspeksjonskostnad [NOK]	120.000	160.000
Inspeksjonsnøyaktighet	95%	100%

Tabell 5.14 viser resultatene av å benytte spesialressurser. Vi ser at sammenlignet med dagens vedlikeholdsstrategi blir dette en dyrere løsning med økning for både total kostnad og inspeksjonskostnad, med en økning på henholdsvis 8.9% og 97%. Videre ser vi at gjennomsnittlig tid mellom hver lekkasje øker fra 41 til 50 år.

Tabell 5.14: Resultater av vedlikeholdsstrategi 4: $\tau_1 = 10$, $\tau_2 = 7$ og $\tau_3 = 5$. Resultat i vedlegg 5.5

		Differanse fra dagens vedlikeholdsstrategi
Kostnad/mnd [NOK]	14.800	8.9%
Inspeksjonskostnad/mnd [NOK]	5900	97%
Tid mellom hver "Leakage" [år]	50	22.2%

5.3.5 Alternativ strategi 5: Raskere- og dyrere reparasjoner

Denne vedlikeholdsstrategien ser på effekten av raskere- og dyrere reparasjoner. Dette kan gjøres ved å øke antall personer i arbeidslaget eller benytte spesialkompetanse som arbeider raskere. Tabell 5.15 viser endringene vi har gjort. Vi har doblet hastigheten og kostnaden av alle reparasjoner.

Tabell 5.15: Endringer sammenlignet med dagens vedlikeholdsstrategi

Endringer	Dagens verdi	Ny verdi
Reparasjonstid LD	2 uker	1 uke
Reparasjonstid O	4 uker	2 uke
Reparasjonstid F	2 måneder	1 måned
Reparasjonstid L	5 måneder	2,5 måneder
Reparasjonskostnad LD [NOK]	20.000	40.000
Reparasjonskostnad O [NOK]	40.000	80.000
Reparasjonskostnad F [NOK]	100.000	200.000
Reparasjonskostnad L [NOK]	150.000	300.000

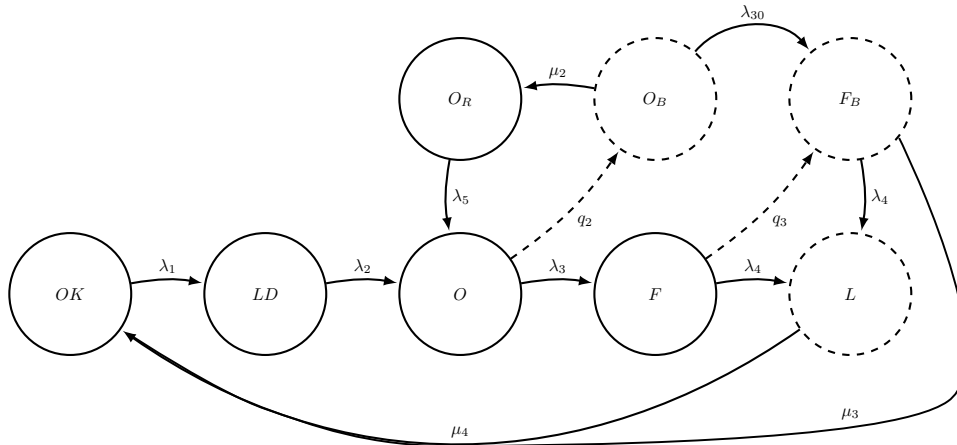
Tabell 5.16 viser resultatene av å benytte raskere- og dyrere reparasjoner. Vi ser at totalkostnaden øker med 2%, samtidig som inspeksjonskostnaden øker med nesten 50%. Vi ser at sammenlignet med dagens vedlikeholdsstrategi blir dette en dyrere løsning for både totalkostnad og inspeksjonskostnad. Videre ser vi at tiden mellom hver lekkasje øker fra 41 til 51 år.

Tabell 5.16: Resultater av vedlikeholdsstrategi 5: $\tau_1 = 10$, $\tau_2 = 7$ og $\tau_3 = 5$. Resultat i vedlegg 5.6

		Differanse fra dagens vedlikeholdsstrategi
Kostnad/mnd [NOK]	13.820	1.75%
Inspeksjonskostnad/mnd [NOK]	4430	47.6%
Tid mellom hver "Leakage" [år]	51	23.3%

5.3.6 Alternativ strategi 6: Ikke reparasjon av "Light damage"

I denne vedlikeholdsstrategien skal vi se på effekten av å ikke inspisere og reparere tilstanden "Light damage". Figur 5.1 viser hvordan vi har modifisert det opprinnelige Markov-diagrammet.



Figur 5.1: Modifisert Markov-diagram. Fjernet tilstandene LD_B og LD_R samt overgangene fra disse.

Tabell 5.17 viser resultatene av å ikke gjennomføre reparasjoner av "Light damage". Vi ser at totalkostnadene minker med 3%, samtidig som vi oppnår bedre sikkerhet med en økning på 11.6% i tiden mellom hver lekkasje. Samtidig som at inspeksjonskostnaden øker med 14.3%.

Tabell 5.17: Resultater av vedlikeholdsstrategi 6: $\tau_2 = 7$ og $\tau_3 = 5$. Resultat i vedlegg 5.7

		Differanse fra dagens vedlikeholdsstrategi
Kostnad/mnd [NOK]	13.100	-3%
Inspeksjonskostnad/mnd [NOK]	3430	14.3%
Tid mellom hver "Leakage" [år]	46	11.6%

Tabell 5.18 viser også resultatene av å ikke gjennomføre reparasjoner av "Light damage", men her med NDT-inspeksjon i "Finding". Vi ser at totalkostnadene går ned med 8.3%, samtidig som vi oppnår bedre sikkerhet med en økning i tid mellom hver lekkasje på 12.2%. I motsetning til tabell 5.17 ser vi her at vi oppnår en lavere inspeksjonskostnad med en reduksjon på 7.4%.

Tabell 5.18: Resultater av vedlikeholdsstrategi 6 med bruk av NDT i "Finding": $\tau_2 = 6$ og $\tau_3 = 3$. Resultat i vedlegg 5.7

		Differanse fra dagens vedlikeholdsstrategi
Kostnad/mnd [NOK]	12.400	-8.3%
Inspeksjonskostnad/mnd [NOK]	2780	-7.4%
Tid mellom hver "Leakage" [år]	46	12.2%

5.3.7 Alternativ strategi 7: Utsatt vedlikehold av "Finding" til revisjonsstans

I denne vedlikeholdsstrategien skal vi se på effekten av å utsette reparasjon av "Finding" til nærmeste revisjonsstans, og på den måten spare produksjonstapet. Vi antar at dette anlegget er revisjonsstans hvert 3. år, og at det inspiseres jevnlig. Gjennomsnittlig er vi da 1,5 år unna en revisjonsstans til enhver tid gjennomfører vi reparasjon av "Finding" 1,5 år etter at det er avdekket. Dette medfører at vi sparer produksjonstapet.

Tabell 5.19: Endringer sammenlignet med dagens vedlikeholdsstrategi

Endringer	Dagens verdi	Ny verdi
Produksjonstap ved reparasjon av "Finding" [NOK]	1.500.000	0
Reparasjonshastighet av "Finding"	2 måneder	1,5 år

Tabell 5.20 viser resultatene av å utsette reparasjon av "Finding" til nærmeste revisjonsstans. Vi beholder dagens inspeksjonsintervaller på 10 år. Vi ser at totalkostnaden øker med over 10%, og lekkasje oppstår etter 35 år. Hovedårsaken til at kostnaden øker er at kostnaden for lekkasje er stor, og dette oppstår raskere enn ved dagens vedlikeholdsstrategi.

