



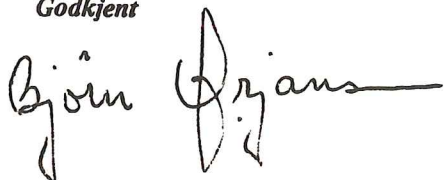
Rapport Nr. 80 675 - 1
Hovedoppgave i Matematisk Statistikk

DYNAMISK RISIKOANALYSE

Kvantitativ analyse av operasjonelle
beslutninger ved offshore leteboring etter
olje og gass med spesiell vekt på været som
risikofaktor.

av Dag Jansson



Oppdrag nr. 80 675	Rapport nr. 80 675 - 1	Rapporttype Sluttrapport
Oppdragets tittel Diplom Jansson	Rapportens tittel DYNAMISK RISIKOANALYSE Kvantitativ analyse av operasjonelle beslutninger ved offshore leteboring etter olje og gass med spesiell vekt på været som risikofaktor.	
Prosjektleder / Prosjektansvarlig G.Fredrikson/B.Ørjansen	Forfatter(e) Dag Jansson	
Faggruppe eller felt Operasjonsanalyse	Referat Dårlig vær ved offshore leteboring etter olje er både årsak til forsinkelser og en betydelig risikokilde. Det finnes ikke faste beslutningskriterier for vær-situasjoner ved hvilke en gitt aktivitet ikke lenger burde fortsette. De beste beslutningsreglene er de som minimerer forventet tap for aktiviteten. Hvis aktiviteten modelleres som en stokastisk beslutningsprosess, kan optimale beslutningsregler beregnes ved hjelp av Lineær Programmering.	
Oppdragsgiver SI	4 emneord Operasjonelle beslutninger Værbetinget risiko Markov beslutningskjede Lineær Programmering	
Oppdragsgivers ref.	Antall blad inkl. bilag 122	Dato 26. januar 1981
Pris: Kr 140.-	SI's ref.	Godkjent  (Sign.)
Tilgjengelighet: Denne rapport / Denne side Åpen/åpen		



ALMENA VDELINGEN
UNIVERSITETET I TRONDHEIM - NORGES TEKNISKE HØGSKOLE
7034 TRONDHEIM - NTH

HOVEDOPPGAVE

for

Stud.techn. Dag Jansson
Avd. VIIA, NTH.

Innleveringsfrist: 9. februar 1981.

MATEMATISK STATISTIKK: "Dynamisk risikoanalyse."

Kvantitativ analyse av operasjonelle beslutninger ved offshore-
leteboring etter olje og gass med spesiell vekt på været som
risikofaktor.

Oppgaven utføres ved Sentralinstitutt for Industriell Forskning,
og under veiledning av forsker Gunnar Fredrikson.

Trondheim, 1. oktober 1980.

T. Sikkeland

Torbjørn Sikkeland
Avdelingsformann

Bo Lindqvist

Bo Lindqvist
1.amanuensis ved Institutt
for Matematisk statistikk

FORORD

Oppgaven, som har resultert i denne rapporten, ble utformet etter en idé av forskerne R.H. Westergaard og G. Fredrikson ved Sentralinstitutt for Industriell Forskning. G. Fredrikson, som villig tok på seg ansvaret som veileder under arbeidet, har sammen med amanuensis Bo Lindqvist gitt verdifulle impulser underveis. R.H. Westergaard, Saga Petroleum A/S og Meteorologisk Institutt har vært svært hjelpsomme med å svare på spørsmål og gi nyttig informasjon.

Oslo, januar 1981

Per Janssen

INNHold

	Side
FORORD	iv
INNHold	v
SAMMENDRAG	1
1. INNLEDNING	2
1.1. Risiko og risikovurdering	3
1.2. Generelt om problemstillingen - hvorfor er den interessant? .	5
1.3. Hvordan oppgaven tenkes løst - bruk av modelleksempel	8
1.4. Leteboringen i et totalt risikobilde	11
1.5. Hvordan rapporten er bygd opp	13
2. BORERIGGENS OMGIVELSER - GEOLOGI OG VÆRFORHOLD	14
2.1. Valg av geografisk område: Haltenbanken	15
2.2. Værforhold - beslutningsgrunnlag og risikokilde	15
2.2.1. Vind	15
2.2.2. Bølger	17
2.2.3. Andre værfaktorer	19
2.3. Geologi - inntektskilde og risikokilde	20
3. TEKNISK SYSTEMBESKRIVELSE	22
3.1. Plattformen	24
3.2. Forankringssystemet	24
3.3. Boresystemet	25
3.3.1. Brønn	25
3.3.2. Borestreng	27
3.3.3. Boreslamsystem	27
3.3.4. Brønnkontrollsystem	30
4. PROSESSER OG BESLUTNINGER - KONTROLL OG TILFELDIGHETER	31
4.1. Hva er en stokastisk beslutningsprosess?	32
4.2. SemiMarkov beslutningsprosesser i diskret tid	33
4.3. Markov beslutningsprosesser	38
4.4. Værprosessen som Markovkjede	40
4.5. Modelleksempellet: To koblete stokastiske prosesser	43
4.5.1. Operasjonsprosessen: Markov- eller SemiMarkovbeskrivelse? ...	43
4.5.2. Tolkning av overgangssannsynligheter	46
4.6. Modelleksempellet: Løsningsmetoder	50
4.6.1. Endelig tidshorisont: Dynamisk Programmering	52
4.6.2. Uendelig tidshorisont: Lineær Programmering	53

5. TILSTANDSDEFINISJONER OG INNHENTING/BEARBEIDING AV MODELLDATA	56
5.1. Hovedprinsipp for analyse av sammensatte aktiviteter: Faseinndeling	57
5.2. Definisjon av tilstander i borefasen	58
5.3. Om overgangssannsynlighetenes avhengighet av været	61
5.4. Skalering av sannsynligheter	64
5.5. Forsinkelseskostnader	66
5.6. Modellering av ukontrollert utblåsning	67
5.6.1. Sannsynligheter	68
5.6.2. Kostnader	72
5.7. Modellering av ulykker som leder til platformskader	74
5.7.1. Sannsynligheter	74
5.7.2. Kostnader	76
5.8. Andre sannsynligheter og kostnader	77
5.9. Nyttevurdering av risiko	80
6. LØSNING AV OPTIMALISERINGSPROBLEM - RESULTATER	83
6.1. Standardisering av LP-formulering	84
6.2. Innmating av LP-problem for datamaskinløsning	84
6.3. Oppsummering før løsning	86
6.4. Løsning og følsomhetsanalyse	87
7. KONKLUSJONER	91
7.1. Problemformulering og teorianvendelse	92
7.1.1. Er problemstillingen fruktbar?	92
7.1.2. Hvorfor Markovbeskrivelsen var hensiktsmessig	93
7.1.3. Om informasjonsgrunnet og tilstandsdefinisjoner	95
7.1.4. Behovet for kvantitative nyttevurderinger	97
7.2. Løsningsmetode og resultat anvendelse	98
7.2.1. Om strategiske beslutninger	98
7.2.2. Om hjelpesystem for beslutninger	98
7.2.3. Løsningsmetoder	100
8. REFERANSER	101
9. VEDLEGG	105
Vedlegg 1. Overgangssannsynligheter for værprosessen	106
Vedlegg 2. Overgangssannsynligheter for operasjonsprosessen	108
Vedlegg 3. Overgangskostnader	109
Vedlegg 4. Forventede, beslutningsbetingede kostnader	110
Vedlegg 5. Styreprogram for FMPS-løsning	111
Vedlegg 6. Utdrag av FMPS-databildeserie	112
Vedlegg 7. Program til standardisering av LP-problem og oppsetting av FMPS-databilder	113

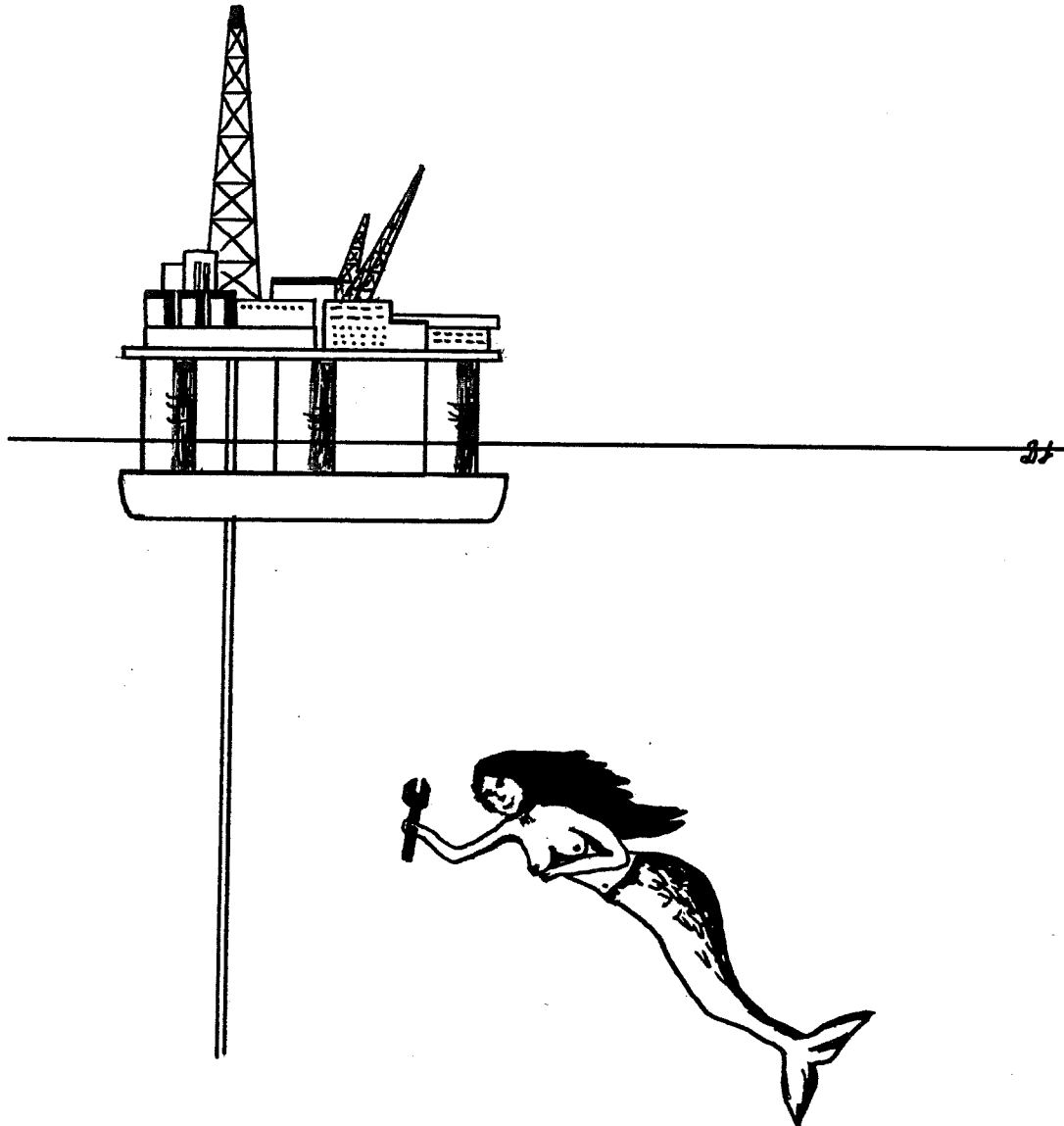
SAMMENDRAG.

Været er en betydelig risikokilde ved offshore leteboring etter olje og gass. De fleste ulykker som har inntruffet på mobile borerigger har hatt dårlig vær som en hovedårsak. Ulykkesrisikoen kan reduseres ved å sette i verk passende defensive tiltak, stanse operasjoner etc. Slike tiltak medfører store forsinkelseskostnader. Det finnes idag ingen faste regler for under hvilke forhold de ulike aktiviteter skal stanses. Værbetingede, operasjonelle beslutninger baseres, bevisst eller ubevisst, på en bestemt avveining mellom forsinkelseskostnader og mulige ulykkeskostnader. Operatørselskapene står overfor en beslutningssituasjon der det er et mål å finne den beste avveiningen mellom de to tapstypene. Denne avveiningen bygger idag på erfaringsmessige vurderinger og denne oppgavens formål var å forsøke kvantitative metoder til å finne gode beslutninger.

Et eksempel på denne beslutningssituasjonen er modellert som en Markov-beslutningskjede og været (basert på vindstyrke) er modellert som en 3 tilstands 2. ordens Markovkjede. Det beste settet med beslutningsregler, kalt optimal plan, er beregnet ut fra denne modellen ved hjelp av Lineær Programmering. Hensikten med eksempelet var å undersøke om en formell beslutningsanalyse kunne være en brukbar måte å finne gode beslutninger på. Til tross for at modellen var liten og enkel og data-grunnet mangelfullt, viste følsomhetsanalyse at Markovbeskrivelsen ga et tilfredsstillende bilde av virkeligheten. Anvendbarheten av beslutningsanalyser av denne typen er avhengig av godheten til modellen og dataene.

En god analyse vanskeliggjøres, ikke bare pga. av usikre data, men også fordi det ikke er klart hvordan de ulike formene for risiko skal vurderes. De to tapstypene vi står overfor har svært forskjellig karakter; store, sikre kostnader på den ene siden og katastrofalt store tap, med små sannsynligheter, på den andre. For å kunne bruke formell beslutningsanalyse operasjonelt er det nødvendig å kjenne kvantitative sammenhenger vedrørende beslutningstagerens risikopreferanser. Videre vil det kreve svært gode systemmodeller, mer pålitelige data og at beregningsverktøyet er tilpasset mennesket på den best mulige måten.

1. INNLEDNING.



- Alle har minst én glimrende idé
som det er umulig å gjennomføre.

(Howes lov)

1. INNLEDNING.

1.1. Risiko og risikovurdering.

Risiko og risikoanalyser er begreper som i det siste tiåret har fått mer oppmerksomhet både faglig og politisk. Som fagfelt å betrakte er risikoanalyse svært utflytende og mangler de klare begreper og definisjoner som mer etablerte fagfelt har. Det kommer av at det ligger i grenselandet mellom økonomi-, miljø- og ingeniørvitenskapene. En kan betrakte risikoanalyse som et samleord for alle studier som tar for seg sammenhenger mellom sannsynligheter for hendelser og konsekvenser av hendelser. Behovet for slike analyser springer ut av to forhold:

- Konsekvensene av nye, store og kompliserte systemers svikt er store og berører mange interessegrupper. Det gjelder f.eks. kjemisk industri, offshore oljeboring og kraftproduksjon.
- Sannsynligheten for mange av disse konsekvensene er ekstremt liten, så liten at det ofte er vanskelig å begripe betydningen av dem.

Det vokser derfor fram et behov for formelle metoder til å studere risikoforholdene ved slike virksomheter. Felles for de fleste analysene er at de 1) forsøker å kartlegge sannsynlighet/konsekvens-sammenhenger og 2) søker etter tiltak for å redusere både uønskede hendelsers sannsynligheter og konsekvenser. Denne siden av risikoanalysen inneholder få kontroversielle emner. Derimot er vurdering av risiko både kontroversielt og faglig problematisk. Et eksempel, med svært forenklede hendelser, viser hvilket dilemma en slik vurdering er:

Hvilken av disse to risikosituasjonene er minst ønskelig?

- 10 000 personer har i de neste 10 år en sannsynlighet på 1/1000 for samtidig å omkomme som følge av en industriell ulykke på sitt hjemsted, f.eks. sabotasje av et kjernekraftverk. Forventet antall omkomne er 10.
- På det samme stedet vil det i samme periode forekomme X antall bilulykker med 1 dødsoffer pr. ulykke fra den samme persongruppen. Forventningen til X er 10. Forventet antall omkomne er også 10.