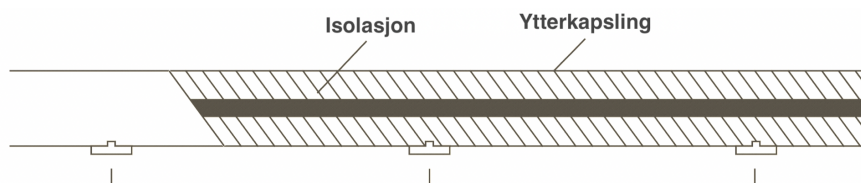
Tabell 5.20: Resultater av case 7: Revisjonsstans, $\tau_1 = 10$, $\tau_2 = 10$ og $\tau_3 = 10$. Resultat i vedlegg 5.8

		Differanse fra dagens vedlikeholdsstrategi
Kostnad/mnd [NOK]	15.020	10.6%
Inspeksjonskostnad/mnd [NOK]	3000	0%
Tid mellom hver "Leakage" [år]	35	-15.3%

5.3.8 Alternativ strategi 8: Implementering av sensorer og digital tvilling

I denne vedlikeholdsstrategien ser vi på fordelene ved å implementere sensorer og digital tvilling. Figur 5.2 viser hvordan fuktighets- og temperatursensorer kan plasseres på ytterkapslingen for å detektere korrosjon.

Ved å implementere sensorer som kontinuerlig overvåker kan en slippe de tradisjonelle inspeksjonene, og på den måten eliminere inspeksjonskostnaden. Tabell 5.21 viser også at vi har økt reparasjonskostnadene og inspeksjonsnøyaktigheten.



Figur 5.2: Trådløse sensorer som er montert på ytterkapslingen til et isolert rør Indusenz, ud

Tabell 5.21: Endringer sammenlignet med dagens vedlikeholdsstrategi

Endringer	Dagens verdi	Ny verdi
Inspeksjonskostnad [NOK]	120.000	0
Inspeksjonsintervall	10 år	1 måned
Inspeksjonsnøyaktighet	95%	100%
Kostnad for å reparere "Ligh damage" [NOK]	20.000	120.000
Kostnad for å reparere "Observation" [NOK]	40.000	140.000
Kostnad for å reparere "Finding" [NOK]	100.000	200.000

Tabell 5.22 viser resultatene av å benytte seg av sensorer og digital tvilling. Her er det viktig å påpeke at vi har antatt inspeksjonsnøyaktighet på 100%. Vi ser at dette gir en månedlig kostnad på 1895 kroner, og at lekkasje oppstår hvert 332 år. Totalkostnaden her inkluderer ikke installasjon, drift og vedlikehold av sensorer og digital tvilling.

Tabell 5.22: Resultater av vedlikeholdsstrategi 8: $\tau = 1$ måned. Resultat i vedlegg 5.9

		Differanse fra dagens vedlikeholdsstrategi
Kostnad/mnd [NOK]	1895	-86%
Inspeksjonskostnad/mnd [NOK]	0	-100%
Tid mellom hver "Leakage" [år]	332	700%

Fra modellering av dagens vedlikeholdsstrategi i kapittel 5.2 vet vi at strategien har en månedlig totalkostnad på 13.500 kroner. Da resultatene fra bruk av digital tvilling har en totalkostnad på 1895 kroner, må kostnaden for installasjon, drift og vedlikehold av anlegget være under 11.605 kroner/måned for at dette skal gi økonomisk gevinst.

6 Analyse

Tabell 6.1 viser kostnaden av dagens vedlikeholdsstrategi samt resultatene fra de ulike strategiene vi modellerte i kapittel 5.3. Videre i kapittelet drøftes resultatet og mulighetene med de ulike strategiene.

Tabell 6.1: Sammenligning av resultater fra modelleringen. MTTF er tiden det tar mellom hver lekkasje. MTTF er oppgitt i prosentvis endring sammenlignet med dagens vedlikeholdsstrategi

Strategi	Totalkost	Inspeksjonskost	MTTF
Dagens vedlikeholdsstrategi	13.500kr	3.000kr	41
1: Optimalt inspeksjonsintervall	-0.69%	+22.6%	+9.5%
2: NDT-inspeksjon i "Finding"	-5.29%	+26%	+19.8%
3: NDT-inspeksjon i alle tilstander	-10.6%	-25%	+9%
4: Spesialressurser for bedre nøyaktighet	+8.9%	+97%	+22.2%
5: Raskere og dyrere reparasjoner	+1.75%	+47.6%	+23.3%
6: Ingen inspeksjon i "Light damage"	-8.3%	-7.4%	+12.2%
7: Utsette reparasjon til revisjonsstans	+10.6%	0%	-15.3%
8: Digital tvilling og sensorer	-86% + montasje	-100%	+700%

6.1 1: Optimalt inspeksjonsintervall

Denne vedlikeholdsstrategien er relativt lik dagens strategi, men her intensiveres inspeksjonene etter hvert som tiden går og korrosjon eventuelt oppstår. Tanken med strategien er å avdekke korrosjon før "Finding" og "Leakage" oppstår, og på den måten unngå de store reparasjonene, produksjonstapene og risikoen dette innebærer. Resultatet av strategien viser at den vil øke tiden mellom hver lekkasje betraktelig, men den potensielle besparelsen i totalkostnad er marginal. Samtidig ser vi at de kortsiktige kostnadene knyttet til inspeksjonsarbeid vil øke. Av praktiske årsaker valgte vi ikke å inkludere hyppigere intervall enn hvert femte år, da arbeidsomfanget vil bli urealistisk høyt i forhold til hva som kan gjennomføres i praksis.

Med dette må en vurdere om anleggets planlagte driftshorisont er lang nok til at denne strategien vil lønne seg, og om anleggets størrelse er stor nok til at strategien er verdt å forske videre på.

6.2 2: NDT-inspeksjon i "Finding"

Erfaringene fra "Strategi 1" viser at hyppig inspeksjon i "Finding" gir positive utslag på lekkasjeraten. NDT-inspeksjon er en type inspeksjon som krever mindre ressurser og er billigere å gjennomføre. Som tabell 6.1 viser, vil metoden gi en høyere, kortsiktige kostnad knyttet til inspeksjonene, samtidig som tiden mellom hver lekkasje øker betraktelig. Vi ser også en stor besparelse i totalkostnaden.

Resultatet fra denne metoden er litt det samme som "Strategi 1". Vi vil få en økt månedlig inspeksjonskostnad, men totalkostnaden vil bli lavere. Med dette må en vurdere om anleggets planlagte driftshorisont er lang nok til at denne strategien vil lønne seg.

6.3 3: NDT-inspeksjon i alle tilstander

Fra "Strategi 2" erfarte vi at selv med 50% inspeksjonsnøyaktighet og NDT-inspeksjon kunne vi oppnå en lavere total kostnad og økt sikkerhet. Ved å benytte seg av hyppigere NDT-inspeksjoner i alle tilstander var målet å redusere kostnaden ytterligere. Som tabell 6.1 viser, ga denne modelleringen den største besparelsen på både total kostnad og inspeksjonskostnad, samtidig som vi fikk nesten 10% økning i gjennomsnittlig tid mellom hver lekkasje.

Resultatet fra denne metoden gir gode resultater på alle tre variablene. Det er imidlertid stor usikkerhet ved bruk av NDT-inspeksjon og det er vanskelig å anbefale utelukkende bruk av NDT. Dette kan imidlertid indikere at en kombinasjon av tradisjonell- og NDT-inspeksjon kan gi positive utslag både på kostnader og lekkasjerater.

6.4 4: Spesialressurser for bedre nøyaktighet

Vi vet at de tradisjonelle inspeksjonene ikke har 100% inspeksjonsnøyaktighet, og i "Strategi 4" så vi på effekten av å benytte spesialkompetanse eller spesialverktøy i inspeksjonsarbeidet. Tanken ved å bruke denne type spesialressurser i arbeidet var at dette skulle øke inspeksjonsnøyaktigheten til 100%, men med en liten økning i inspeksjonskostnaden. Som tabell 6.1 viser, ga strategien en betydelig økning i både månedlig total kostnad og månedlig inspeksjonskostnad. Metoden ga også 22% økning i gjennomsnittlig tid mellom hver lekkasje.

Resultatet viser at denne metoden gir en økt kostnad, men samtidig oppnår vi en svært god effekt på gjennomsnittlig lekkasjerate. Selv om metoden er kostbar, gir den også en av de beste lekkasjeratene vi modellerte, og kan derfor være aktuell i deler av anlegget med potensielle store produksjonstap eller økt risiko.

6.5 5: Raskere og dyrere reparasjoner

I denne strategien så vi på effekten ved å gjennomføre reparasjonene raskere. For eksempel ved bruk av flere arbeidslag. Vi ser fra tabell 6.1 at metoden resulterte i en liten økning i total kostnad, men samtidig oppnår vi en betydelig økning i tiden mellom hver lekkasje.

Denne strategien kan tenkes å være egnet i situasjoner hvor stans i produksjonen vil være spesielt kritisk. Eventuelt kan denne metoden være aktuell om et produksjonstap vil være på et høyere nivå enn det vi har brukt i modelleringene.

6.6 6: Ingen reparasjon av "Light damage"

Da tiden mellom "Light damage" og "Observation" er relativt kort sammenlignet med de andre overgangene i modellen, ville vi se på effekten ved å utsette reparasjoner frem til tilstanden "Observation". Med optimalt inspeksjonsintervall viser resultatene i tabell 6.1 en tydelig besparelse både i total kostnad og inspeksjonskostnad. Vi oppnår også en bedre lekkasjerate.

Denne metoden er ikke veldig ulik dagens vedlikeholdsstrategi, men modelleringen indikerer at den kan ha fordeler. Metoden krever ikke store endringer i dagens vedlikeholdsstrategi, og er derfor relativt enkel å implementere.

6.7 7: Utsette reparasjon til revisjonsstans

Reparasjon av "Finding" krever at en bytter rør, og en må derfor inkludere produksjonstap i reparasjonskostnaden. Vi ønsker å se på effekten ved å utsette reparasjon til neste revisjonsstans, og på den måten unngå produksjonstapet. I modelleringen antok vi at det var 1,5 år til neste revisjonsstans. Resultatene i tabell 6.1 viser at metoden vil øke totalkostnaden betraktelig, men hovedårsaken til dette er at vi vil oppnå "Lekkasje" mens vi venter på revisjonsstans. Vi ser at lekkasjer oppstår betydelig raskere enn i dagens vedlikeholdsstrategi.

Metoden er ikke å anbefale som en universell metode, men modelleringen viser at den kan vurderes dersom det ikke er lenge til neste revisjonsstans, eller at det faktiske produksjonstapet er høyere enn hva vi har modellert med.

6.8 8: Digital tvilling og fuktsensorer

Strategien med bruk av fuktsensorer og digital tvilling førte til de laveste totalkostnadene for vedlikehold av KUI. Resultatet av denne strategien førte til en reduksjon i totalkostnader sammenlignet med dagens vedlikeholdsstrategi på -86%. Modelleringen av denne strategien inkluderte ikke kostnader for montering, drift og vedlikehold. Det vil derfor være nødvendig å vurdere faktiske kostnader opp mot effekt.

Modellen som ble utviklet i denne oppgaven kan tilpasses slik at den fungerer i en digital tvilling med sensorer. Overgangsratene kan beregnes som funksjon av temperatur og fuktighet, og på den måten kontinuerlig beregne sannsynlighet for å være i de ulike tilstandene. En videre mulighet er å videre implementere automatiserte beslutningsprosesser som genererer arbeidsordre når det er behov for inspeksjon eller vedlikehold.

7 Avslutning

7.1 Sammendrag og konklusjon

Arbeidet med oppgaven startet med et ustrukturert litteratursøk for å kartlegge dagens situasjon innen vedlikehold av korrosjon under isolasjon. Med bakgrunn i dette ble det også klarere hvilken vedlikeholdsteori som kunne være relevant, samtidig som vi også kartla ulike metoder som kunne være aktuelle for å nå oppgavens målsetning. Dette ble videre diskutert i kapittel 2 av oppgaven. Valget av teori og modell førte til at vi måtte gjøre enkelte antagelser i dataanalysen, og det har senere blitt diskutert om Markov-modell var et riktig valg for oppgavens problemstilling. Andre alternativer som ble diskutert er PF-modell, og det kan tenkes at valg av en annen modell ville gitt et annet resultat. Litteraturstudiet og teorikapittel ble arbeidet kontinuerlig med gjennom hele prosjektet da innhold og fokusområder endret seg underveis.

Tilgangen til data ble gitt uten videre kjennskap til Maintechs systemer og loggføring. Det ble derfor en tidkrevende prosess med gjennomgang, sortering og dataanalyse. Kvalitet og relevans for oppgaven var også varierende. Gjennomgangen av data viste at det er et stort forbedringspotensial i måten data blir rapport, håndtert og logget i det interne system. Hvilke data som blir rapport og prioritert har også et stort forbedringspotensial for fremtidige dataanalyser. Det hadde også styrket oppgavens dataanalyse dersom antagelser ble validert av eksperter. Dette gjelder også selve Markov-modellen. Flere antagelser måtte gjøres for å kunne utvikle en god modell for oppgaven, noe som kan ha ført til utfordringer og svakheter for praktisk bruk. En av de største svakhetene vi har diskutert er bruken av de ulike inspeksjonsintervall basert på tilstand. I praksis vil dette være vanskelig å gjennomføre da tilstandene er skjult frem til avisolering.

Selv med disse svakhetene vil modellen kunne gi Maintech en indikasjon på hva som kan være lønnsomme vedlikeholdsstrategier og på den måten benyttes som beslutningsstøtte. Modellen vil også kunne oppdateres med mer validerte parametere etter hvert som Maintechs inspeksjoner fører til flere funn, og på den måten bli mer nøyaktig over tid. Det kan også tenkes at Maintech kan benytte modellen som beslutningsstøtte i enkelte deler av anlegget hvor en produksjonstans eller en ulykke vil føre til betydelige kostnader.

Dataanalysen som ble gjennomført og modellen som ble utviklet gjorde det mulig å simulere ulike vedlikeholdsstrategier knyttet til korrosjon under isolasjon. Resultatene indikerer at det er muligheter for optimalisering av vedlikeholdsstrategien samt hvordan vedlikehold av KUI gjennomføres. Dette ble gjort fra et kostnadsperspektiv med en klar målsetning om at det ikke skulle påvirke sikkerheten i negativ grad. Totalkostnadene brukt i modelleringen ble fordelt mellom inspeksjoner, reparasjoner og uforutsette kostnader som produksjonstap eller potensielle ulykker. Modelleringen viser at hyppige inspeksjoner vil resultere i økte inspeksjonskostnader, og derfor vil være dyrere på kort sikt. Langsiktig totalkostnad reduseres da en unngår ulykker, produksjonstap og større reparasjoner. Videre visere både dataanalyse og den påfølgende modelleringen at sannsynligheten for lekkasje stiger betraktelig etter ca. 18 år. Anlegget som vi har tatt utgangspunkt i for vår analyse går nå inn i sitt 15 produksjonsår, noe som kan indikere at det kan være fordelaktig å se kostnader i en større sammenheng og eventuelt vurdere muligheter for optimalisering av vedlikeholdsstrategien som benyttes idag. Som nevnt i [3](#) har Maintech et mål om at alle rørsystemer skal være gjennomgått i løpet av 20 år. Denne strategien kan med bakgrunn i modelleringen diskuteres opp mot risiko, og eventuelt revideres når en har et bedre datagrunnlag.