De to situasjonene har samme forventede tap og sies ofte å medføre samme risiko for en person i gruppen. Det viser seg likevel at personlige holdninger er svært forskjellige overfor to slike situasjoner. Det er bl.a. en klar sammenheng mellom opplevd risiko, dvs. vurderingen av den reelle risiko, og personens muligheter til selv å kontrollere risikoen. Opplevd eller subjektiv risiko har også en tendens til å legge mer vekt på konsekvensenes størrelse enn sannsynlighetene. /1/s.23.

Det finnes ikke noen enerådende definisjon av risiko. Jeg vil bruke ordet risiko kvalitativt og upresist, slik det brukes i dagligtale. Presise risikodefinitjoner bygger likevel bare på etablerte matematiske definisjoner, som det ofte er greiere å bruke. Vurderinger av ønskelighet hører inn under fagområdet nytteteori, og nyttevurdering av risiko (risikopreferanser), dvs. å bedømme sikkerheten eller å bedømme hvor akseptabel risikoen er, er en normativ, politisk aktivitet. /1/s.23. Hendelser av den første typen i eksempelet på forrige side kalles ofte "lav sannsynlighet - stor konsekvens" (LSSK)-hendelser og er vanskelige å sammenlikne med rutinehendelser. Nytteteorien er velutviklet og har mange anvendelser, men er lite brukt på LSSK-hendelser. Det meste av nyttevurdering av risiko er gjort i forbindelse med økonomisk risiko. Hvis mulighet for LSSK-hendelser inngår i en beslutningsanalyse er det spesielt viktig å presisere hvordan hendelsene nyttevurderes. Denne oppgaven dreier seg om samspillet mellom beslutninger og risiko. Risikovurderingen har betydning for hvilke beslutninger som velges, men har ingen betydning for selve beslutningsanalysen.

I tillegg til problemer med selve vurderingen er det ikke alltid klart hvem som vurderer. I det følgende drøftes hvordan det spørsmålet virker inn på hva som menes med "optimal sikkerhet". Ved mange virksomheter er det skarp konflikt mellom økonomi og sikkerhet. Det gjelder når en vesentlig del av tapene er i form av menneskers liv og helse. Det gjelder også når virksomheten kan medføre store belastninger på miljøet. Behovet for grundige risikostudier øker med virksomhetens kapitalintensitet og risikonivå. Interessekonflikter blir da skarpere og preges sterkere av moralske og politiske holdninger. At det ofte er konflikt er et resultat av at virksomhetens interesser legger forskjellig vekt på de ulike konsekvenstypene. Hva som da er optimal sikkerhet er ikke entydig. Ett av disse tre kriteriene må være oppfylt for at det kan ha noen mening å snakke om et "optimalt sikkerhetsnivå":

1. Alle virksomhetens interessenter legger samme vekt på alle konsekvenstyper.
2. Virksomhetens interessenter legger ulik vekt på konsekvenstypene, men godtar at maktforhold (som f.eks. kommer til uttrykk gjennom forhandlinger) avgjør hvor stor innflytelse hvert syn skal ha.
3. Alle konsekvenstyper er slik at alle interessenter ønsker maksimal sikkerhet mot alle konsekvenser (som oftest ved at høy sikkerhet gir god økonomi).

Det 1. og 3. kriteriet er utvilsomt de mest ønskelige. Det 2. er det mest vanlige. Hvert av kriteriene sørger for at én "person" kan fatte "objektivt beste" beslutninger på vegne av alle interessenter. Dette er en forutsetning for en objektiv beslutningsanalyse. /2/s.8. Hvis ingen av kriteriene er oppfylt eksiterer bare "subjektivt beste" beslutninger for hver av interessentene. Beslutningsanalyser på dette grunnlaget kan ofte være like interessante. Alle de tre kriteriene er forenklinger som sjelde vil gjelde fullt ut.

Når det gjelder letboring etter olje til havs er bokstavelig talt alle i samme båt. Det betyr at mange alvorlige beslutninger har samme konsekvenser for alle ombord. Aktiviteten ombord skjer altså tilnærmet etter en såkalt "harmonimodell". Sannsynligheten for oljeforurensninger som følge av letboring er liten og mye mindre enn ved produksjonsboring og produksjon. Hvis forurensningsfaren ved letboring neglisjeres, finnes det ingen "utenforstående" interessenter av betydning for den daglige drift. For operasjonelle beslutninger på en letboringsplattform er det derfor ikke urimelig å anta at den 1. optimalitetsforutsetningen er oppfylt. For denne virksomheten finnes det da et optimalt sikkerhetsnivå som oppnås ved hjelp av et sett optimale beslutningsregler.

1.2. Generelt om problemstillingen - hvorfor er den interessant?

All industriell virksomhet foregår i omgivelser som forandrer seg. Det gjelder f.eks. langsiktige forandringer av politisk eller teknologisk karakter. Men det kan også gjelde kortsiktige forhold som f.eks. fraværsprosenten blant de ansatte neste dag. For alle typer forandringer er det

alltid ønskelig å skaffe informasjon om hva som er i ferd med å skje, slik at en kan ha en velbegrunnet antagelse om situasjonen i morgen og dermed kunne treffe nødvendige tiltak. En slik beslutningssituasjon er den som operatørselskapene står overfor på en mobil boreplattform under leteboring etter olje og gass. Mange operasjoner kan ikke utføres under dårlige værforhold, eller ulykkesrisikoen øker med dårligere vær. Operasjonelle beslutninger må foretas uten at en vet hvordan været vil utvikle seg. I forenklet versjon kan en si at operatøren må foreta en avveining mellom følgende to tapmuligheter:

- Hvis en vurderer værutviklingen slik at en treffer defensive tiltak, dvs. trapper ned eller stanser operasjoner, og det blir bra vær: Økonomiske tap pga. forsinkelser.
- Hvis en vurderer værutviklingen slik at en ikke treffer defensive tiltak, og det blir dårlig vær: Ulykkesrisikoen øker; mulighet for skade på utstyr, tap av menneskeliv og større sannsynlighet for ukontrollert utblåsning.

Kjernen i problemet er konsekvensene av å "vurdere værutviklingen slik at...". Målet er at denne vurderingen er best mulig. Moan /3/ uttrykker avveiningen slik:

"Clearly, the possible off-hire or delay costs by stopping the operation is an incentive to continue without changing the operation mode. This conflicting situation between efficiency and safety is not strictly governed by regulations today."

Beslutningene ombord på en boreplattform baseres på avanserte værmeldings-systemer. Imidlertid er værmeldinger i Nordsjøen og nordover usikre pga. raskt skiftende værforhold. Operatørselskapene stilles derfor kontinuerlig overfor beslutninger under usikkerhet. Riggkonstruktørene og operatørselskapene angir normalt øvre grenser for riggens bevegelser under ulike operasjoner. Slike grenser tjener i dag bare som retningslinjer:

"The ... values must be taken as averages. The individual operator will set his own limits according to his experience". /3/.

Et av de risikoreduserende tiltak som foreslås i et "Sikkerhet på sokkelen"-forprosjekt /4/ er å etablere

"beslutningskriterier for vær-situasjoner ved hvilke en spesiell aktivitet ikke lenger burde fortsette. For flere aktiviteter er det vanligvis en øket risiko i dårlig vær. Med mangel på kriterier for når en aktivitet skal stoppes, vil risikonivået avhenge av den enkelte ansvarlige persons villighet til å ta risikoer."

Dette forslaget ser først og fremst beslutningskriteriene ut fra et sikkerhetssynspunkt. Det er naturlig ut fra ulykker som har skjedd, og på bakgrunn av fortjenestemarginene i oljevirkomheten. Til tross for stor oppmerksomhet mot sikkerheten blir beslutningene i praksis alltid en avveining mellom sikkerheten og dens pris:

"... in reality the motion limits should not be considered as fixed quantities. In the end it is a question of a balance between initial investment and the value of increased availability of the structure."/3/.

De beslutningsreglene som anses best er de som gjør forventet tap for virksomheten minst mulig. Hvilke regler som velges er avhengig av hva som menes med tap; hvilken vekt som legges på menneskelige, økologiske og økonomiske tap. Det kan tenkes to hovedmåter å velge ut "gode" beslutninger på:

- Ut fra erfaring og kjennskap til det tekniske utstyrets begrensninger lage kriterier for når utstyret kan brukes. Sammen med en beskrivelse av forhold som mennesket kan betjene utstyret under foreligger dermed kriterier for når operasjonene ikke skal finne sted. Dette er den metoden som brukes for praktisk talt alle operasjoner.
- Å bestemme beslutningsregler ut fra ulike handlingers mulige tap ved hjelp av verktøyet stokastisk beslutningsteori.

Fordelen med den første framgangsmåten er at en på en enkel måte har regler som er gode, i det minste så gode som erfaring og intuisjon tilsier. Ulempen er at totalbildet av risikoforholdene er uklart, det finnes ingen systematisk måte som alternativene settes oppmot hverandre på. Dette gjøres imidlertid i den andre framgangsmåten. Hvis beslutningsmodellen er god vil løsningen

representere de beste reglene. Imidlertid er problemet nettopp det å lage en god beslutningsmodell. Og resultatets godhet står og faller med den teoretiske formuleringen.

Sitatene i denne innledningen dokumenterer at selve problemstillingen er svært aktuell. Det foregår da også prosjekter ved flere institusjoner, f.eks. Meteorologisk Institutt og "Sikkerhet på sokkelen" (SPS), som på en eller annen måte omhandler været som risikokilde, og kan grupperes under det første framgangsmåten ovenfor. Alle disse prosjektene er av beskrivende karakter. Det er ikke foretatt noen formell beslutningsanalyse av operasjoner i forbindelse med offshore oljeboring i Nordsjøen. Det å forsøke en slik framgangsmåte er av den grunn interessant og er derfor emne for denne oppgaven. Problemets kompleksitet er en annen faktor som taler til fordel for kvantitative metoder. En modell kan avsløre sammenhenger og egenskaper som ikke er lette å observere i virkeligheten. Ofte kan modeller eller teoretiske formuleringer også ha pedagogisk verdi, dvs. gi innsikt og oversikt på en enkel måte. Økende kunnskap og oppmerksomhet mot vær-risikosammenhenger vil gjøre teoretiske betraktninger mer realistiske. Denne rapporten bygger bygger på informasjon og data som overhodet ikke var tilpasset denne type analyse. Det kan tenkes at framgangsmåten ikke er noen farbar vei, i så fall er det viktig å konstatere. I motsatt fall er det en ny og nyttig anvendelse av kjent, men ikke mye benyttet teori.

1.3. Hvordan oppgaven tenkes løst - bruk av modelleksempel.

I forrige avsnitt ble problemstillingen betraktet mest som "idé til emne å se nærmere på". I dette avsnittet skal vi se på hvordan idéen kan utprøves. Både medarbeidere i operatørselskaper og andre institusjoner og enkeltpersoner har uttrykt, i samtale eller i fagrapporter, interesse for idéen. Det bør imidlertid understrekes at det råder en viss skepsis til hvorvidt det har noe for seg å bruke et verktøy som stokastisk beslutningsteori. Skepsisen grunner trolig i at en slik analyse vil måtte bygge på en forenklet, grov og makroskopisk modell. Et foreløpig forsvar for å forsøke å gjøre noen teoribetraktninger om beslutningssituasjonene på en leteboringsplattform kan oppsummeres i disse punktene:

- Emnets interesse er dokumentert i forrige avsnitt.
- Bare mistanke om at en metode er nyttig er grunn nok til å prøve den, når det koster så lite som i dette tilfellet.
- Formell beslutningsanalyse gir, hvis den virker, informasjon som mer uformelle metoder ikke kan gi.
- At en modell er grov og makroskopisk betyr ikke at den er dårlig, men at detaljer er sammenfattet i hensiktsmessige grupper. Resultatene blir dermed også mindre detaljerte.
- Hvis beslutningsteorien virker tilfredsstillende på en forenklet modell, er det bare spørsmål om å lage en bedre modell og å skaffe bedre data for å gjøre resultatene mer praktisk anvendbare.

Problemet foreligger ikke som noen "skoleregneoppgave". Det foreligger også lite informasjon og i ingen data i den form som er nødvendig for å lag en slik regneoppgave. Det første skritt mot løsning må være å finne, velge ut og strukturere nødvendig informasjon.

Denne oppgavens hovedhensikt må derfor være å formulere problemstillingen på en slikt måte at den kan løses med kjente analytiske metoder.

Formell beslutningsanalyse av operasjoner på en leteboringsplattform må betraktes som "upløyd mark". Tidsknapphet gjør at rapporten i beste fall kan tjene som forprosjekt for grundigere analyser. Uttrykt billedlig står valget mellom å pløye opp hele landskapet, uten å forsøke dyrking og å pløye en mindre del, men få tid til prøvedyrking. Jeg har valgt det siste. Den viktigste grunnen til det er at det er den eneste metoden til å avgjøre om området er fruktbart. Oppgaven kan dermed best karakteriseres som "problemorientert metodeutprøving". Konkret vil denne angrepsmåten si at en går gjennom alle ledd i problembehandlingen, fra innsamling av data til resultater og diskusjon av resultatandvendelse, for en sterkt avgrenset del av problemet. Formuleringsfasen er allerede nevnt som det viktigste leddet og vil bygge på teori for stokastiske beslutningsprosesser. For å vurdere metoden er det også viktig å utføre selve optimaliseringen. Resultatene vil forhåpentligvis avsløre svakheter ved modelldefinisjonen.

Følsomhetsanalyser kan fortelle hvordan tilstandsinndelingen kan forbedres og hvilke data det bør stilles større krav om nøyaktighet til.

Til nå har begrepet "beslutninger" vært omtalt i generelle vendinger. Framstillingen har også gitt inntrykk av at "beste beslutninger" bare er et resultat av "intelligent skrivebordsarbeid". Vi skal nå knytte begrepet mer til den operasjonelle virkelighet. Før et operatørselskap kan starte boring av en brønn må det utarbeides relativt detaljerte planer for flere av fasene i arbeidet. Planene må godkjennes av Oljedirektoratet før boringen starter. Det gjelder f.eks. planer for setting av foringsrør, som bygger på kjennskap til geologiske forhold på stedet. Det er imidlertid mange forhold som ikke kan inngå i planene. Ofte må en avvike fra oppsatte planer. Det kan skyldes rutinemessige utskiftninger og vedlikehold eller uventede og uønskede hendelser. Når uventede hendelser inntreffer, f.eks. dårlig vær, må operatøren i en viss forstand improvisere. Operatøren må altså fatte beslutninger om den videre aktivitet, som ikke er entydig gitt på forhånd. Disse beslutningene baseres på alle relevante informasjoner, hvorav noen av de viktigste er:

- hvilken aktivitet som pågår i øyeblikket
- værtilstand - forventet utvikling
- brønndybde
- geologi
- andre brønnforhold
- erfaring med liknede hendelser

Slike beslutningssituasjoner er det altså meningen å forsøke å formulere for å kunne velge "beste beslutninger". Oppgaveteksten forutsetter at det værforholdenes innvirkning på beslutningene og riskonivået som skal tas opp. Bare de to første faktorene tas med som tilstandsvariable (dvs. fungerer som beslutningsgrunnlag). Alle andre faktorer vil inngå implisitt som "gjennomsnitt" eller de vil bli omtalt spesielt. Begrunnelsen for denne avgrensningen er som følger.