Det optimaliserte inspeksjonsintervallet viste en minimal reduksjon i total kostnader og en betraktelig økning på 22% i inspeksjonskostnader. Samtidig ble tiden mellom en lekkasje økt med 9.5%. Dette indikerer at nevnte strategi kan være en alternativ vedlikeholdstrategi som kan være mer optimal jo eldre rørsystemene i anlegget blir.

En annen alternativ strategi som ga positive resultater var økt bruk av NDT-inspeksjoner. Begge disse alternative strategiene ga positive resultater i form av reduserte total kostnader og økning i tiden mellom hver lekkasje. Som beskrevet i kapittel [5.3](#) medfører NDT-inspeksjoner også stor unøyaktighet, noe som gjør det vanskelig å konkludere eller anbefale økt bruk av disse uten ytterligere kunnskap.

Ingen reparasjon i "Light damage" ga også et positivt resultat på både kostnad og tid mellom lekkasje.

Den alternative strategien med utsatt reparasjon av "Finding" til neste revisjonsstans førte til økte kostnader og en reduksjon i tiden mellom lekkasjer. Dette kan indikere at vedlikeholdstrategien som Maintech i dag har implementert med umiddelbare igangsetting av reparasjoner ved funn av korrosjon, er en strategi som kan gi positive resultater også i fremtiden.

Strategien med bruk av sensorer og digital tvilling førte til de laveste total kostnadene for inspeksjon, vedlikehold og reparasjon. Disse inkluderte ikke kostnader for montering, implementering og drift, og det vil derfor være nødvendig å se dette i sammenheng med vurderingen for bruken av dette. Vi anser dette som spesielt interessant for utarbeidelse av vedlikeholdsstrategier for nybygde anlegg.

7.2 Diskusjon

Arbeidet med denne oppgaven har vist at korrosjon under isolasjon er en omfattende utfordring innen prosessindustrien. Til tross for at problemstillingen har et betydelig fokus, er vedlikeholdsstrategiene fortsatt på et nivå der menneskelige faktorer og avisolering anses som det mest pålitelige. Årsakene for dette viser seg å være komplekse, men handler i stor grad om kostnader samt potensielle konsekvensene ved en lekkasje.

Vår analyse viser at grunnlaget med innsamlede data fra Maintech har et potensiale for bruk i sammenheng med optimalisering og utvikling av prediktivt vedlikehold. Selv om dette grunnlaget måtte suppleres med antagelser, vil det kunne erstattes med reelle data. Vårt arbeid har bidratt til å synliggjøre hva som er nødvendig informasjon og vil gjøre det enklere å starte en systematisk datainnsamling for Maintech og deres samarbeidspartnere. Det videre arbeidet viser også at modellen som ble utviklet kan være et egnet verktøy for bruk til beslutningsstøtte, og eventuelt som "motor" i en digital tvilling.

Et gjentagende tema som har blitt diskutert mellom forfatterne og veileder, er bruken av Markov-modell med eksponentialfordelte overganger. På grunn av tilgjengelige data måtte vi i oppgaven benytte oss av en pragmatisk tilnærming, hvor vi blant annet beregnet antall millimeter korrosjon pr. tidsenhet for å bestemme overgangsraten. Modellen med eksponentialfordelte overganger, tar utgangspunkt i at det er et «byks» eller «hopp» mellom tilstandene, mens det i realiteten er en gradvis overgang. Det ble diskutert og utprøvd løsninger for dette med bruk av såkalte «Phase-type»-fordelinger, som [Vatn, 2020a](#) gir eksempler på. Det ble imidlertid konkludert mellom forfatterne at det ikke vil være mulig å lage en modell med disse forbedringene på grunn av tidsbegrensninger og mangel på erfaringsdata som kunne støtte utviklingen av «Phase-type»-fordelinger. Vi antar at en slik tilnærming ville styrket modellen, og kunne gjort modellen mer realistisk i forhold til å reflektere aldring av rørsystemene.

Antagelsen vi gjorde ved å benytte varierende inspeksjonsintervall basert på hvilken tilstand systemet er i, var også noe som ble diskutert med veileder. Her kom vi frem til at dette var en egnet måte å gjøre det på, noe som også har blitt gjort i litteraturen [Vatn, 2020b](#). I praksis vil det kanskje være faste intervaller som avhenger av hvilken tilstand man tror rørsystemet kan være i. På grunn av tidsbegrensninger, valgte vi her å gå for en pragmatisk tilnærming der vi antar eksponentialfordelte tider mellom inspeksjonene, avhengig av hvilken tilstand rørsystemet er i. Dette er et aspekt som kunne forbedret modellen ytterligere, noe som kan vurderes i det videre arbeidet.

I analysen tar vi utgangspunkt i en lineær sammenheng mellom faktisk korrosjonsrate og beregnede overgangsrater. Dette betyr at vi bruker en lineær korrosjonsrate innenfor de ulike tilstandene. Det kan tenkes at det ikke vil reflektere virkeligheten, da vi også vet fra kapittel [3](#) at korrosjonsraten avhenger av forhold som temperatur, fuktighet, medium, rørtype, geografi med mer. Disse kan både øke, og avta i størrelse, og trenger nødvendigvis ikke å være konstante. Dette kan påvirke hvilken korrosjonsrate et rør har over en tidsperiode, og dermed også overgangsratene brukt i modellen. Det kan derfor tenkes at korrosjonsraten i virkeligheten kan utvikle seg både hurtigere og langsommere. Dette er som ville vært utfordrende og tatt høyde for i utviklingen av en modell uten bruk av sensorer som måler fuktighet og andre faktorer i sanntid. Dette gjør også videreutviklingen inn mot en digital tvilling enda mer aktuell og interessant.

Kostnadene brukt i oppgaven reflekterer nødvendigvis ikke Maintechs eksakte kostnader, og det

kan tenkes at dette vil gjøre modellen noe unøyaktig. Det kan også være andre feilkilder som har blitt oversett av forfatterne i utarbeidelse av modellen og oppgaven. Kostnader kan derimot tilpasses og justeres etter hvert som datainnsamlingen blir mer systematisk og tilpasses enkeltsaker. Dette gjør modellen dynamisk og mer rettet mot praktisk bruk. En mer systematisk innsamling av data etter hvert som anlegget nærmer seg en økt levealder vil kunne styrke og videreutvikle modellen. Gjøres det en systematisk innsamling av data på tvers av anlegg, vil også disse kunne sammenlignes og valideres gjennom en felles analyse.

Litteratursøket ble tidlig konsentrert rundt korrosjon under isolasjon, prediktivt vedlikehold, modellering av feilutvikling, bruk av digital tvilling og vedlikeholdsoptimalisering. Søkene ble derfor konsentrert mest rundt forståelsen av korrosjon under isolasjon sett opp mot vedlikeholdsstrategier. For å styrke oppgaven kunne det vært en fordel og konsentrert søkene mer mot bruken av Markov-modellering i vedlikeholdsoptimalisering. På denne måten kunne modellen blitt ytterligere tilpasset praktisk bruk og svakheter blitt kontrollert.

7.3 Videre arbeid

En mer systematisk datainnsamling for bruk i videre analyse og modellering er anbefalt. Gjennomføringen av analysen har gjort det tydelig hvilke data som vil være interessant og relevant for videre innsamling. Modellen kan på denne måten valideres og ytterligere tilpasses praktisk bruk, og samtidig være et verktøy for beslutningsstøtte. På kort sikt kan ekspertvurderinger være en god måte for validering og forbedring. I et lengre perspektiv vil det være interessant å sammenligne datagrunnlag for det valgte anlegget, opp mot andre anlegg. På denne måten, kan det tenkes at modellen etter hvert som den valideres og videreutvikles, kan benyttes som beslutningstøtte for anlegg med en lengre levetid enn for anlegget vi har tatt utgangspunkt i for oppgaven.