En beslutningsanalyse hvis resultat skulle brukes operasjonelt, måtte ta flere forhold i betraktning. Og valg av beslutning på denne måten forutsetter en omfattende modell som tar hensyn til detaljinformasjon om beslutningssituasjonen. Det ville i praksis si valg

av beslutning på grunnlag av interaktiv programkjøring omord på platformen. Å gjøre en virkelig omfattende studie av en bestemt platform er et stort arbeid og ligger langt utenfor omfanget av en hovedoppgave. Bl.a. gjør datamangel det vanskelig å utføre en slikt konkret studie. Dessuten er det ikke hensiktsmessig, fordi resultatene ikke skal brukes operasjonelt i virkeligheten, men til å vurdere en analysemetode. Det stiller ikke fullt så store krav til realisme. Analysen gjøres isteden på et tenkt system - på et modelleksempel. Modelleksempel er ment å være et slags gjennomsnitt for mobile borerigger av den typen som brukes i norske farvann. Det er flere fordeler ved å bruke et modelleksempel. En av dem er at en kan bruke statistiske data noe mindre kritisk enn om en studerte ett spesielt system. Sagt på en annen måte så tar vi hensyn til hva slags data som tilgjengelig ved definisjon av modelleksempel.

1.4. Leteboringen i et totalt risikobilde.

Leteboring etter olje til havs er bare én av mange aktiviteter som innebærer risiko. Det kan være interessant å sammenlikne sannsynlighetene for en del hendelser som knytter seg til forskjellige typer aktiviteter. I tabell 1.1. er det samlet noen slike sannsynligheter. Tallene er usikre, men usikkerheten er omtrent den samme for alle.

Den alvorligste industrielle ulykken som kan inntreffe på en oljeboringsplattform er en ukontrollert utblåsning. Menneskeliv kan gå tapt, brønnen, brønnutstyret og selve platformen kan påføres store skader. Alvorlige skader på selve platformen skyldes tre hovedfaktorer: Dårlig vær (50%), ukontrollert utblåsning (25%) og platform under tauing (25%). Prosenttallene angir andelen av tilfellene der hver faktor var en hovedårsak. Andelen av store platformulykker som har skjedd i Nordsjøen utgjør noe over 10% av alle store ulykker på verdensbasis i perioden 1955-74. /3/s.74. I samme periode, dvs. ca 2600 riggår, har omkring 100 mennesker mistet livet som følge av ulykker på mobile bore-rigger. /7/.

Skaderaten i perioden, dvs. forholdet mellom antall skadede rigger og antall operative rigger, var 3.4%. Pengeverdien av skadede rigger har gjennomsnittlig vært 2.1% av verdien av verdens riggflåte og Huff /7/ heyder at verdiandelen ventlig vil stabilisere seg rundt 2%.

I innledningen ble det nevnt at det er vanskelig å nyttevurdere hendelser med spesielt store tap og små sannsynligheter. Dette kommer også til uttrykk ved at offshore-forsikringsmarkedet er meget labilt. Markedet har kapasitetsproblemer når det skal absorbere høykostnadsenhetene som er å finne i Nordsjøen. Det blir hevdet at et stort tap på 1 - 1.5 milliarder kr. er nok til at forsikringsmarkedet faller sammen. /4/s.74. For halvt nedsenkbare plattformer, som nærmest er enerådende i Nordsjøen, er premiene omkring 2% pr. år av plattformverdien. /3/s.30. Det er vanligvis mange begrensninger i forsikringene, slik som krigsrisiko, nasjonalisering, streiker og liknende forhold. Spesielt viktig for denne oppgaven er det at heller ikke tap av produksjon, tap av olje eller brønn, tidstap etc. er dekket.

Hendelse	Sannsynlighet	Referanse
Totalhavari for skip i den norske handelsflåten (pr. år for ett skip)	$0.6 \cdot 10^{-2}$	/3/
Totalhavari for mobil borerigg av vilkårlig type (pr. år for én rigg)	$1.0 \cdot 10^{-2}$	/3/
TransCanada togavspring (ett tog i drift i ett år)	$1.9 \cdot 10^{-2}$	/5/
Ukontrollert utblåsning i letefasen (pr. boret brønn i Nordsjøen)	$3.0 \cdot 10^{-3}$	/6/
Gjennomsnittlig dødlighet (for nordamerikaner pr. år)	$5.5 \cdot 10^{-3}$	/5/
Ukontrollert utblåsning i produksjonsfasen (pr. brønnår i Nordsjøen)	$3.0 \cdot 10^{-4}$	/6/
Dødsulykke med bil (én bil i en kanadisk storby i ett år)	$5.0 \cdot 10^{-4}$	/5/
Flystyrt (ett rutefly i drift i ett år)	$2.8 \cdot 10^{-6}$	/5/

Tabell 1.1. Sammenlikning av sannsynligheter for hendelser av forskjellige typer.

1.5. Hvordan rapporten er bygd opp.

Slik jeg valgte å løse oppgaven i avsnitt 1.3. er det klart at arbeidet har stor faglig spredning. Det medfører visse problemer mth. rapporten både for meg og leseren. Et alvorlig dilemma ved å skrive en slik rapport er konflikten mellom fullstendighet på den ene siden og lesbarhet og oversikt på den andre. På alle felter som oppgaven berører, fra de prinsipielle sidene til den tekniske systembeskrivelsen, er det isolert sett ønskelig med grundigere behandling i rapporten. Jeg har gjort avveiningen slik at hensynet til lesbarhet og oversikt har veid tyngst. Det er gjort fordi rapporten på den måten best får fram det vesentlige med oppgaven, vel vitende om at hvert delområde da er ufullstendig behandlet.

Rekkefølgen av kapitlene er den samme som for de tilsvarende fasene under arbeidet. De fleste kapitlene står stort sett på egne ben og kan leses isolert. Eventuelle lesere som bare er interessert i en begrenset del av problemet kan derfor lese tilsvarende kapitler. I det følgende er det angitt hvilke kapitler som kan leses hvis man er interessert i:

- prinsipielle sider ved problemet:

1. Innledning.
7. Konklusjoner.

- problemets teoretiske sider:

4. Prosesser og beslutninger - kontroll og tilfeldigheter.

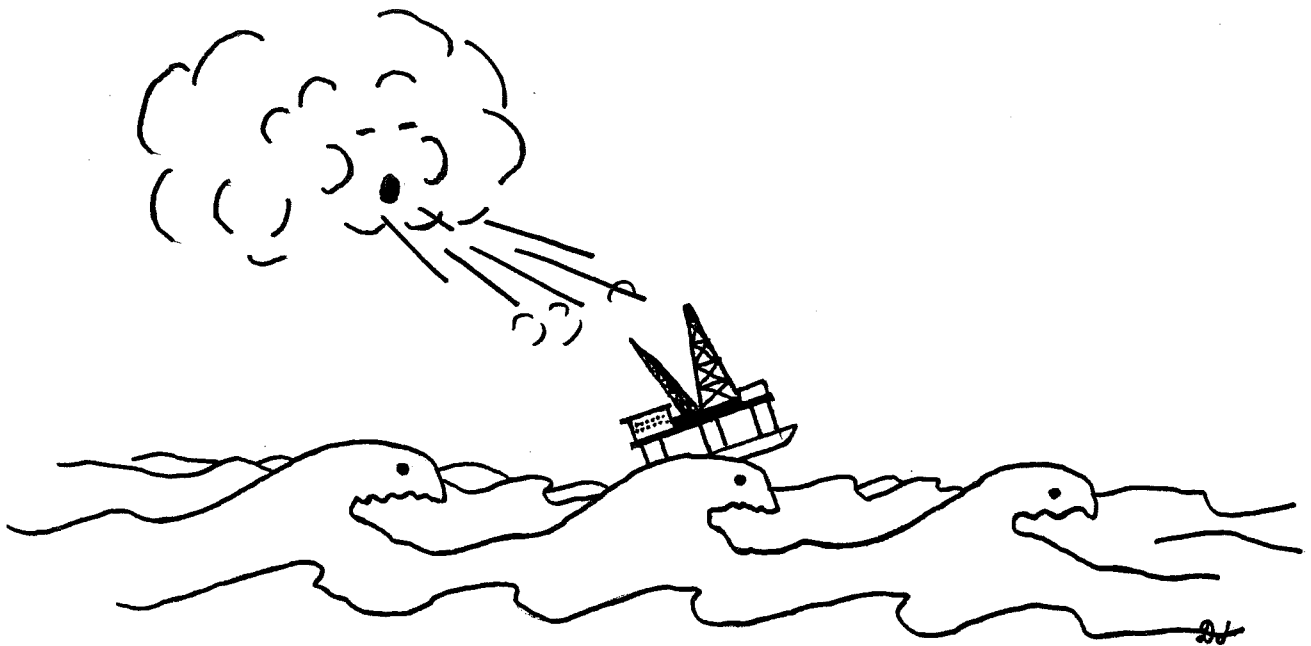
- sammenhengen mellom modell og virkelighet:

1. Innledning.
5. Tilstandsdefinisjoner og innhenting/bearbeiding av modelldata.

- løsningsmetoder:

4. Prosesser og beslutnings - kontroll og tilfeldigheter.
6. Løsning av optimaliseringsproblem - resultater.

2. BORERIGGENS OMGIVELSER - GEOLOGI OG VÆRFORHOLD,



- Naturen allierer seg alltid med skjulte feil.
- Overlatt til seg selv, driver alt mot det verre.

(korollarer til Murphys lov)

2. BORERIGGENS OMGIVELSER - GEOLOGI OG VÆRFORHOLD.

2.1. Valg av geografisk område: Haltenbanken.

Slik problemet er formulert i innledningen er pålitelig værstatistikk en forutsetning. En er både avhengig av at meteorologiske observasjoner går mange år tilbake i tiden og at de er foretatt i et område det pågår eller skal startes leteboring etter olje og gass. Fra norske farvann foreligger det tre observasjonsserier hvorav den ene, fra værskipet "Ami" på Tromsøflaket, bare går tilbake til 1976. Fra vær- og redningsskipet "Famita" på $57.5^{\circ}\text{N } 3^{\circ}\text{E}$ går observasjonsserien tilbake til 1959, men gjelder hovedsaklig bare vintermånedene. Værstatistikk fra "Famita" regnes for å være representative for Ekofiskfeltet. Fra værskipet "Polarfront" på $66^{\circ}\text{N } 2^{\circ}\text{E}$ har en helårsobservasjoner helt fra 1949. Klimatologisk erfaring viser at en måleserie bør være opp mot 30 år før en har "statistisk kontroll" over materialet, ifølge Håland /8/. I tillegg til de tre værskipene, finnes det observasjoner fra en rekke fyrstasjoner langs kysten. Ulempen med disse observasjonene er at de er grove og kvalitative, dessuten ligger borefeltene lengre ut fra kysten hvor været normalt er hardere.

I 1980 ble det startet leteboring på Tromsøflaket og Haltenbanken, og det er derfor spesielt interessant å velge ett av disse to områdene. For Tromsøflaket er datagrunnlaget for dårlig og for borefeltene på Haltenbanken foreligger ingen systematiske data. Imidlertid antas det at forholdene på Haltenbanken kan beskrives ved et gjennomsnitt av forholdene ved "Polarfront", kyststasjonen Sula og Nordsjøen. Hvor stor vekt en skal legge på de tre datakildene er avhengig av hvilke felt av Haltenbanken en betrakter. /9/s.31. For modelleksempelet forutsettes derfor at boreområdet ligger i de ytre feltene av Haltenbanken og at værstatistikk fra "Polarfront" er representative for boreområdet.

2.2. Værforhold - beslutningsgrunnlag og risikokilde.

2.2.1. Vind.

Vindforhold har stor betydning for virksomheten på en mobil borerigg. Sterk vind belaster forankringssystemet og øker faren for aydrift. Vind

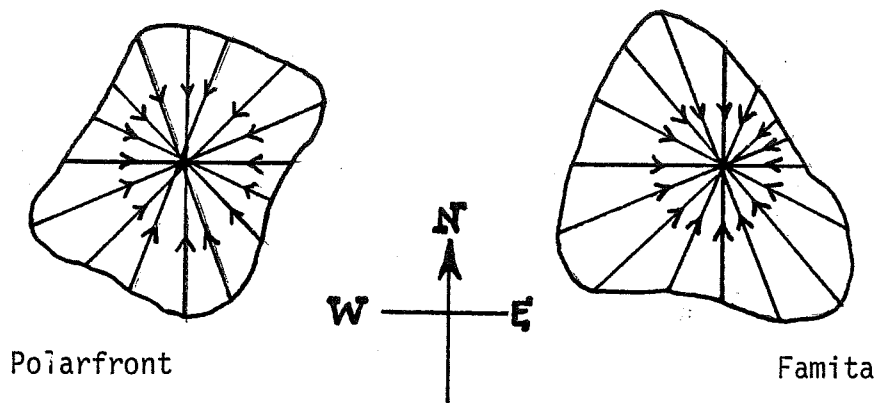
påvirker mennesker og operasjoner må ofte utsettes, slik at forsinkelser oppstår. Mennesker er enda mer følsomme for vind ved nedbør og kulde. Vindforholdene påvirker også bølgeforldene og øker faren for ising. Den internasjonale standard for vindmålinger krever at disse skal tas 10m over flatt lende (f.eks. hav). Vindhastigheten beregnes som en middelverdi over 10 minutter. Vindhastigheten målt etter denne standard deles inn i 12 trinn som kalles Beauforts skala. Tabell 2.1. viser denne skalaen med tilhørende navn på vindstyrkene. Håland /8/ har gjort en grov-inndeling av vindstyrker med henblikk på operasjoner til havs. Tabellen viser også prosentvis fordeling i tid av de 3 vindtilstandene ved "Polarfront" for sommer og vinter. /10/.

Beaufort skala	Navn på vindstyrke	Vindhastighet	Vindtilstand	Operasjonskarakteristikk	Prosentvis fordeling	
		m/s			sommer	vinter
0	stille	< 0.2	1	få problemer	60	27
1	flau vind	0.3-1.5				
2	svak vind	1.6-3.3				
3	svak vind	3.4-5.4				
4	læber bris	5.5-7.9	2	noen problemer for noen systemer	37	44
5	frisk bris	8.0-10.7				
6	liten kuling	10.8-13.8				
7	stiv kuling	13.9-17.1	3	mange problemer for mange systemer	3	28
8	sterk kuling	17.2-20.7				
9	liten storm	20.8-24.4				
10	full storm	24.5-28.4				
11	sterk storm	28.5-32.6				
12	orkan	>32.6				

Tabell 2.1. Vindhastighetskala.

Vindkast, dvs. vindhastigheter midlet over noen få sekunder kan nå opp i verdier som er betydelig høyere enn Beaufort-verdien. Generelt kan en si at for store strukturer er det Beaufort-verdien som er vesentlig, mens personer også er svært sårbare for vindkast, altså vindkastighetens toppverdi. /4/s.55. Vindklimaet er verre på Haltenbanken enn både i Nordsjøen og Barentshavet, selv om forskjellene ikke er store. Retningsfordelingen varierer noe mer. Figur 2.1. viser hvordan 12 diskrete vindretninger fordeler seg i prosent av tiden ved "Polarfront". Til sammen-

likning vises også "vindrosen" ved "Famita".



Figur 2.1. Vindrosen ved Polarfront og Famita. /8/.

Vindbelastningene på noen riggtyper (f.eks. Aker H-3) er avhengig av vindretningen pga. asymmetrisk konstruksjon. Figur 2.1. angir imidlertid at vindretningene på ytre Haltenbanken er tilnærmet uniformt fordelte. Ulykkesstatistikker for boreplattformene gir altfor liten informasjon til at vindretningen kan tas hensyn til i modellen.

2.2.2. Bølger.

Bølgeforhold har også stor betydning for virksomheten på en mobil borerigg. Høye bølger gir hiv og slingring og belaster selve konstruksjonen. Bølgene belaster også det tekniske utstyret som har med forbindelsen til brønnen å gjøre. Dessuten vanskeliggjøres operasjoner i og ved brønnen. Selv om bølgebegrepet angir at det er noen periodisk eller regelmessig, er det mange uregelmessigheter som gjør en enkel matematisk beskrivelse vanskelig. Bølgehøyde er en målbar størrelse som gjelder kun et lite tidsintervall. For å beskrive bølgehøyde som et vedvarende kjennetegn på en værtilstand brukes begrepet signifikant bølgehøyde. Grovt sett er signifikant bølgehøyde definert som middelverdien av høydene til den tredjedelen av bølgene som er høyest. Forholdet mellom maksimal bølgehøyde og signifikant bølgehøyde er en faktor på 1.8 - 1.9. Tabell 2.2. viser fordelingen til signifikante bølgehøyder på 3 høydegrupper, analoge med inndelingen som ble gjort for vindstyrker. Tabellen gjelder forholdene ved "Polarfront".

Rapportene NOU 1979:8 /9/ og SPS /4/ referer til Håland /8/ når det gjelder fordelinger av vindstyrker og bølgehøyder ved "Polarfront". Eidsvik /10/ som på andre punkter også referer til Håland gir fordelinger av vindstyrker og bølgehøyder som ikke samsvarer med rapporten /8/. Forskjellene grunner trolig i at værstatistikk ofte presenteres enten som observasjonsdata alene eller kombinert med teoretiske beregninger. Det går ikke alltid klart fram hva tabellene gjelder, slik at det ikke har lyktes å klarlegge dette. Idet Eidsvik er den eneste av disse som også har estimert overgangssannsynligheter er det hans tall som blir brukt i denne oppgaven.

Bølge- skala	Signifikant bølgehøyde	Bølge- tilstand	Operasjons- karakteri- stikk	Prosentvis fordeling	
	m			sommer	vinter
0,1,2 3	< 0.5 0.5-1.2	1	få problemer	48	19
4 5	1.3-2.4 2.5-3.9	2	noen problemer for noen systemer	50	62
6 7 8 9	4.0-5.9 6.0-8.9 9.0-13.9 > 13.9	3	mange problem- er for mange systemer	2	19

Tabell 2.2. Bølgehøydeskala.

2.2.3. Andre værfaktorer.

Vind og bølger er uten tvil de to viktigste værfaktorene og er de eneste som vil bli tatt med i modelleksempellet. Grunnen er at andre faktorer ikke oppfyller alle disse 3 kriteriene:

- Værfaktoren må forandre seg over kort tid og statistikk etter samme mønster som for vind og bølger må foreligge.
- Værfaktoren må ha betydning for de beslutninger som skal behandles for modelleksempellet.
- Værfaktoren må bidra mer til modellens realisme enn den reduserer mulighetene til å arbeide med modellen.

Vi skal nå ta for oss noen værfaktorer og se hvorfor de ikke tas med i modellen. Den eneste værfaktoren i tillegg til vind og bølger som tilfredstiller det første kravet er havstrømmer. /11/. Imidlertid er havstrømmer vanskeligere å beskrive enn vind og bølger. Både havstrømmer og tidevannsstrømmer er avhengig av bunntopografi og er følsomme for tettshetsvariasjoner i vannet. En generell regel er imidlertid at strøm ved overflaten er 2-4% av vindhastigheten og under 2% av vindhastigheten 5m over havbunnen. Strømkreftene som virker på platformen utgjør ifølge dette og data fra /12/ 20-40% av vindkreftene. Det er rimelig å anta at havstrømmers innvirkning på beslutninger faller sammen med vindfaktorens innvirkning. Havstrømmer tas derfor ikke med i analysen, fordi det siste kriteriet overfor ikke er oppfylt.

Ising er et fenomen som oppstår når sterk vind og sterk kulde forekommer samtidig. I perioden 1957-76 var det ved Polarfront bare 0.2% av observasjonene som kunne ha gitt moderat ising og under 0.05% som kunne ha gitt alvorlig ising. /8/. Det er mindre sannsynlighet for ising på åpent hav enn ved kysten. Ising tilfresstiller dermed ingen av kravene.

Før mange observasjoner kan dårlig sikt være en begrensende faktor, og sikt under 1 km regnes for å være kritisk. Dette gjelder transport av platformer, forsyningstjeneste og helikoptertrafikk i mye større grad enn

selve boreoperasjonene. I perioden 1957-76 var det på årsbasis ved "Polarfront" ca 1% av tiden at sikten var dårligere enn 1 km. I juni, juli og august var det 4-5%. /8/. Dårlig sikt oppfyller ikke det første kriteriet, delvis de to andre.

Nedbør kan være en begrensende faktor for operasjoner på en borerigg. Ved "Polarfront" er det stort sett bare i juli og august at det er sikkert at det ikke vil snø. Vind og bølger er to fenomener som er sterkt avhengige av hverandre. Å ta med nedbør som værfaktor i tillegg ville komplisere modellen sterkt, fordi sammenhengen mellom vind/bølger og nedbør er vanskelig å modellere.

Tidevannsforskjeller på Haltenbanken er antatt å være 1.5 - 2.0 m. Imidlertid er fenomenet uinteressant for modelleksempelen, fordi det er periodisk og dermed deterministisk. Begreper som "100-års bølgen" og "100-års vind" har interesse for styrkeberegninger av konstruksjoner, men ikke for operasjonelle beslutninger. Dette gjelder også jordskjelv som kan opptre på norsk kontinentalsokkel.

Hvordan været, dvs. vind og bølger, modelleres og skal brukes som beslutningsgrunnlag i modelleksempelen, behandles i kapittel 4.

2.3. Geologi - inntektskilde og risikokilde.

De geologiske forhold på borestedet påvirker både sannsynligheten og konsekvensene av en ukontrollert utblåsning. Fordi boring på Haltenbanken tok til i år foreligger det minimalt med geologiske data. Det synes som om strekningen Møre - Lofoten er en fortsettelse av Nordsjøen mht. geologi og sedimentasjonshistorie. Det er derfor ikke urimelig å anta at en vil støte på de samme forholdene på Haltenbanken som på Statfjordfeltet. /9/. I Statfjord - Brent området består reservoaret av to sandsteinslag på dyp større enn 2500 m, og har trykk på ca 400 atmosfærer. Sandsteinen er en god reservoarbergart, idet den ikke trenger behandling for å gi høy produktivitet, slik som for kalksteinsreservoarene på Ekofiskfeltet. Reservoarer med potensiell høy produktivitet kan gi store utslippsmengder ved utblåsning.

Trykket øker med avstand fra havoverflaten og økningen er ca 1 atmosfære pr. 10 meter dybdeøkning. Hvis trykket i reservoaret er høyere enn det en

en skulle vente i forhold til avstanden til havoverflaten sies det å ligge i en overstrykkssone. De produserende lagene på Statfjordfeltet er overstrykkssoner. Over disse lagene er det ugjennomtrengelige bergarter med stor mekanisk styrke. Når en borer inn i reservoært fra disse bergartene kan en derfor møte et trykksjokk og få tilbakeslag, dvs. såkalte "utblåsningskandidater". Denne fasen av boringen er derfor kritisk.

I de øvre lag, dvs. ned til ca 1000 m, er det vanlig å støte på grunne lommer med gass under trykk. Dette er en svært vanlig utblåsningsårsak, og har spesielt vært et problem i Statfjordområdet. Hvis bergartenes styrke er liten vil en kunne få kraterutblåsning (dvs. utblåsning utenfor brønnen) hvis trykket stenges inne ved hjelp av en sikringsventil. Pga. det høye trykket vil gassboblene utvide seg drastisk på vei opp mot overflaten. Det gjør at tettheten til vannet rundt platformen avtar så mye at platformen mister oppdrift. Et eksempel på dette med heldig utfall skjedde høsten 1980 på Tromsøflaket. En kan også støte på CO₂-gass og H₂S-gass. Hydrogensulfid er korroderende og svært giftig, og medfører at platformen må evakueres.

Havbunnen på ytre Haltenbanken består av sand og leire, mens på de grunneste partiene er det et moreneliknende materiale, som gir bedre ankerfeste. De øverste 150 - 200 m består av løsmassemateriale.

3. TEKNISK SYSTEMBESKRIVELSE.



df.

- Ethvert system som avhenger av menneskelig pålitelighet er upålitelig.

(Gilbs lov)

3. TEKNISK SYSTEMBESKRIVELSE.

Leteboringsplattformen som teknisk system vil bare bli beskrevet i den grad det er nødvendig for forståelsen av prinsippene for beslutningsanalysen. Og beskrivelsen tar bare sikte på å gi en kortfattet oversikt over systemet. Det henvises til følgende kilder, som gir mer detaljerte systembeskrivelser:

/13/ - generell, lettfattelig og illustrert framstilling av mange sider ved oljevirkosomheten.

/9/ - kortfattet, spesielt med henblikk på sikring mot ukontrollert utblåsning.

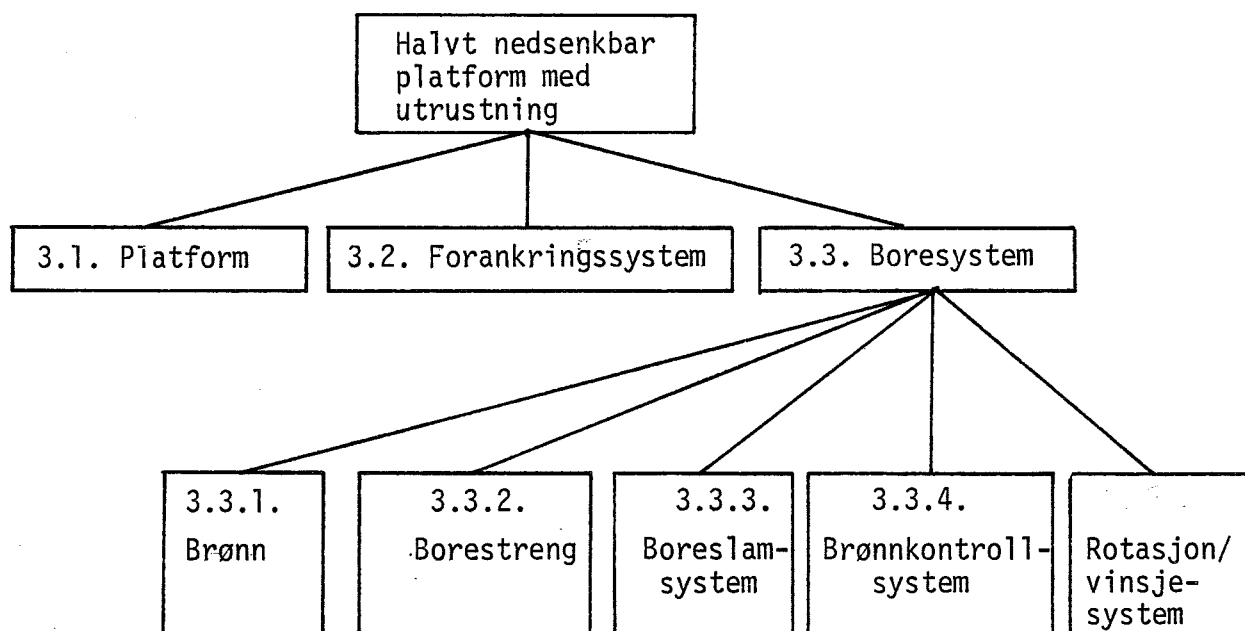
/14/ - detaljert, spesielt med henblikk på sikring mot ukontrollert utblåsning.

/3/ - om platforms-krog og forankringssystemer.

Det finnes i dag omkring 500 mobile borerigger i hele verden, som fordeler seg på tre hovedtyper. Ca 40% av disse er såkalte oppjekkbar platformer. Boreskip og halvt nedsenkbare platformer utgjør henholdsvis 25% og 30% av det totale antallet. /3/s.4. På norsk kontinentalsokkel finnes 10 halvt nedsenkbare og 1 oppjekkbar platform. Grunnen til at de halvt nedsenkbare platformene dominerer er at denne typen tåler det harde været i Nordsjøen og er egnet for havdyp opp til 400-500m. Havdybden på ytre Haltenbanken er ca 300m. Oppjekkbar platformer tåler hardt vær, men kan bare brukes på havdyp opptil 100m, fordi de hviler på havbunnen under boring. Boreskip kan bore på havdyp opptil 1800m, men er svært følsomme for store bølgehøyder og vind. Ettersom tendensen er å stadig bore på større dyp, vil hovedsaklig halvt nedsenkbare platformer bli brukt i områder som i tillegg har hardt klima. For at denne oppgaven skal ha relevans for norsk oljevirkosomhet er modelleksempelet av denne typen.

Selv om det er operasjoner som skal studeres, gir det god oversikt å lage en forenklet skisse av systemet operasjonene foregår i. I dette kapitlet blir delsystemene som er vist i figur 3.1. beskrevet. På figuren er

avsnittene hvor beskrivelsene finnes angitt. Rotasjon/vinsjesystemet har til oppgave å forsyne boresystemet med rotasjons- og løftekraft og vil ikke bli beskrevet nærmere.



Figur 3.1. Plattformens delsystemer. Etter /5/s.40.

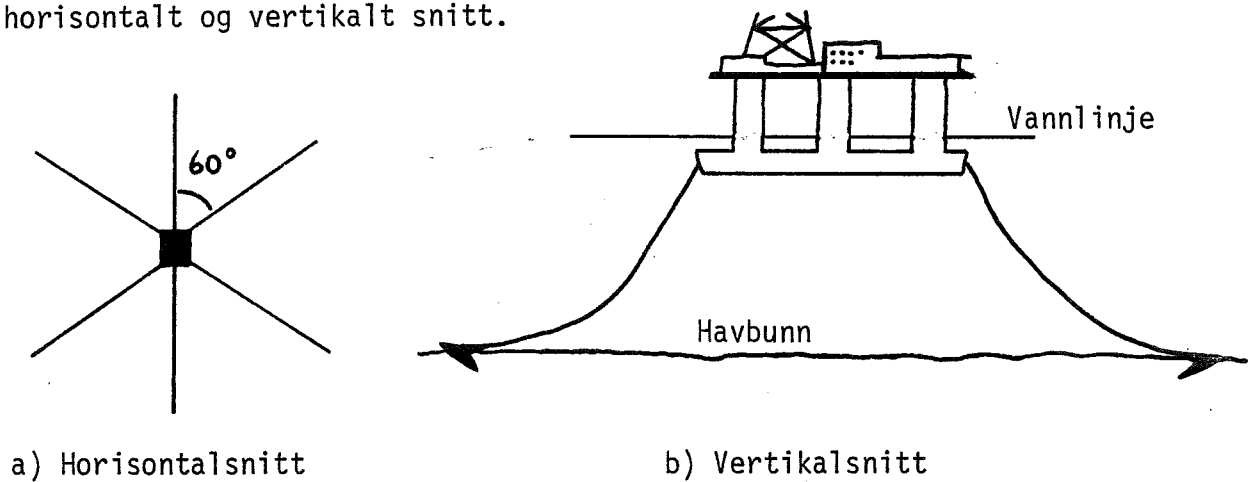
3.1. Plattformen.

Plattformens oppgave er å bære boresystemet og alt personell. Ulykker som forringer plattformens bæreevne kan forårsakes både av ytre belastninger (været) og av operasjoner som foregår på plattformen, f.eks. eksplosjoner og fall av tunge gjenstander. Skader på plattformen kan være katastrofale og selv mindre skader kan forårsake forsinkelser og store kostnader. Omkring 2/3 av alle plattformskader skyldes værbelastninger i motsetning til ulykker under operasjoner. /3/s.74.