Et annet interessant aspekt for videre arbeid ville vært implementering av systematiske inspeksjoner for reparerte inspeksjonspunkter. På denne måten kan data hentes inn for hvilken påvirkning en avisolering har på et rørpunkt, samt danne datagrunnlaget for å etablere en overgangsrate for overgangen mellom reparert tilstand og neste overgang.

For videre arbeid med modellen anser vi det som interessant at svakhetene som ble påpekt i diskusjonsdelen ble utbedret, og videre arbeid kunne utføres med en mer avansert modell. Modellen kan også videreutvikles inn mot en digital tvilling med automatiserte beslutningsprosesser. For å lykkes med å integrere slike sanntidsmodeller i praksis; anbefales det å starte med et relativt lite sett standardiserte modeller i verdikjeden til selskapet [Vatn, 2018a](#).

Vi anser bruken av sensorer opp mot en digital tvilling som spesielt interessant innenfor utvikling av vedlikeholdsstrategien. Overgangsratene kan beregnes som funksjon av temperatur og fuktighet, og en må derfor undersøke og konkretisere sammenhengen mellom fuktighet, temperatur og korrosjonsrate. Utprøving av dette hadde vært en interessant videreutvikling av modellen utviklet i denne oppgaven.

8 Vedleggsliste

Vedlegg 4.1: Eksempel fra database.

Vedlegg 5.1: Dagens vedlikeholdsstrategi.

Vedlegg 5.2: Optimalt inspeksjonsintervall med hensyn på kostnad og sikkerhet.

Vedlegg 5.3: Hyppig NDT-inspeksjon i "Finding".

Vedlegg 5.4: Kun bruk av NDT-inspeksjon.

Vedlegg 5.5: Bruk av spesialressurser for å avdekke korrosjon.

Vedlegg 5.6: Bruk raskere og dyrere reparasjoner.

Vedlegg 5.7: Ingen inspeksjon i "Light damage"

Vedlegg 5.8: Utsette reparasjon av "Finding" til revisjonsstans.

Vedlegg 5.9: Implementering av sensorer og digital tvilling.

Vedlegg 4.1: Eksempel fra database

Search	Analyse	Measurements	ID	Inspection point	Insp Date	MeasurementID	Corrosion	Plan Year	Status	Cladding	Insulation	Coating	Scope comment
Tables		Overført 21.06.21	14.2	1	01.01.2013		Light damage		Inspection con OK	OK		Surface Damage	Visuell inspeksjon, ikke
InspeMid		Overført 21.06.21	2163 Z	2	28.04.2020		Light damage		Inspection con Light Damage	OK		Surface Damage	Visuell inspeksjon, ikke
Measurements		Overført 21.06.21	48 Z	01	01.01.2013		Observation		Inspection con OK	Moist		Damaged	Dårlig maling med mull
TagID		Overført	2176 Z	03	04.06.2020		Light damage		Inspection con Not Inspected	Not Inspected		Surface Damage	Visuell inspeksjon, ikke
Hierarchy		Overført 21.06.21	53 Z	01	01.01.2013		Light damage		Inspection con Severe Damage	Moist		Damaged	KU2020_TEG2_6
AreaId		Overført 21.06.21	54.2	02	01.01.2013		Light damage		Inspection con Severe Damage	OK		Not inspected	Visuell inspeksjon, ikke
Corrosion loops		Overført 21.06.21	55.2	01	01.01.2013		Light damage		Inspection con Light Damage	OK		Surface Damage	Visuell inspeksjon, ikke
Tag groups		Overført 21.06.21	56 Z	02	01.01.2013		Light damage		Inspection con Severe Damage	OK		Surface Damage	Visuell inspeksjon, ikke
Tagkeys		Overført 21.06.21	59 Z	01	01.01.2013		Light damage		Inspection con Light Damage	OK		Surface Damage	Visuell inspeksjon, ikke
Lookups		Overført 21.06.21	61 Z	01	01.01.2013		Light damage		Inspection con Severe Damage	OK		Surface Damage	Visuell inspeksjon, ikke
Campaign		Overført 21.06.21	64 Z	01	01.01.2013		Light damage		Inspection con OK	OK		Surface Damage	Visuell inspeksjon, ikke
ClassStatus		Overført	2378 Z	04	01.01.2020		Observation		Inspection con OK	Not Inspected		Damaged	09-113 (RT)
Contract		Overført 21.06.21	2375 Z	01	01.01.2013		Light damage		Inspection con Not Inspected	Not Inspected		Surface Damage	09-016 (RT)
Corrosion		Overført 21.06.21	116 Z	01	01.01.2013		Light damage		Inspection con Light Damage	OK		Surface Damage	Visuell inspeksjon, ikke
Insstatus		Overført 21.06.21	127 Z	02	01.01.2013		Light damage		Inspection con Light Damage	OK		Surface Damage	Visuell inspeksjon, ikke
RBI Coating		Overført 20.06	129 Z	02	01.01.2013		Light damage		Inspection con Light Damage	OK		Surface Damage	Visuell inspeksjon, ikke
Coating Age		Overført 21.06.21	157 Z	04	01.01.2018		Light damage		Inspection con OK	Moist		Surface Damage	Visuell inspeksjon, ikke
Coating Perf		Overført	159 Z	01	01.01.2013		Light damage		Inspection con Severe Damage	OK		Surface Damage	Visuell inspeksjon, ikke
Coating Score		Overført 21.06.21	161 Z	01	01.01.2016		Light damage		Inspection con Not Inspected	OK		Damaged	KU nr 71: Ansløst turt
Coating Type		Overført 21.06.21	172 Z	01	01.01.2013		Light damage		Inspection con Light Damage	OK		Not inspected	Visuell inspeksjon, ikke
RBI Material		Overført	174 Z	03	01.01.2015		Light damage		Inspection con Not Inspected	Not Inspected		Not inspected	Visuell inspeksjon, ikke
Material		Overført 21.06.21	175 Z	01	01.01.2013		Light damage		Inspection con Severe Damage	OK		Damaged	Pkt 01-204
Material Perf		Overført 21.06.21	176 Z	01	01.01.2013		Light damage		Inspection con Severe Damage	Moist		Damaged	Visuell inspeksjon, ikke
Material scope		Overført 20.06	177 Z	01	01.01.2013		Light damage		Inspection con Light Damage	OK		Not inspected	Visuell inspeksjon, ikke
RBI Water		Overført 21.06.21	179 Z	01	01.01.2018		Light damage		Inspection con OK	OK		Surface Damage	Visuell inspeksjon, ikke
Unassigned Objects		Overført 21.06.21	181 Z	02	01.01.2013		Light damage		Inspection con Light Damage	OK		Not inspected	Visuell inspeksjon, ikke
DMI		Overført 21.06.21	182 Z	03	01.01.2013		Light damage		Inspection con Severe Damage	OK		Not inspected	Visuell inspeksjon, ikke
Last inspection		Overført 21.06.21	184 Z	05	01.01.2013		Light damage		Inspection con Light Damage	OK		Damaged	Visuell inspeksjon, ikke
Point Errors		Overført	185 Z	06	01.01.2013		Light damage		Inspection con OK	OK		Damaged	Visuell inspeksjon, ikke
Point Type		Overført 21.06.21	193 Z	01	01.01.2013		Light damage		Inspection con Severe Damage	OK		Not inspected	Visuell inspeksjon, ikke
Inspection overview		Overført 21.06.21	2329 Z	02	01.01.2020		Observation		Inspection con Light Damage	OK		Damaged	04-467 (RT)
RBI Overview		Overført 21.06.21	206 Z	02	01.01.2013		Light damage		Inspection con Severe Damage	OK		Not inspected	Visuell inspeksjon, ikke

Vedlegg 5.1: Dagens vedlikeholdsstrategi

Parameters	Value	Comment	P (t)	A-Matrix	From	OK	LD	LD-Bevist	LD-Rep	O	O-Bevist	O-Rep	Finding	F-Bevist	Lekkasje
ndim	10	Dim. of problem+1													
MaxTime	100	For time dep. solut.	0.324036658	0.244337365	From	OK	LD	LD-Bevist	LD-Rep	O	O-Bevist	O-Rep	Finding	F-Bevist	Lekkasje
StateFollow	1	State to plot	0.089007571	0.110953495	-										
lambda_1	0.011261261	Failure rate	0.007203739	0.006161504											
lambda_2	0.023809524	Failure rate	0.049969977	0.057182658											
lambda_3	0.012077295	Failure rate	0.055980012	0.209309965											
lambda_4	0.017006603	Failure rate	0.043830001	0.018518217											
lambda_5	0.01344086	Failure rate	0.028872085	0.114812955											
q1	0.007916667	Inspection rate	0.010684499	0.101426400											
q2	0.007916667	Inspection rate	0.003664832	0.017496988											
q3	0.007916667	Inspection rate	0.416757077	0.121350985											
mu1	0.166666667	Repair rate													
mu2	0.083333333	Repair rate													
mu3	0.041666667	Repair rate													
mu4	0.016666667	Repair rate													
Tau1	10														
Tau2	10														
Tau3	10														
P_insp_2	0.95														
P_insp_3	0.95														
Costs (I)			Cost pr. besøk i tilstand			Cost til pr. mnd			Costs for tilstand			Costs for tilstand			
LD	15.57		LD	288.91		LD	2.500	LD	0.00273155	LD	302.8599412	LD	108.4245014	LD	94.87142157
O	61.73		O	911.31		O	4.000	O	0.00076858	O	94.87142157	O	47.16531899	O	31.5447767
Finding	72.90		Finding	1.783.85		Finding	20.000	Finding	0.00264175	Finding	54.00087951	Finding	47.16531899	Finding	32.96546339
Lekkasje	7.382.15		Lekkasje	2.984.08		Lekkasje	100.000	Lekkasje	0.00154318	Lekkasje	114.3055867	Lekkasje	81.17399358	Lekkasje	41.20299686
Sum	7.532.15		Sum	2.984.08		Sum	1.500.000	Sum	0.00072904	Sum	81.17399358	Sum	41.20299686	Sum	120.000
Inspection cost			Inspection cost			Inspection cost			Inspection cost			Inspection cost			
hr	3.000.00		kr	13.516.23		kr	2.000.000	kr	0.00202251	kr	41.20299686	kr	120.000	kr	120.000
Total (Ct)			Total (Ct)			Total (Ct)			Total (Ct)			Total (Ct)			
hr	13.516.23		kr	41.202.9686		kr	120.000	kr	120.000	kr	120.000	kr	120.000	kr	120.000
Pits			Pits			Pits			Pits			Pits			
inspeksjon	0.00%		inspeksjon	0.00%		inspeksjon	0.00%	inspeksjon	0.00%	inspeksjon	0.00%	inspeksjon	0.00%	inspeksjon	0.00%
Lekkasje			Lekkasje			Lekkasje			Lekkasje			Lekkasje			
lekkasje	0.00%		lekkasje	0.00%		lekkasje	0.00%	lekkasje	0.00%	lekkasje	0.00%	lekkasje	0.00%	lekkasje	0.00%

Vedlegg 5.2: Optimalt inspeksjonsintervall

Parameters	Value	Comment	P (t)	A-Matrix	P	From	OK	LD	LD-Bewist	LD-Rep	O	O-Bewist	O-Rep	Findng	F-Bewist	Lekkasje
nDim	10	Dim. of problem+r+1	0.324036658	0.243231863	-	OK										
MaxTime	100	For time dep. solut.	0.089007571	0.110451400		LD										
StateFollow	1	State to plot	0.007203729	0.0004590636		LD-Bewist										
lambda_1	0.011261261	Failure rate	0.049696977	0.056923896		LD-Rep										
lambda_2	0.023809524	Failure rate	0.055980120	0.204446748		O										
lambda_3	0.012077295	Failure rate	0.013830001	0.0223250466		O-Bewist										
lambda_4	0.017008803	Failure rate	0.022871085	0.138572687		O-Rep										
lambda_5	0.01344008	Failure rate	0.010684499	0.087192793		Findng										
q1	0.0077916667	Inspection r _{avg} Time dep.	0.003664832	0.021408582		F-Bewist										
q2	0.009895833	Inspection r _{avg} Time dep.	0.416757077	0.110824287		Lekkasje										
q3	0.011309524	Inspection rate														
mu1	0.166666667	Repair rate														
mu2	0.083333333	Repair rate														
mu3	0.041666667	Repair rate														
mu4	0.016666667	Repair rate														
Tau1	10															
Tau2	8															
Tau3	7															
P_insp_2	0.95															
P_insp_3	0.95															
Costs II																
LD		kost pr. besøk til strand				Cost til pr. mnd										
LD			15.30			287.61										
O			74.50			907.19										
Findng			89.20			1.629.12										
Lekkasje			6.741.82													
Sum			6.920.82			2.823.91										
Inspection cost	kr		3.678.57													
Total CTI	kr		13.423.30													
Pris			-0.69%													
Inspeksjon			22.62%													
Lekkasje			9.50%													
Costs																
C_LD		LD	2.500			Light damage										
C_LD-Rep		LD-Rep	0			Light damage repair										
C_O		O	4.000			Light Damage Bewist										
C_O-Rep		O-Rep	0													
C_Finding		Findng	15.000			Observation										
C_Rep LD		C_Rep LD	20.000			Observation repair										
C_Rep O		C_Rep O	40.000			Observation Bewist										
C_Rep Findng		C_Rep Findng	100.000			Findng										
C_Rep Lekkasje		C_Rep Lekkasje	150.000			Findng repair (OK)										
C_PRO		C_PRO	1.500.000			Findng Bewist										
C_ULY		C_ULY	2.000.000			Lekkasje										
C_Insp		C_Insp	120.000													
Fevers for tilstand																
LD		LD	0.0027391			Fevers I år										
LD-Rep		LD-Rep	0.00076511			Light damage										
O		O	0.00087441			Light Damage Bewist										
O-Rep		O-Rep	0													
Findng		Findng	0.0026298			Observation										
LD		LD	0.00186254			Observation repair										
LD-Rep		LD-Rep	0.00213247			Observation Bewist										
O		O	0.00246916			Findng										
O-Bewist		O-Bewist	0.00083202			Findng repair (OK)										
O-Rep		O-Rep	0.002125612			Findng Bewist										
Findng		Findng	0.00184707			Lekkasje										
Lekkasje		Lekkasje	45.1164337													