3.2. Forankringssystemet.

Forankringssystemets funksjon er å sørge for at plattformen holdes mest mulig i ro når den utsettes for værbelastninger. Det er to hovedmåter å forankre en mobil plattform på; konvensjonell forankring og dynamisk posisjonering. Konvensjonell forankring består av 6-8 anker-

kjettinger/wires som går ut i alle retninger fra platformen i et bestemt mønster. Hver ankerkjetting skal tangere havbunnen helst før og senest i festepunktet. Figur 3.2. viser et eksempel på konvensjonell forankring, i horisontalt og vertikalt snitt.



Figur 3.2. Skisse av konvensjonelt forankringssystem.

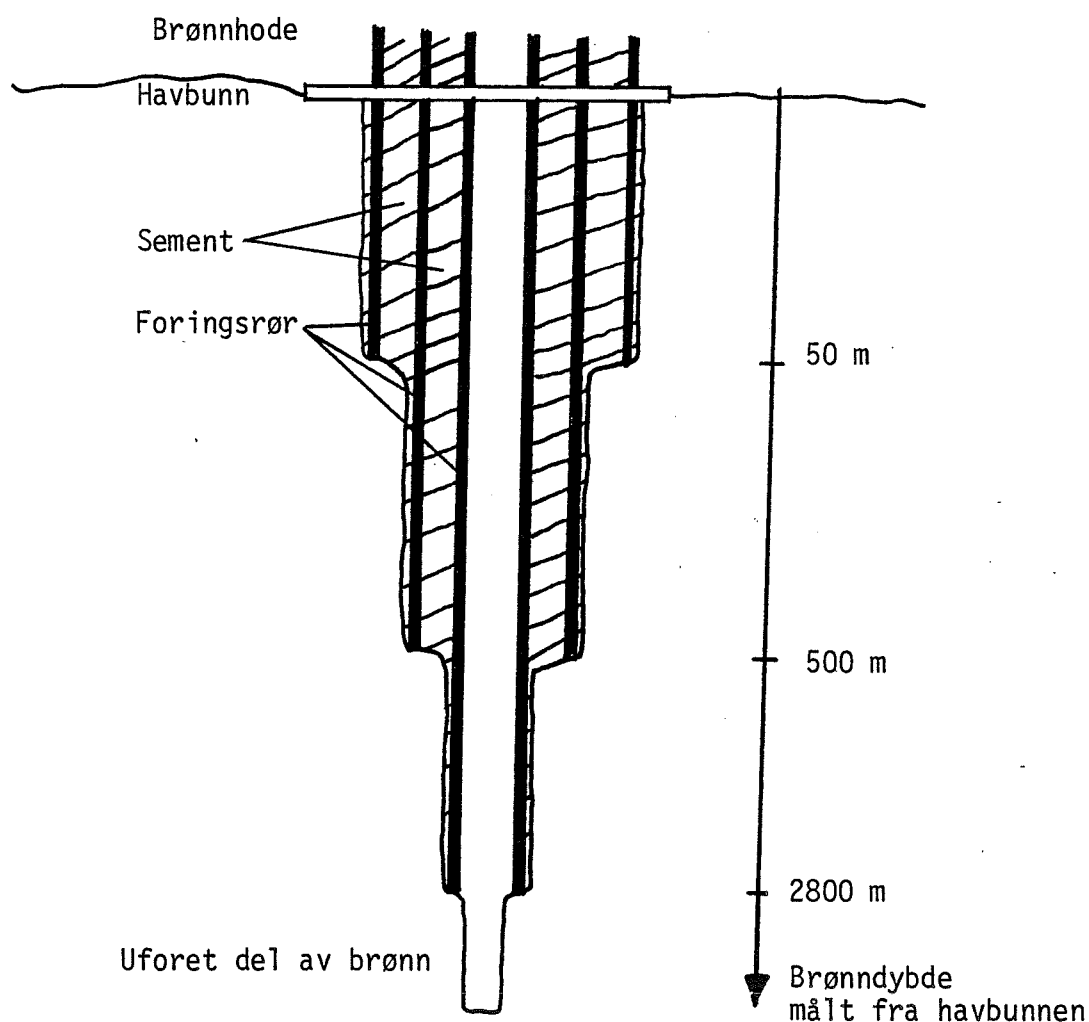
Dynamisk posisjonering skjer ved hjelp av propeller på riggen som styres av et avansert reguleringsystem. Den viktigste fordel ved dynamisk posisjonering er at det er mulig å forlate borestedet raskt, f.eks. av værgrunner. Likeledes krever det lite arbeid og tid å komme tilbake å bli boreklar igjen. Den viktigste ulempen er at riggen kan drive av flere kilometer under ekstreme værbelastninger, mens svikt i konvensjonelt forankringssystemer sjelden vil være total, fordi mange linjer gir betydelig redundans. Dynamisk posisjonering regnes for å være bedre enn konvensjonell forankring på havdyp større enn 900m. For havdyp mindre enn 300m er det omvendt. /3/s.19. Praktisk talt alle platformer som ulykkesstatistikker gjelder for er konvensjonelt forankret og det forutsettes derfor også for modelleksempelen.

3.3. Boresystem.

3.3.1. Brønn.

Brønnen består av brønnehodet, flere nivåer med foringsrør/sement og selve hullet. Brønnehodet betegner ikke noe teknisk system, men er navn på avslutningen av brønnen, der sikringsventilen monteres, som for halvt nedsenkbare platformer er på havbunnen. Når man starter å bore brønnen

finnes bare en bunnplate på havbunnen. Etter å ha boret ca 50m settes første foringsrør (diameter 30"). Foringsrøret sementeres fast ved å presse sement ned gjennom røret slik at den tyter opp mellom formasjonen og røret. Etter at røret er sementert fast, fortsetter boringen med en mindre borkrone. Hvor dypt en borer før en setter nytt foringsrør er avhengig av geologien. Operatørselskapene må levere et nytt program for setting av foringsrør for hver brønn til Oljedirektoratet for godkjenning. Etter at 2. foringsrør (20") er satt og sementert, monteres sikringsventilen (BOP=Blow-out Preventer), som egentlig er et sett av ventiler, på 20"-røret ved brønnehodet. Hensikten med foringsrørene er å hindre at brønnen raser sammen og å hindre at boreslam eller formasjonsvæske skal sprengte brønnen.



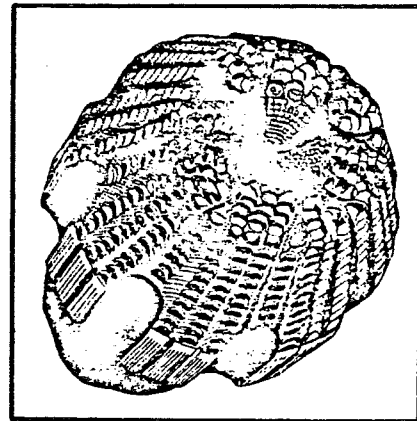
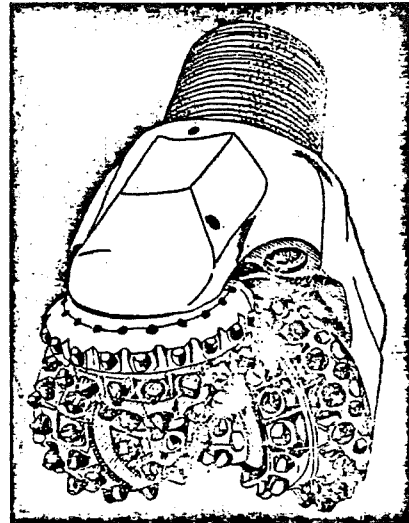
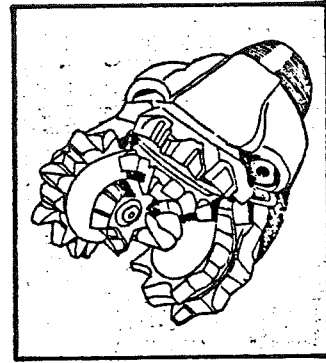
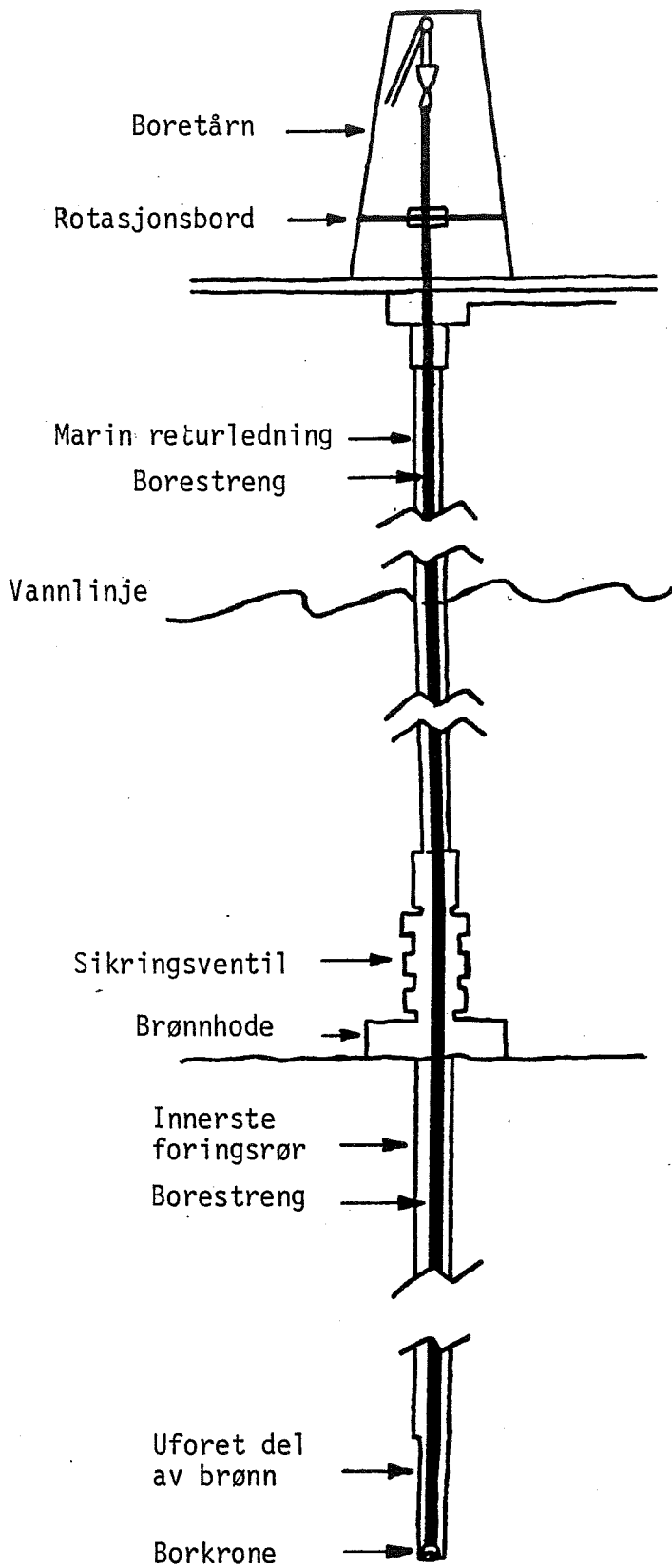
Figur 3.3. Eksempliskisse av uferdig brønn, hvor den dypeste delen ennå ikke er foret (sterkt fortegnert i vertikalretningen).

3.3.2. Borestreng.

Borestrengens oppgave er å overføre roterende bevegelse fra platformen (rotasjonsbordet) til borkronen som graver løst nytt materiale i bunnen og dermed gjør brønnen dypere. Borestrengen er hul og transporterer også boreslam (se neste avsnitt) ned i brønnen. Størrelsen på borkronen avtar etter hvor mange foringsrør som er satt. Det finnes ulike typer borkroner til ulike geologiske forhold, som vil variere nedover i brønnen. Det er viktig å benytte riktig type borkrone kombinert med riktig rotasjonshastighet for å gjøre boringen mest mulig effektiv og for å minimere antall skift av borkrone. For å stabilisere rotasjonen og påføre ekstra vekt på borkronen benyttes en borkrave (engelsk: drill collar) flere steder på borestrengen. Borestrengen består av rør (5-15m lange) med spesialgjenger i begge ender, slik at de raskt kan på- og avmonteres under rotasjon og når borestrengen skal trekkes ut av brønnen. Trekking av borestrengen (engelsk: tripping) er en kritisk operasjon, spesielt i starten, fordi en kan få suging, dvs. en stempeleffekt hvis trekkingen skjer for raskt. Formasjonsvæske kan da strømme inn i brønnen og en har en potensiell utblåsning. Hvis boret setter seg fast (f.eks. under trekking av borestrengen) vil det kunne ta tid å løsne det igjen og en er da sårbar for tilbakeslag fra brønnen (potensiell utblåsning). I nødsfall er det mulig å klippe av borestrengen ved brønnehodet, slik at den faller ned og platformen mister kontakt med brønnen. Hensikten er å kunne komme seg raskt unna borestedet. Men det er et svært tidkrevende arbeid å fiske opp en avklippet borestreng, slik at det er en svært uønsket beslutning å ta. Mellom brønnen og platformen går borestrengen inni den såkalte marine returledning. Den har både teleskopledd og kuleledd i endene for å kompensere for platformens bevegelser i vannet. Når platformen skal kobles fra brønnen må marin returledning heises opp. Figur 3.4. viser noen eksempler på borkroner og en grov skisse av borestrengen.

3.3.3. Boreslamssystem.

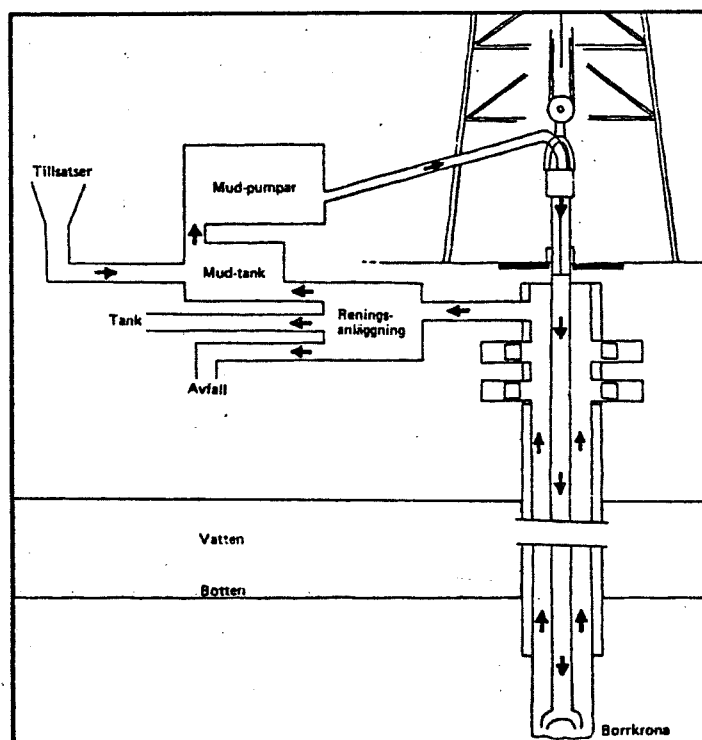
Boreslammet pumpes ned gjennom borestrengen og sirkulerer tilbake gjennom ringrommet mellom borestrengen og siste foringsrør (marin returledning over brønnehodet). Boreslammets viktigste oppgaver er å:



Figur 3.4. Eksempler på borkroner og en grov skisse av borestreng (fortegnet i vertikalretningen).

- frakte utboret materiale opp av brønnen
- kjøle borkronen
- støtte veggen i brønnen der det ikke er foringsrør
- hindre formasjonsvæske å strømme inn i brønnen
- bygge opp mottrykk mot eventuelt trykksjokk (tilbakeslag) fra brønnen.

En skisse av boreslamsystemet er vist i figur 3.5.



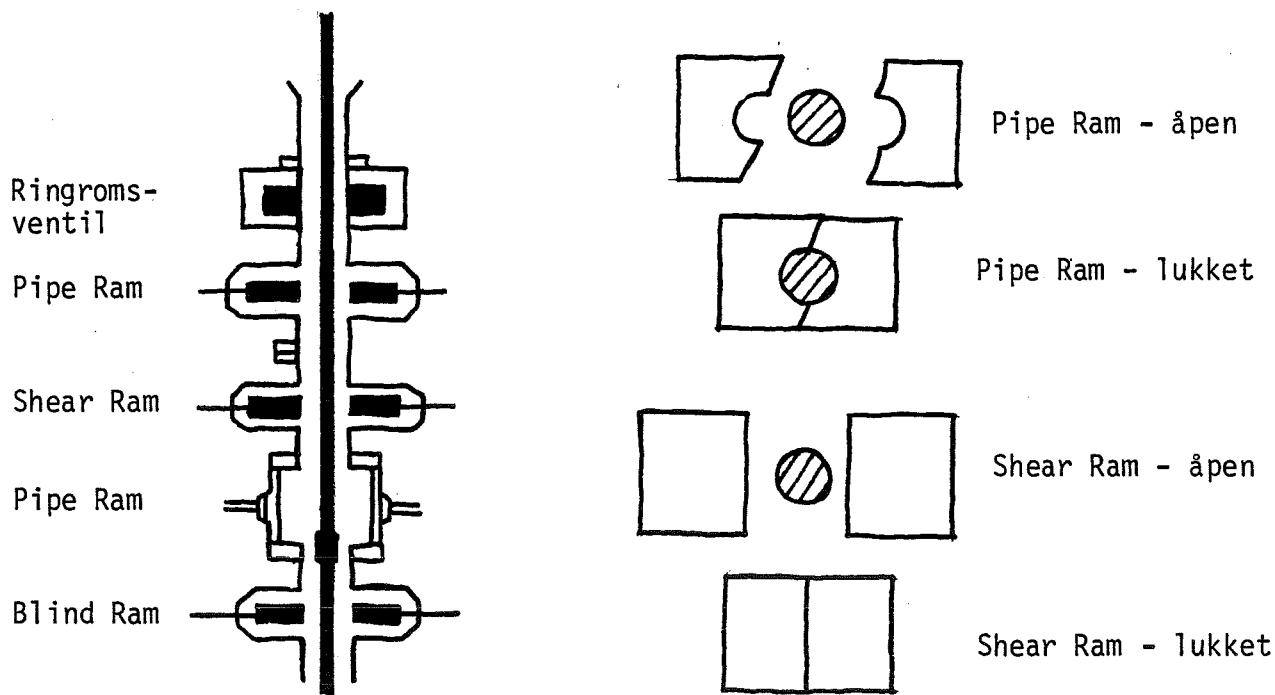
Figur 3.5. Boreslamsystemet. /13/.

Retur slammets renses før det går tilbake i slamtanken, hvor det eventuelt tilsettes kjemiske stoffer (f.eks. baritt) for å tilpasse slammets tetthet og viskositet. Dette gjøres for å få ønsket slamtrykk og transportevne i brønnen. Returslammets testes med jevne mellomrom for å få informasjon om formasjonen. Boreslammets er en svært viktig barriere mot ukontrollert utblåsning. Hvis slamtilførsel svikter i en krisesituasjon kan sjøvann brukes som nødløsning. I spesielt harde formasjoner kan sjøvann være fullt ut tilstrekkelig.

3.3.4. Brønnkontrollsystem.

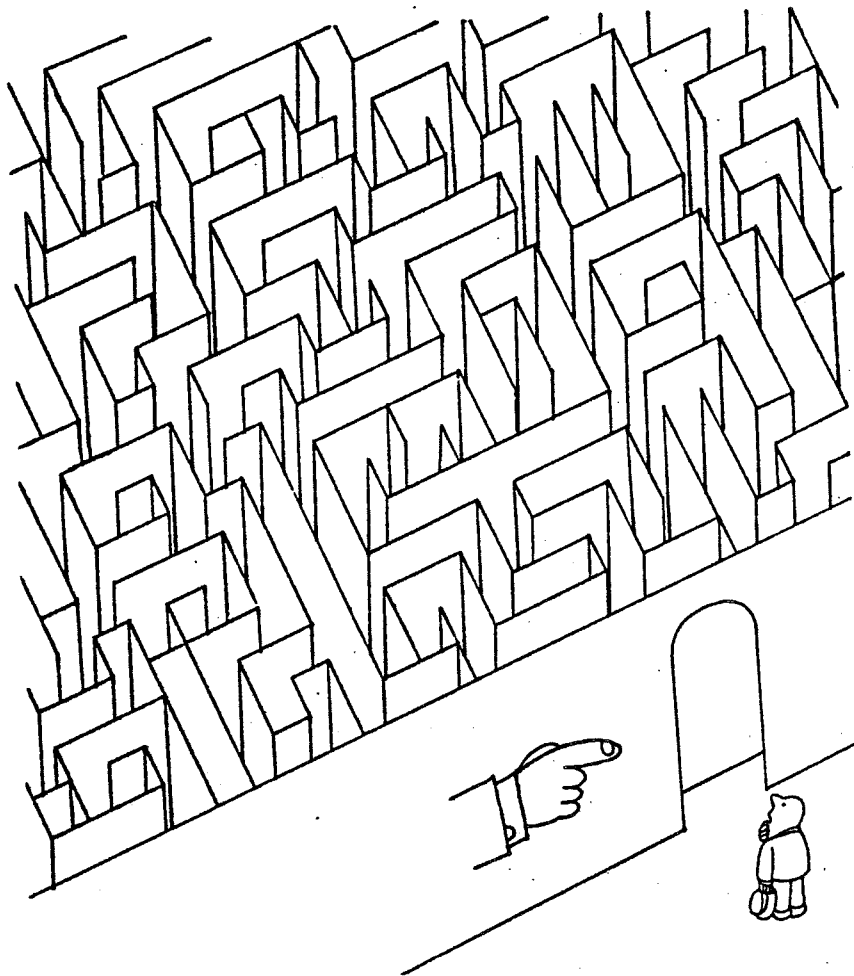
Med brønnkontrollsystem menes her sikringsventiler som er barrierer mot ukontrollert utblåsning i tillegg til boreslamsystemet og foringsrør/ sement. Sikringsventilen (BOP) er montert på brønnehodet på havbunnen. Borestrengen går gjennom sikringsventilen, som er sammensatt av flere ventiler med forskjellige funksjoner. De kan kontrolleres manuelt og hydraulisk fra flere steder på platformen. Skisse av sikringsventil er vist i figur 3.6. Hensikten med sikringsventilen er å "stenge brønnen inne", f.eks. hvis boreslamsystemet ikke kan opprettholde trykklikevekten i brønnen. Ringromsventilen er en gummipakning som kan lukkes både med og uten borestreng i hullet. Pipe Ram kan bare brukes når det er rør i hullet. Blind/Shear Rams kan brukes med og uten rør. Hvis Shear Ram brukes når borestrengen er der, vil den klippes av.

Med stengt sikringsventil kan boreslam fylles og tømmes via de såkalte Kill Line og Choke Line. Det kan være svært farlig å stenge sikringsventilen hvis brønnveggen der det ikke er foringsrør ikke tåler trykket fra tilbakeslaget. Det kan medføre kraterutblåsning og sterk gassutvikling i vannet rundt platformen. I grunne farvann vil platformens oppdrift kunne reduseres så mye at den synker.



Figur 3.6. Eksempliskisse av sikringsventil.

4. PROSESSER OG BESLUTNINGER - KONTROLL OG TILFELDIGHETER.



- Tilfeldighetene omgår enhver
matematisk sannsynlighetsberegning.

(Magne Lerheims lov)

4. PROSESSER OG BESLUTNINGER - KONTROLL OG TILFELDIGHETER.

4.1. Hva er en stokastisk beslutningsprosess?

Hensikten med dette kapitlet er å motivere og presentere oppgavens teorianvendelse. Stokastiske beslutningsprosesser omfatter mange typer prosesser, men vil her bare bli brukt som fellesbetegnelse for Markov- og SemiMarkov beslutningsprosesser. For å introdusere disse begrepene, tas utgangspunkt i en Markovkjede for så å generalisere denne enkle beskrivelsen. Ordet "kjede" brukes ofte om prosesser i diskret tid, selv om "prosess" likevel også brukes da. En Markovkjede er en følge av stokastiske variable $\{X_n, n=0,1,2,\dots\}$ med endelig utfallsrom som tilfredsstiller betingelsen

$$P(X_{n+1}=j | X_n=i \cap X_{n-1}=x_{n-1} \cap \dots \cap X_1=x_1 \cap X_0=x_0) = P(X_{n+1}=j | X_n=i) \quad (4.1.)$$

Indeksen n tolkes oftest som tid og X_n representerer da tidsforløpet av en eller annen størrelse. Hvis $P(X_{n+1}=j | X_n=i) = p_{ij}$, dvs. uavhengig av n , sies Markovkjeden å ha stasjonære overgangssannsynligheter. Bare stasjonære Markovkjeder blir behandlet her. Betingelsen (4.1.), som kalles Markovbetingelsen, uttrykker at tidsforløpet er uten hukommelse, dvs. at kjedens videre utvikling bare er avhengig av nåtilstanden. Mangel på hukommelse kan hindre en realistisk beskrivelse av en del fenomener, men ofte er en Markovkjede en brukbar tilnærming.

En Markovkjede er en prosess "vi" er tilskuere til. Den har sine egne innebygde regler for sin utvikling, som ikke kan kontrolleres. For å beskrive en styrt prosess trengs en mer omfattende modell. Det kan vi oppnå ved å generalisere Markovbeskrivelsen. Anta at vi ved tidspunktene $n=0,1,2,\dots$ i en Markovkjede har mulighet for å fatte en beslutning som har innvirkning på kjedens videre utvikling. Anta at beslutningen bare har innvirkning på neste overgang. Vi får da overgangssannsynligheter $p_{ij}(a)$ som er avhengig av tilstanden vi forlater (i), tilstanden vi går til (j) og beslutningen (a) som ble fattet umiddelbart etter at vi kom til tilstand i , dvs. 1 tidsenhet tilbake i tiden. For at det skal ha noen hensikt å kontrollere prosessen må det foreligge kriterier for hva som er gode og dårlige prosessforløp, dvs. hva som er gode og dårlige

beslutninger. Anta derfor at prosessen påfører oss et forventet tap (kostnad) $C(i,a)$ når vi velger beslutning a i tilstand i . Det påbygget Markovmodellen nå har fått tilsvarende egenskapene til det som defineres som en Markov beslutningskjede. På tilsvarende måte kan vi ta utgangspunkt i en SemiMarkovprosess og innføre kontrollmuligheter ved hjelp av beslutninger analogt med det som nå er gjort for Markovkjeden.

Oppgaven handler om samspillet mellom beslutninger og risiko. At det er forbundet risiko med en aktivitet medfører at en modellbeskrivelse av aktiviteten ikke kan baseres bare på deterministiske variable. Det er vanlig å modellere risiko v.h.j.a. stokastiske variable hvor visse verdier av variablene representerer tap. Operasjoner som inngår i aktiviteten kan avbildes som tidsforløp av de stokastiske variablene. Det er derfor naturlig å beskrive operasjoner som stokastiske prosesser. At det er samspill mellom risiko og beslutninger betyr at det er mulig å styre operasjonene for å gjøre tapene minst mulig. Slik problemstillingen er presentert i kapittel 1, framgår det tydelig at den har svært mange kjennetegn som gjør at stokastiske beslutningsprosesser er et naturlig modelleringsverktøy. I dette kapitlet skal vi velge en egnet prosessbeskrivelse for modellekesempelet og formulere optimaliseringsproblemet.

I de neste to avsnittene skal vi oppsummere noen definisjoner og teoriresultater. Utvalget er svært begrenset og er gjort med henblikk på denne oppgavens spesielle teoribehov. Kilder til oppsummeringen er Howard /15/, Ross /16/ og Fredrikson /17/, men notasjonen er tilpasset anvendelsene her.

4.2. SemiMarkov beslutningsprosesser i diskret tid.

Prosesser i kontinuerlig tid adskiller seg ubetydelig fra prosesser i diskret tid når det gjelder matematisk definisjon. Her beskrives bare prosesser i diskret tid. I avsnitt 4.3. begrunnes hvorfor det er lite hensiktsmessig å bruke kontinuerlig tid i modellekesempelet.

La $\{X_t, t=0,1,2,\dots\}$ være en stokastisk prosess med endelig utfallsrom. Gitt at prosessen forandrer tilstand til i ved tidspunkt $t=t_1$, innføres følgende regler for overganger:

- 1) Umiddelbart etter tilstandsforandringen velges en beslutning a .
Overgang fra tilstand i til neste tilstand skjer da ved tidspunkt t_2 i henhold til de stasjonære overgangssannsynlighetene
$$P(X_{t_2}=j | X_{t_1}=i \cap a) = q_{ij}(a)$$
- 2) Tiden som går mellom de to overgangene, oppholdstid i tilstand i
 $T_{ij}(a) = t_2 - t_1$ har punktsannsynlighetene $P(T_{ij}(a)=t) = f_{ij}(t|a)$
for $t=0,1,2,\dots$.
- 3) Prosessens forløp medfører følgende (begrensede) kostnader:
 $C_1(i,a)$ = engangskostnad ved å velge beslutning a i tilstand i .
 $C_2(i,a)$ = kostnadsrate som påløper pr. tidsenhet etter å ha
valgt beslutning a i tilstand i .

Hvis $T_{ij} = t$ blir totale kostnader for oppholdet i tilstand i
 $C_1(i,a) + t \cdot C_2(i,a)$. Prosessen $\{X_t, t=0,1,2,\dots\}$ kalles en SemiMarkov
beslutningsprosess. En SemiMarkovprosess får vi som spesialtilfelle når
det i hver tilstand bare er én mulig beslutning.

Vi definerer en beslutningsregel som en funksjon a_t som på beslutningstids-
punkt t tilordner beslutningen $a_t(i)$ til tilstand i . En følge av
beslutningsregler kalles en plan (engelsk: policy). Planen sies å være
stasjonær hvis alle leddene i følgen $\{a_t, t=0,1,2,\dots\}$ er like. Når en
plan er stasjonær, er plan og beslutningsregel sammenfallende begreper.
At en plan er ikke-randomisert vil si at beslutningsreglene er deterministiske
funksjoner av tilstanden.

Proessen som er definert ovenfor har uendelig tidshorisont. Imidlertid
er det også nødvendig å kunne behandle prosesser med endelig tidshorisont.
Derfor vil vi videre skille mellom disse to tilfellene. Når prosessen
fortsetter i det uendelige (uendelig tidshorisont) vil forventede totale
kostnader vokse mot uendelig. Vi kan derfor ikke bruke totale kostnader
som optimalitetskriterium. De to hovedkriteriene baserer seg i dette
tilfellet på gjennomsnittskostnader og diskonterte kostnader. Hvis
framtidige kostnader diskonteres med diskonteringsfaktor $\alpha \in (0,1)$
er nåverdien av kostnaden C_t i tid t lik $\alpha^t C_t$. Optimal plan defineres
da som den plan som minimerer totale forventede diskonterte kostnader.
For modelleksempelen er det ikke naturlig å diskontere kostnader, slik

at dette kriteriet er uaktuelt og vil ikke bli omtalt nærmere. Derimot er kriteriet som bygger på gjennomsnittskostnader aktuelt. Optimal plan defineres som den plan som minimerer forventet gjennomsnittskostnad pr. tidsenhet over uendelig tidshorisont. En slik optimal plan vil ikke alltid eksistere. Ross /16/ viser at en tilstrekkelig betingelse for at en stasjonær optimal plan eksisterer er at tilstandsrommet er endelig og at vi får en irreduksibel SemiMarkovkjede når planen følges. Betingelsen er ikke nødvendig og en svakere, men fremdeles tilstrekkelig, betingelse er at det eksisterer minst én tilstand som kan nås fra alle andre tilstander, uansett hvilken stasjonær plan som følges. /11/s.149. Med én eller begge av disse betingelsene oppfylt har Ross også vist at den optimale plan vil være ikke-randomisert.