Vedlegg 5.4: Kun bruk av NDT-inspeksjon

Parameters	Value	Comment	P (t)	A-Matrix	P	From	OK	LD	LD-Bewist	LD-Rep	O	C-Bewist	O-Rep	Finding	F-Bewist	Lekkasje
nDim	10	Dim. of problem-r+1	0.324036658	0.254143268												
MaxTime	100	For time dep. solut.	0.089007571	0.116560372												
StateFollow	1	State to plot	0.007202729	0.003642512												
lambda_1	0.011261261	Failure rate	0.099969977	0.045167256												
lambda_2	0.023809524	Failure rate	0.005980120	0.217100561												
lambda_3	0.012077295	Failure rate	0.0238871085	0.131319746												
lambda_4	0.017006803	Failure rate	0.028871085	0.123199746												
lambda_5	0.01344086	Failure rate	0.0016664832	0.088865794												
q1	0.005952381	Inspection rate	0.003664499	0.024179220												
q2	0.008333333	Inspection rate	0.003664499	0.024179220												
q3	0.013888889	Inspection rate	0.416757077	0.111270405												
mu1	0.16666667	Repair rate														
mu2	0.08333333	Repair rate														
mu3	0.04166667	Repair rate														
mu4	0.01666667	Repair rate														
Tau1	7															
Tau2	5															
Tau3	3															
P Insp_2	0.5															
P Insp_3	0.5															
Costs I																
LD		kost pr besøk tilstand														
LD																
O																
Finding																
Sum																
Costs II																
LD		kost til pr mind														
LD																
O																
Finding																
Sum																
Inspection cost																
Total: (I)		Kr														
Pris																
Inspeksjon																
Lekkasje																

Vedlegg 5.6: Bruk raskere og dyrere reparasjoner

Parameters	Value	Comment	P (t)	A-Matrix	P	From	OK	LD	LD-Bewist	LD-Rep	O	O-Bewist	O-Rep	Finding	F-Bewist	Lekkasje
ndim	10	Dim. of problem+r+1														
MaxTime	100	For time dep. solut.	0.324036658	0.25991634												
StateFollow	1	State to plot	0.069007571	0.117526002												
lambda_1	0.011261261	Failure rate	0.007203729	0.00260516												
lambda_2	0.023809524	Failure rate	0.04966977	0.066607956												
lambda_3	0.012077295	Failure rate	0.05598012	0.222420649												
lambda_4	0.017008803	Failure rate	0.013830081	0.014431943												
lambda_5	0.01344008	Failure rate	0.028871085	0.178800555												
q1	0.0077916667	Inspection rate	0.0010684499	0.016912951												
q2	0.011309524	Inspection rate	0.003664832	0.014642351												
q3	0.015833333	Inspection rate	0.416757077	0.049202096												
mu1	0.333333333	Repair rate														
mu2	0.166666667	Repair rate														
mu3	0.083333333	Repair rate														
mu4	0.033333333	Repair rate														
Tau1	10															
Tau2	7															
Tau3	5															
P_insp_2	0.95															
P_insp_3	0.95															
Costs II			kost pr besøk tilstand			Cost til pr mnd										
LD																
LD																
O																
Findng																
Lekkasje																
Sum																
Inspection cost	kr															
Total CTI	kr															
Pris																
Inspeksjon																
Lekkasje																

Vedlegg 5.9: Implementering av sensor og digital tvilling

Parameters	Value	Comment	P (t)	A-Matrix=>	To-->	LD	LD-Bewist	LD-Rep	O	O-Bewist	O-Rep	Finding	F-Bewist	Lekkasje
ndim	10	Dim. of problem+r+1	0.324036658	0.07661663	OK									
MaxTime	100	For time dep. solut.	0.089007571	0.005798018	OK									
StateFollow	1	State to plot	0.007203739	0.030439591	LD-Bewist	0.01126	1.000	0.1666667	0.02381	0.0238095				
lambda_1	0.011261261	Failure rate	0.049963977	0.377450854	LD-Rep						0.01344			
lambda_2	0.023809524	Failure rate	0.05598012	0.005560806	O							0.012077295		
lambda_3	0.012077295	Failure rate	0.013830001	0.065879017	O-Bewist						1	0.08333		
lambda_4	0.017006803	Failure rate	0.0278871085	0.008440918	O-Rep								0.01207729	
lambda_5	0.01344086	Failure rate	0.010684499	6.60164E-05	Finding									1
q1	1	Inspection r=... Steady state	0.002654832	0.014683968	F-Bewist									0.01701
q2	1	Inspection r=... Time dep.	0.416197077	0.01505092	Lekkasje									
q3	1	Inspection r=...												
Costs ()														
mu1	0.16666667	Repair rate			Cost ell pr mnd									
mu2	0.08333333	Repair rate	LD	101.47										
mu3	0.04166667	Repair rate			90.59									
mu4	0.01666667	Repair rate	O	219.60										
Tau1	0.08333333		Finding	61.19										
Tau2	0.08333333				285.76									
Tau3	0.08333333		Lekkasje	915.73										
P_insp	1		Sum	1.297.98										
P_insp_2	1		Inspection cost kr		597.63									
P_insp_3	1		Total C(t)	1.895.62										
			Pts	-86.05%										
			Inspeksjon	-100.00%										
			Lekkasje	-706.15%										

Referanser

- [Amer et al., 2018] Amer, A., Alshehri, A., Cunningham, V., and Al-Taie, I. (2018). *Inspection Challenges for Detecting Corrosion Under Insulation (CUI) in the Oil and Gas Industry* . https://www.researchgate.net/publication/334478906_Inspection_Challenges_for_Detecting_Corrosion_Under_Insulation_CUI_in_the_Oil_and_Gas_Industry/link/5df217314585159aa476850a/download Sett: 14/12/2021.
- [API, 2016] API (2016). *Risk-Based Inspection Methodology* .
- [API, 2020] API (2020). *Corrosion and materials* .
- [Arunraj and Maiti, 2007] Arunraj, N. and Maiti, J. (2007). Risk-based maintenance—techniques and applications. *Journal of hazardous materials*, 142(3):653–661.
- [Barringer, 1997] Barringer, P. (1997). Pipe wall thickness decisions using weibull analysis. *Equipment Inspection For Mechanical Integrity*.
- [Bhalla, 2019] Bhalla, K. (2019). *Digital twin technology lowers offshore inspection costs* . <https://www.proquest.com/docview/2296641872?OpenUrlRefId=info:xri/sid:primo&accountid=12870>, Sett: 11/05/2021.
- [Coand et al., 2020] Coand, P., Avram, M., and Constantin, V. (2020). A state of the art predictive maintenance techniques. *Mechanical Engineering*.
- [Cronvall and Männistö, 2009] Cronvall, O. and Männistö, I. (2009). Combining discrete-time markov processes and probabilistic fracture mechanics in ri-isi risk estimates. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*.
- [Dekker, 1996] Dekker, R. (1996). Applications of maintenance optimization models: A review and analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 51(3):229–240.
- [DNV, 2019a] DNV (2019a). *Digitalisering i vedlikeholdsstyringen og bruken i analysearbeidet* . <https://www.ptil.no/globalassets/fagstoff/prosjektrapporter/ikt-sikkerhet/vedlikehold-og-digitalisering.pdf> Sett: 12/12/2021.
- [DNV, 2019b] DNV (2019b). *Risk based management of corrosion under insulation* . <https://oilgas.standards.dnvgl.com/download/dnvgl-rp-g109-risk-based-management-of-corrosion-under-insulation> Sett: 11/04/2021.
- [DNV, 2020a] DNV (2020a). *Recording: Taking control of CUI*. <https://www.dnv.com/oilgas/webinars/taking-control-of-cui-confirmation-page-noindex.html>, Sett: 15/03/2021.
- [DNV, ud] DNV (ud). *Risk Based Inspection Planning and Management* . <https://www.dnvgl.no/services/risk-based-inspection-planning-management-75272> Sett: 11/05/2021.
- [DNV, 2020b] DNV, AkerBP, T. (2020b). *DNVGL-RP-A204: Qualification and assurance of digital twins. Preview* . <https://www.dnv.com/oilgas/digital-twins/preview-DNVGL-RP-A204-qualification-and-assurance-of-digital-twins.html> Sett: 11/05/2021.
- [DNVGL-RP-G109, 2020] DNVGL-RP-G109 (2020). *Managing the significant threat of corrosion under insulation*. <https://www.dnv.com/oilgas/download/managing-the-significant-threat-of-corrosion-under-insulation.html> Lest: 09/05/2021.
- [Dong et al., 2021] Dong, Q., He, B., Qi, Q., and Xu, G. (2021). Real-time prediction method of fatigue life of bridge crane structure based on digital twin. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*.