Vi kan nå finne denne planen v.hj.a. Lineær Programmering (LP). I det følgende skal vi formulere optimaliseringen av en SemiMarkov beslutningsprosess som et LP-problem. Forventet gjennomsnittskostnad pr. tidsenhet over uendelig tidshorisont er under disse forutsetningene lik forventet kostnad for et vilkårlig beslutningstidspunkt t når $t \rightarrow \infty$. Vi benytter følgende symboler i tillegg til de som tidligere er definert:

$$y_i(a) = \begin{cases} 1 & \text{hvis beslutning } a \text{ velges i tilstand } i \\ 0 & \text{ellers} \end{cases} \quad (4.2.)$$

$$q_i = \lim_{t \rightarrow \infty} P(X_t=i) \quad (4.3.)$$

$$C(i,a) = \text{forventet kostnad ved å være i tilstand } i \text{ og velge beslutning } a. \quad (4.4.)$$

Forventet kostnad for et vilkårlig beslutningstidspunkt t , når $t \rightarrow \infty$ er da:

$$K = \sum_i \sum_a [\text{kost. ved å være i tilst } i \text{ og velge besl. } a] \cdot P(\text{være i tilst. } i \text{ og velge besl. } a)$$

$$K = \sum_i \sum_a C(i,a)P(\text{velge besl. } a | \text{ er i tilst. } i)P(\text{være i tilst. } i)$$

$$K = \sum_i \sum_a C(i,a)y_i(a)q_i \quad (4.5.)$$

Gitt at vi er i tilstand i og velger beslutning a , så er forventet oppholdstid i tilstand i lik

$$\tau = \sum_j E(T_{ij}(a))q_{ij}(a) = \sum_j \sum_s s f_{ij}(s|a)q_{ij}(a) \quad (4.6.)$$

Da følger at

$$C(i,a) = C_1(i,a) + \tau C_2(i,a) \quad (4.7.)$$

q_i er avhengig av hvilke beslutninger som fattes (planavhengig) og må tilfredsstille likevektslikningene

$$\begin{aligned} q_i &= \sum_j q_j P(\text{gå fra tilst. } j \text{ til } i) \\ q_i &= \sum_j q_j \sum_a P(\text{gå fra tilst. } j \text{ til } i \mid \text{besl. } a \text{ velges i tilst. } j) \\ &\quad \cdot P(\text{besl. } a \text{ velges i tilst. } j) \\ q_i &= \sum_j q_j \sum_a q_{ji}(a) y_j(a) \quad \forall i \end{aligned} \quad (4.8.)$$

La $z_i(a) = q_i y_i(a)$. Vi antar at mulige beslutninger er avhengig av tilstanden. La A_i være mengden av tilgjengelige beslutninger i tilstand i . Da gjelder at $y_i(a) = 0$ for $a \notin A_i$. Dette kravet kan uttrykkes slik på LP-form:

$$\sum_{a \notin A_i} y_i(a) = 0 \iff \sum_{a \notin A_i} z_i(a) = 0 \quad (4.9.)$$

Av likningene (4.5.), (4.8.) og (4.9.) får vi at optimal plan er de $y_i(a)$ som er gitt av løsningen til dette lineære programmeringsproblemet:

$$\text{Min! } K = \sum_i \sum_a C(i,a) z_i(a) \quad (4.10)$$

under begrensningene

$$\sum_a z_i(a) = \sum_j \sum_a q_{ji}(a) z_j(a) \quad \forall i \quad (4.11)$$

$$\sum_{a \notin A_i} z_i(a) = 0 \quad \forall i$$

$$\sum_i \sum_a z_i(a) = 1 \quad (4.13)$$

$$z_i(a) \geq 0 \quad \forall i \quad (4.14.)$$

Når den optimale planen følges vil tilstandene generelt deles i flere klasser, én rekurrent og én eller flere transiente klasser. Betingelsen at det eksisterer en tilstand i den rekurrente klassen som kan nås fra alle andre tilstander sørger for at stasjonærsannsynligheter for å være i hver enkelt tilstand er veldefinerte. Stasjonærsannsynlighetene for de transiente tilstandene vil være null og beslutningsreglene i disse vil forbli ubestemte.

Likning (4.11.) sørger for at det blir tatt minst én beslutning i alle rekurrente tilstander. Teoremet som viser at optimal plan blir ikke-randomisert sørger for at én og bare én beslutning tas i hver rekurrent tilstand:

$$\sum_a y_i(a) = 1 \quad \forall i \quad (4.15)$$

Stasjonærsannsynlighetene er også variable under optimaliseringen, fordi de er planavhengige, og normeres v.hj.a. likning (4.13.):

$$\sum_i q_i = 1 \Leftrightarrow \sum_i q_i \sum_a y_i(a) = 1 \Leftrightarrow \sum_i \sum_a z_i(a) = 1 \quad (4.16)$$

Av løsningen $z_i^!(a)$ finner vi optimal plan $y_i^!(a)$:

$$y_i^!(a) = \frac{z_i^!(a)}{\sum_a z_i^!(a)} = \begin{cases} 1 & \text{for } z_i^!(a) > 0 \\ 0 & \text{ellers} \end{cases} \quad (4.17.)$$

Stasjonærsannsynlighetene er gitt ved

$$q_i = \sum_a z_i^!(a) \quad (4.18.)$$

LP er en metode som ikke er skreddersydd til beslutningsprosesser. Howard /15/ presenterer kort en metode som kalles "plan-iterasjon" som derimot er skreddersydd for denne spesielle typen optimaliseringsproblem. Den bygger på prinsipper som er analoge til Simplexalgoritmens. Simplexalgoritmen er den vanligste metoden til å løse LP-problemer. I denne oppgaven er det ikke sett nærmere på planiterasjon.

For tilfellet med endelig tidshorisont, som medfører tidsavhengige planer, er antall beslutningstrinn i en SemiMarkovbeslutningsprosess ikke veldefinert. Dette tilfellet behandles derfor bare for Markov beslutningsprosesser.

4.3. Markov beslutningsprosesser.

Vi bruker notasjon og formulering fra forrige avsnitt, med ett unntak; vi forutsetter at

$$f_{ij}(t|a) = \begin{cases} 1 & \text{hvis } t=1 \\ 0 & \text{ellers} \end{cases} \quad \forall i,j,a \quad (4.19)$$

Observasjon/beslutning foregår nå periodisk med periode 1 tidsenhet. Alle generelle betraktninger om SemiMarkovbeskrivelsen med endelig tidshorisont gjelder også nå. Også LP-formuleringen forblir uendret, men kostnadsfunksjonen blir enklere:

$$C(i,a) = C_1(i,a) + C_2(i,a) \quad (4.20.)$$

Det er nå ikke lenger behov for å dele $C(i,a)$ i to ledd.

Fordi tid mellom beslutninger nå er konstant (lik 1 tidsenhet) vil antall beslutninger være lik tidshorisonten (n_t). Det medfører at tilfellet med endelig tidshorisont er løsbart på en enkel måte, og det behandles i dette avsnittet. Totale kostnader blir nå endelige slik at det kan brukes som optimalitetskriterium. Optimal plan blir nå generelt ikke stasjonær, men tidsavhengig. La følgen d_k være gitt ved

$$d_k = \{a_k, a_{k+1}, \dots, a_{n_t}\} \\ d_k \in D_k \quad (4.21.)$$

D_k = mengden av alle mulige planer for trinn k og alle etterfølgende trinn.

d_k er med andre ord en plan for trinn k og alle etterfølgende trinn. Vi innfører også funksjonen g_k gitt ved

$g_k(i, d_k)$ = forventede totale kostnader for trinn k og alle etterfølgende trinn når planen d_k følges, gitt at vi er i tilstand i på trinn k . (4.22.)

$g_k(i, d_k)$ representerer altså for gitt tidspunkt, tilstand og plan summen av alle forventede, framtidige kostnader.

$$\text{La } g'_k(i) = \min_{d_k \in D_k} [g_k(i, d_k)] \quad \forall i \quad (4.23.)$$

Vi får minimum for planen d'_k . d'_k er optimal plan for trinn k og alle etterfølgende trinn. d'_0 er optimal plan for hele prosessen og totale forventede kostnader blir $g'_0(i)$ når denne planen følges. Det kan tenkes at prosessen ikke har noen entydig optimal plan. Det vil sjelden være noe problem i praksis; slike løsninger gir en viss handlefrihet. $g'_k(i)$ må tilfredsstillere rekurrenslikningene

$$g'_k(i) = \min_{a \in A_{ik}} [C(i, a) + \sum_j g'_{k+1}(j) q_{ij}(a)] \quad \forall i \quad (4.24.)$$

$$g'_{n_t}(i) = \min_{a \in A_{in_t}} [C(i, a)] \quad \forall i \quad (4.25.)$$

Rekurrenslikningene er analoge med tilfellet at vi har et deterministisk Dynamisk Programmeringsproblem. Se f.eks./26/. Vi har her tillatt at mulige beslutninger både kan avhenge av tilstanden i og beslutningstidspunkt k . Beslutningsmengdene kalles A_{ik} . Optimal plan kan nå finnes ved å løse likningene (4.24.) og (4.25.). Rekursjonen startes på trinn n_t .

Løsningsmetoden som er gitt ovenfor kalles Dynamisk Programmering (DP) og har den fordelen at den gir god forståelse for selve problemet og optimaliseringsprinsippet. DP-løsning krever at alle mulige planer sammenliknes. Det finnes ikke egnede programpakker for DP-løsning. Problemstrukturen er så generell at det er lite hensiktsmessig, også fordi DP-problemer ofte ikke er altfor vanskelige å programmere spesielt. Regnetid på datamaskin øker kraftig med problemets kompleksitet, noe som begrenser anvendelsene av DP. Mange DP-problemer kan imidlertid omformes til LP-problemer. I prinsipp kan et uendelig tidshorisontproblem løses som om vi hadde endelig tidshorisont og så la antall beslutningstrinn gå mot uendelig. Det som er sagt ovenfor om regnetid for DP-problemer gjør at en slik metode er svært ineffektiv.

4.4. Værprosessen som Markovkjede.

I kapittel 2. ble de viktigste værfaktorene beskrevet, hvorav vind og bølger var de to som ble valgt ut som værtilstander, og dermed beslutningsgrunnlag i modelleksempelet. Været er en prosess som forløper uten muligheter for kontroll ved beslutninger. Vi kan da velge mellom å bruke en Markov- eller en SemiMarkovprosess. Valget er ikke noe reelt valg, fordi tilgjengelige data, og i hvilken form de foreligger, tilsier at en Markovbeskrivelse må brukes. Meteorologisk Institutt (MI) i Oslo tilbød tidlig i arbeidet å stille databaser med værdata og datamaskintid til disposisjon. På denne måten hadde det vært mulig å bruke dataene til å modellere været etter eget behov. Imidlertid ville det arbeidet tatt en alt for stor del av totaltiden, fordi værdata bare er én av mange ingredienser i problemet. Alternativet var å benytte resultater fra arbeider som allerede var gjort. R. Fjørtoft ved MI har arbeidet mye med modellering av vind og bølger, men har bare basert seg på observasjonsintervaller på 6 timer eller mer. Langsiktige vurderinger og strategiske beslutninger krever ikke hyppige observasjoner, men beslutningstidspunkter med så stor avstand som 6 timer vil gi en svært grov modell av operasjonelle forhold. Den eneste muligheten som gjensto var å bruke noen resultater av Eidsvik /10/. Han har modellert vind og bølger som såkalte "n-te ordens Markovkjeder" for $n=2$ og $n=3$ med observasjonsintervall 3 timer og 3 tilstander. En n-te ordens Markovkjede er en stokastisk prosess som egentlig ikke har Markovegenskapen, men som etter en enkel omformulering likevel kan tolkes som en Markovkjede. Gitt den stokastiske prosessen $\{V_k, n=0,1,2,\dots\}$ med endelig utfallsrom. La U_k være følgen gitt ved

$$U_k = \{V_k, V_{k-1}, \dots, V_{k-n+1}\} \quad (4.26.)$$

U_k er kjedens historie for de n siste observasjonstidspunktene, når vi er i tidspunkt k. For hvert tidspunkt k eksisterer en tilsvarende U_k som er entydig gitt på samme måte som V_k er gitt. Anta så at denne forutsetningen er oppfylt:

$$P(V_{k+1}=j | U_k=u \cap V_{k-n}=y_{k-n} \cap \dots \cap V_0=y_0) = P(V_{k+1}=j | U_k=u) \quad (4.27.)$$

Prosessens hukommelse som omfatter de n siste trinn. Hvis U_k betraktes som en tilstandsvariabel, kan overgangssannsynligheter for V_n med hukommelse angis som for en Markovkjede. Prosessen $\{V_k, k=0,1,2,\dots\}$ med n-trinns hukommelse kalles en n-te ordens Markovkjede. Hvis overgangssannsynlighetene

er uavhengige av tiden k , har vi en stasjonær n -te ordens Markovkjede:

$$P(v_{k+1}=j | U_k=u) = p_{uj} \quad (4.28.)$$

Hvilken orden som er "best" i en gitt situasjon er avhengig av følgen av observasjoner som skal modelleres. For Polarfrontobservasjoner av vind og bølger har Eidsvik benyttet "Akaikes informasjonskriterium" (AIC) til å beregne optimal orden på 3-tilstands Markovkjeder. Han har bare delt året i to; sommer og vinter og utført optimaliseringen og estimert overgangssannsynligheter for hhv. sommer og vinter. Konklusjonen sier at for vind er orden 3 optimal både for sommer og vinter, mens for bølgehøyde er orden 3 optimal for vinter og orden 2 for sommer. Imidlertid er det for alle fire tilfellene svært liten forskjell på orden 2 og orden 3.

Ved å bruke orden 2 istedenfor orden 3 reduseres antall mulige overganger fra 81 til 27. Været skal være beslutningsgrunnlag for operasjonsprosessen og antall beslutningsregler vil også reduseres til en tredjedel. At værprosessen har 3 trinns hukommelse istedenfor 2 trinns gir ikke nok tilleggsinformasjon til å forsvare økningen i modellkompleksitet som det medfører. For modelleksempelet vil derfor utelukkende 2. ordens Markovkjeder være aktuelle.