- [Eddysonics, ud] Eddysonics (ud). *Corrosion Under Insulation* . <http://www.eddysonics.com/inspection/corrosion-under-insulation> Sett: 06/09/2021.
- [Ervik, 2020] Ervik, A. (2020). *PredictCUI*. <https://www.sintef.no/en/projects/2020/predictcui/>, Lest: 10/04/2021.
- [Fleming, 2004] Fleming, K. N. (2004). Markov models for evaluating risk-informed in-service inspection strategies for nuclear power plant piping systems. *Reliability Engineering & System Safety*.
- [Fleming and Lydell, 2004] Fleming, K. N. and Lydell, B. O. (2004). Database development and uncertainty treatment for estimating pipe failure rates and rupture frequencies. *Reliability Engineering & System Safety*.
- [Giribone and Valette, 2014] Giribone, R. and Valette, B. (2014). Principles of failure probability assessment (pof). *International Journal of Pressure Vessels and Piping*.
- [Hosmer Jr et al., 2013] Hosmer Jr, D. W., Lemeshow, S., and Sturdivant, R. X. (2013). *Applied logistic regression*. John Wiley & Sons.
- [Indusenz, ud] Indusenz (ud). *CUI Prediction* . <https://www.indusenz.com/cuiprediction/>, Sett: 21/12/2021.
- [Isopartner, 2020] Isopartner (2020). *Optimalisering av industrianlegg ved å redusere korrosjon under isolasjon* . <https://www.isopartner.no/nb/aktuelt/optimalisering-av-industrianlegg-ved-reducere-korrosjon-under-isolasjon> Sett: 11/04/2021.
- [Kaefer, ud] Kaefer (ud). *Corrosion under Insulation* . <https://www.kaefer.com/Surface-Protection/Corrosion-under-Insulation.html> Sett: 06/09/2021.
- [Khan and Haddara, 2003] Khan, F. I. and Haddara, M. M. (2003). Risk-based maintenance (rbm): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning. *Journal of loss prevention in the process industries*.
- [Lettich, 2005] Lettich, M. (2005). *Is There a Cure for Corrosion Under Insulation?* <https://insulation.org/io/articles/is-there-a-cure-for-corrosion-under-insulation/>, Lest: 09/04/2021.
- [Liu et al., 2020] Liu, M., Fang, S., Dong, H., and Xu, C. (2020). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*.
- [Meeker and Escobar, 2014] Meeker, W. Q. and Escobar, L. A. (2014). *Statistical methods for reliability data*. John Wiley & Sons.
- [Mokhtar et al., 2015] Mokhtar, A. A., Saari, N., and Ismail, M. C. (2015). Assessment of insulated piping system inspection using logistic regression. http://utpedia.utp.edu.my/1303/1/FYP_report_nooratikah_saari_8679.pdf Sett: 11/05/2021.
- [Morcoux et al., 2002] Morcoux, G., Rivard, H., and Hanna, A. (2002). Modeling bridge deterioration using case-based reasoning. *Journal of Infrastructure Systems*.
- [Oceaneering, 2017] Oceaneering (2017). *Isoleringsløsninger og sikkerhetsmessige utfordringer i et historisk perspektiv*. Petroleumstilsynet. http://www.overflateportalen.no/wp-content/uploads/Rapport-2017_957-Korrosjon-under-isolasjon.pdf Lest: 10/04/2021.
- [Park, 2016] Park, C. e. (2016). A predictive maintenance approach based on real-time internal parameter monitoring. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 85.1-4.
- [Rausand and Høyland, 2004] Rausand, M. and Høyland, A. (2004). *System Reliability Theory - Models, Statistical Methods, and Applications*. Wiley.

- [Selcuk, 2016] Selcuk, S. (2016). Predictive maintenance. *Journal of Engineering Manufacture*, 231(9), 1670-1679.
- [Selvik and Ford, 2017] Selvik, J. T. and Ford, E. (2017). *Down Time Terms and Information Used for Assessment of Equipment Reliability and Maintenance Performance*, chapter 12. Researchgate.
- [Simola et al., 2004] Simola, K., Pulkkinen, U., Talja, H., Karjalainen-Roikonen, P., and Saarenheimo, A. (2004). Comparison of approaches for estimating pipe rupture frequencies for risk-informed in-service inspections. *Reliability Engineering & System Safety*.
- [SNL, 2019] SNL (2019). *Risiko*. <https://snl.no/risiko> Sett: 10/05/2021.
- [Standard, 2018] Standard, N. (2018). *Vedlikeholdsterminologi*. <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1022000>, Sett: 15/03/2021.
- [Stephens, 2000] Stephens, H. M. (2000). *NDE reliability-human factors-basic considerations* . <https://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn736/idn736.htm>, Sett: 14/12/2021.
- [Trauer et al., 2020] Trauer, J., Schweigert-Recksiek, S., Engel, C., Spreitzer, K., and Zimmermann, M. (2020). What is a digital twin?—definitions and insights from an industrial case study in technical product development. In *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, volume 1, pages 757–766. Cambridge University Press.
- [Tutt, 2012] Tutt, e. (2012). *Risk-informed preventive maintenance optimization* . <https://ieeexplore.ieee.org/document/6175441/authors#authors> Sett: 14/05/2021.
- [Vachtsevanos et al., 2020] Vachtsevanos, G., Nataranjan, K., Rajamani, R., and Sandborn, P. (2020). *Corrosion Processes- Sensing, monitoring, Data analytics, Prevention/Protection, Diagnosis/Prognosis, and Maintenance Strategies*. Springer.
- [Vatn, 2020a] Vatn, J. Laskowska, E. (2020a). *Degradation modelling using a Phase Type Distribution (PHD)* . <https://www.rpsonline.com.sg/proceedings/esrel2020/pdf/4492.pdf>, Sett: 10.02.2022.
- [Vatn, 2018a] Vatn, J. (2018a). Industry 4.0 and real-time synchronization of operation and maintenance). In *Safety and Reliability - Safe Societies in a Changing World. Taylor and Francis 2018 ISBN 978-1-351-17466-4. pp 681-686*.
- [Vatn, 2018b] Vatn, J. (2018b). *Vedlikeholdsoptimalisering* . <https://folk.ntnu.no/jvatn/eLearning/PK6021/>, Sett: 11/04/2021.
- [Vatn, 2020b] Vatn, P. (2020b). *Internal Barrier Degradation model to account for operational loads* . <https://www.rpsonline.com.sg/proceedings/esrel2020/pdf/4535.pdf>, Sett: 14/01/2022.
- [Wegener, 2020] Wegener, P. (2020). German standardization roadmap industrie 4.0. *GERMAN STANDARDIZATION ROADMAP Industrie 4.0 Version 4. DIN e, 2020*.
- [Wiggen, 2019] Wiggen, F. (2019). Managing the significant threat of corrosion under insulation. https://www.spe-aberdeen.org/wp-content/uploads/2020/11/Thurs_DNVGL-RP-G109-presentation-rev-1.pdf, Sett: 11/05/2021.
- [Wirahadikusumah et al., 2001] Wirahadikusumah, R., Abraham, D., and Iseley, T. (2001). Challenging issues in modeling deterioration of combined sewers. *Journal of infrastructure systems*.
- [Yahaya et al., 2009] Yahaya, N., Noor, N. M., Din, M. M., and Nor, S. H. M. (2009). Prediction of co2 corrosion growth in submarine pipelines. *Malaysian Journal of Civil Engineering*.