Eidsvik har estimert overgangssannsynligheter for orden 3 unntatt for bølger/sommer som er estimert med orden 2. Når orden 3-sannsynligheter er gitt kan orden 2-sannsynligheter beregnes:

$$\text{La } p_{ijkl} = P(v_{k+1}=l | v_k=k \cap v_{k-1}=j \cap v_{k-2}=i)$$

$$s_{ijk} = P(v_{k+1}=k | v_k=j \cap v_{k-1}=i)$$

$$r_{ijk} = \lim_{k \rightarrow \infty} P(v_{k+1}=k \cap v_k=j \cap v_{k-1}=i)$$

Her er altså p_{ijkl} gitt og s_{ijk} skal beregnes. Ifølge multiplikasjonssetningen gjelder det at

$$s_{ijk} = \frac{r_{ijk}}{\sum_i r_{ijk}} \quad (4.28.)$$

r_{ijk} tilfredsstillende likevektslikningene:

$$r_{ijk} = \sum_u r_{uij} p_{uijk} \quad \forall i,j,k \quad (4.29.)$$

$$\sum_{i,j,k} r_{ijk} = 1$$

Likningene (4.29.) er et system med 27 likninger og 27 ukjente, og løsningen brukes til å beregne s_{ijk} v.h.j.a. likning (4.28.). Tabeller over overgangssannsynligheter for vind og bølger modellert som 3. ordens Markovkjeder er gjengitt i Vedlegg 1. Tilsvarende for orden 2 er også vist.

Hovedproblemet med værmodellering er at det er flere værfaktorer. For at problemformuleringen skal være enklestmulig er det en fordel at været kan representeres ved én tilstandsvariabel. Det kan vi oppnå enten ved å bruke én av værfaktorene eller flere værfaktorer slått sammen til én. Hvis det er svak eller ingen korrelasjon mellom værfaktorene må vi velge det siste, dvs. definere makrotilstander sammensatt av tilstander for de enkelte faktorene. Overgangssannsynligheter for makrotilstandene må så beregnes spesielt for de tilstandsdefinisjoner som da blir valgt. Å bruke bare én værfaktor, f.eks. bølgehøyde, kan gjøres hvis det er sterk korrelasjon med de andre værfaktorene, for modelleksempelet gjelder det da bare vind.

For å få en idé om korrelasjonen mellom vindstyrke og bølgehøyde har jeg tatt utgangspunkt i Potarfrontobservasjoner fra 1973-77 med 6 timers intervaller. Empirisk korrelasjonskoeffisient er beregnet for simultane observasjoner av bølgehøyder (i meter) og vindstyrker (i meter pr. sekund). Tabell 4.1. viser fem observasjonsgrupper som beregningene bygger på, antall observasjoner og beregnet empirisk korrelasjonskoeffisient.

Gruppe nr.	Observasjonsgruppe	Antall obs.	Empirisk korr.koeff.
1	5 sammenhengende døgn i juni, 1973-77	100	0.88
2	" " januar, "	100	0.72
3	" " jan.t.o.m.juni 1977	120	0.81
4	Hele januar 1977	120	0.88
5	Hele juni 1977	120	0.85

Tabell 4.1. Korrelasjon mellom bølgehøyder og vindstyrker.

Korrelasjonkoeffisienten er et mål for "tendens til linær sammenheng". Selv om det skulle gjelde tilnærmet at bølgehøyde = konstant · vindstyrke er det ikke klart hvordan konstanten skal tolkes. Konstanten varierer trolig fra måned til måned og fra år til år pga. bl.a. klimasvingninger. Når data fra flere perioder slås sammen vil det kunne bidra til å skjule eventuell god korrelasjon innenfor en begrenset periode. Liten verdi på korrelasjonskoeffisienten kan altså muligens skyldes variasjon i konstanten og ikke liten korrelasjon. En grundigere statistisk analyse enn den tabell 4.1. bygger på vil kunne klargjøre disse problemene. Korrelasjonskoeffisientene i tabell 4.1. er såpass høye at det er forsvarlig å beskrive værtilstanden med enten bølger eller vind, og vi har dermed bare én tilstandsvariabel til å beskrive været. Et slikt valg støttes også av det forhold at de to værfaktorene er grovt inndelt i 3 tilstander. Det er heller ikke mulig å nyttegjøre en mer nøyaktig værbeskrivelse i modellen av operasjonsprosessen.

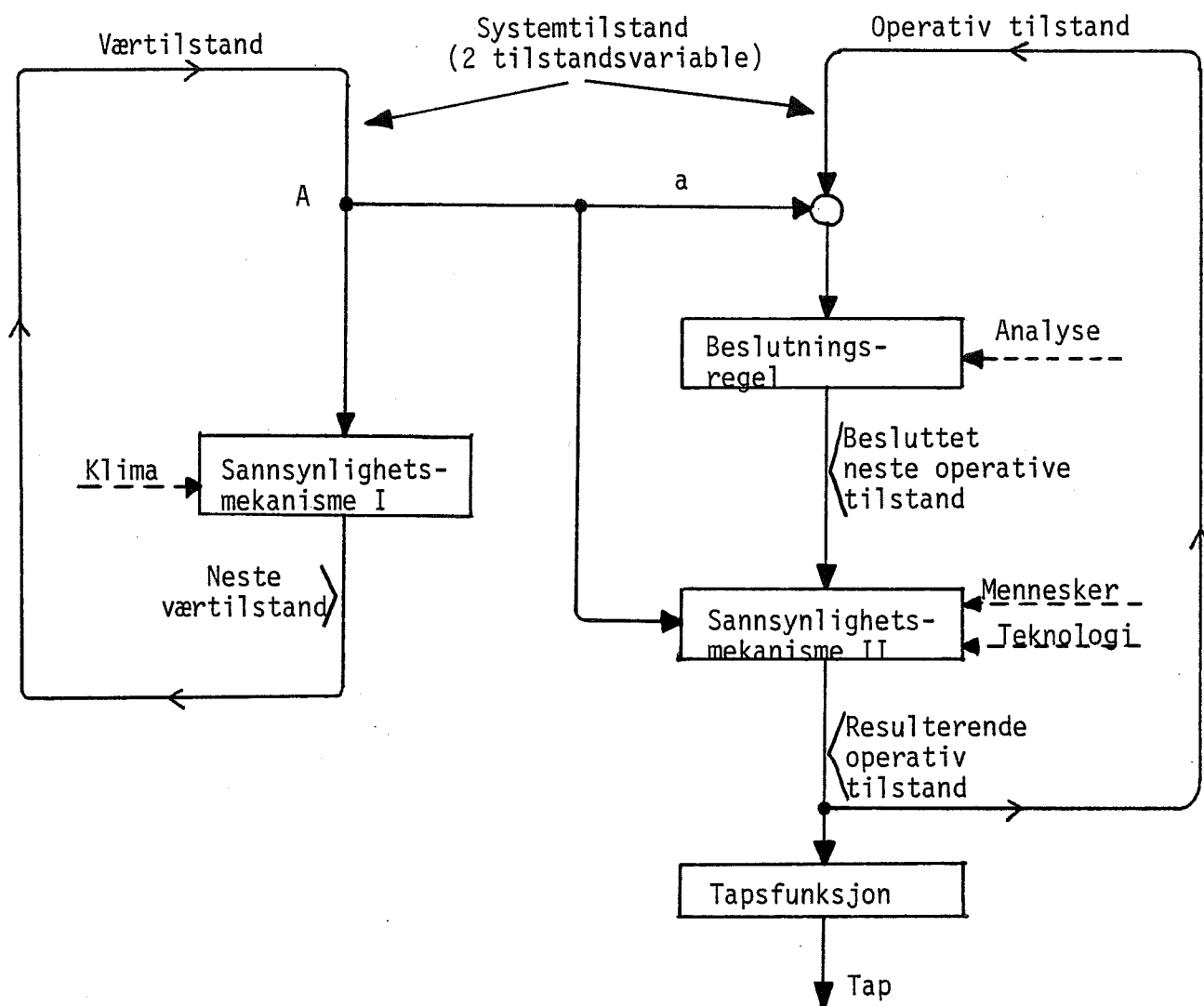
Det er rimelig å anta at unøyaktigheter i værdata har relativt liten innvirkning på selve optimaliseringen av beslutningene, men større innvirkning på virksomheten når de optimale beslutningsreglene følges i praksis. Det er ingen grunn til å tro at den inndelingen i værtilstanden som vi er tvunget til å bruke er den beste. Selv om bare en konkret anvendelse av dataene kan fortelle noe om det, vil det trolig være gunstigere med finere tilstandsinndeling i de dårligste værtilstandene. Men for at en god tilstandsinndeling skal kunne nyttegjøres fullt ut, må det også finnes væravhengige sannsynligheter for det tekniske systemet som samsvarer med denne inndelingen.

4.5. Modelleksempelen: To koblede stokastiske prosesser.

4.5.1. Operasjonsprosessen: Markov- eller SemiMarkovbeskrivelse?

For at været skal inngå som beslutningsgrunnlag må operasjonsprosessen modelleres slik at den er avhengig av værprosessen. Det er naturlig at denne koblingen skjer gjennom overgangssannsynlighetene for operasjonsprosessen. Beslutningssituasjoner som gjentar seg (operasjonelle) krever annerledes behandling enn engangsbeslutninger (strategiske). Operasjonelle beslutninger baseres på en vedvarende informasjonsflyt i motsetning til en informasjonspakke. For modelleksempelen er denne flyten representert

ved følgene av værtilstander og operative tilstander. En skisse av informasjonsflyten for modelleksempelen er vist i figur 4.1.



Figur 4.1. Informasjonsflyt for modelleksempelen.

Sannsynlighetsmekanisme I styrer værutviklingen i modelleksempelen og er et resultat av overordnede forhold som vi kaller klima. Sannsynlighetsmekanisme II styrer påliteligheten av platformsystemet. Mekanismen er avhengig av været, det tekniske utstyret og menneskene som betjener utstyret. En prosess uten kontrollmulighet ville mangle beslutningsregelboksen og forbindelsen a på figur 4.1. Været ville likevel påvirke prosessen gjennom sannsynlighetsmekanisme II. Informasjon (forbindelsen a) og beslutninger gir muligheter for å tilpasse prosessen etter været, "styre unna skjærene". Et mål for god tilpasning er tapene som følger av de operative tilstandene.

Dette kapitlet handler altså om hvordan vi skal finne beslutningsregler som gjør tapene minst mulig. Punkter på sløyfene i figur 4.1. kan tenkes som tidspunkter. Værsløyfen har f.eks. en periode på 3 timer og værtilstanden observeres i punktet A. Det første som må fastlegges for operasjonsprosessen er sløyfens periode; dvs. valg av Markov- eller SemiMarkovprosess, diskret eller kontinuerlig tid.

Beslutningene i en SemiMarkovprosess tas umiddelbart etter tilstands- overganger. Anta først at vi bruker kontinuerlig tid. Tid mellom tilstands- overganger i operasjonsprosessen (og dermed sløyfeperioden i figur 4.1.) er nå kontinuerlig fordelt. Fordi punktsannsynligheter i kontinuerlige fordelinger er null vil observasjonstidspunktene for de to prosessene aldri falle sammen. Den første forutsetningen vi da må gjøre er at vær- tilstanden mellom to værobservasjoner er den samme som ved den siste observasjonen som ble foretatt. Vi skal nå se hvilke betydelige vanskelig- heter en kontinuerlig tid-beskrivelse medfører.

La t = tidspunkt for siste værobservasjon

$t + \Delta t$ = tidspunkt for første tilstandsforandring i operasjons- prosessen etter t .

s = oppholdstid i operativ tilstand som vi gikk til ved tidspunkt $t + \Delta t$.

Det er nødvendig å kunne beregne sannsynlighetsfordelingen for værtilstand- en ved tidspunkt $t + \Delta t + s$. La $[a]$ betegne heltallsdelen til a . Vi må da beregne n -trinns overgangssannsynligheter for værprosessen, der $n = [(\Delta t + s - t)/3 \text{ timer}]$. Oppdatert Δt blir nå $\Delta t + s - (t+n)$. Vi ser at dette vil lede til svært uoversiktlige likninger med simultane overgangssannsynligheter for de to prosessene. For praktisk løsning av større optimaliseringsproblemer vil alle n -trinns overgangssannsynlighetene for alle væroverganger kreve stor huriglagerplass i datamaskinen eller forlenge regnetiden pga. lesing og skriving av filer. Dette forverres ytterligere når vi bruker høyere ordens Markovkjeder for værprosessen. Hvis vi har endelig tidshorisont må tiden diskretiseres uansett for at Dynamisk Programmering skal kunne brukes. SemiMarkovprosess i kontinuerlig tid er derfor en helt uegnet beskrivelse av operasjonsprosessen når værprosessen er en Markovkjede.

Ved å bruke SemiMarkovprosesser i diskret tid trenger vi fremdeles n -trinns overgangssannsynligheter for værprosessen. Alle prinsipielle vurderinger forblir uendret. Hvis alle mulige oppholdstider er hele multipla av tidsenheten for værprosessen blir beskrivelsen noen enklere, idet tilstandsforandringer i operasjonsprosessen alltid skjer samtidig med værprosessen. Det gjør at vi unngår å måtte ta vare på og oppdatere Δt . Konklusjonen er likevel at operasjonsprosessen bør modelleres som en Markov beslutningskjede (diskret tid). At en såpass enkel beskrivelse likevel er relativt fleksibel skal vises i neste avsnitt.

4.5.2. Tolkning av overgangssannsynligheter.

La overgangssannsynlighetene i operasjonsprosessen være $q_{ij}(a,v)$, der i er tilstanden vi kommer fra, j er tilstanden vi går til, a er beslutningen vi tar umiddelbart etter at vi kommer til tilstand i og v er værtilstanden. For gitt i, a og v er $q_{ij}(a,v)$ en sannsynlighetsfordeling for neste operative tilstand j , dvs. $\sum_j q_{ij}(a,v) = 1$. Prosessens utvikling 1 trinn framover beskrives fullstendig av $q_{ij}(a,v)$. Det er derfor grunn til å se nærmere på hva som ligger bak disse overgangssannsynlighetene. Først skal vi se på hvordan sannsynlighet for svikt, teknisk og menneskelig, kommer inn i overgangssannsynlighetene. Deretter blir det vist hvordan stokastiske oppholdstider kan modelleres innenfor rammen av en Markov-beskrivelse. Begge punktene beskrives med enkle eksempler.

Anta at operasjonsprosessen er i tilstand i . Det er flere mulige beslutninger, men vi ser bare på beslutningen å forbli i tilstand i . Vi kan tenke oss at tilstand i representerer en aktivitet hvor det er positive sannsynligheter for teknisk og menneskelig svikt som ufrivillig kan føre operasjonsprosessen over i tilstand j . La for gitt værtilstand

$$p_j = P(\text{teknisk eller menneskelig svikt i løpet 1 tidsenhet}) \quad (4.30.)$$

Begge typer svikt medfører overgang til operativ tilstand j . p_j kan f.eks. være biprodukt av en feiltreanalyse. Nesten alle sannsynligheter det er behov for i en risikoanalyse vil være sannsynlighet for en eller annen form for svikt. For å komme fram til overgangssannsynligheter av den typen som inngår i modelleksempelet må en derfor først kartlegge hvilke underliggende hendelser (svikt) som tilstandsovergangene bygger på.

På grunnlag av denne sviktstrukturen og sviktsannsynlighetene kan overgangssannsynlighetene beregnes. For eksempelet får vi at

$$q_{ij}(i,v) = p_j \quad (4.31.)$$

$$q_{ii}(i,v) = 1 - p_j$$

Hvis aktiviteten i tilstand i har flere feilmodi, brukes samme tenkemåte, men det må klargjøres hva som skjer når flere feilmodi opptrer samtidig. Anta at vi har 2 feilmodi, representert ved tilstandene j og k . Hendelsen at begge de to feilmodiene opptrer kan vi oppfatte på én av disse måtene:

- 1) Hendelsen har så alvorlige konsekvenser at den må representeres ved en egen modelltilstand (s). Da blir overgangssannsynlighetene:

$$q_{ij}(i,v) = p_j(1 - p_k)$$

$$q_{ik}(i,v) = p_k(1 - p_j)$$

$$q_{is}(i,v) = p_k p_j \quad (4.32.)$$

$$q_{ii}(i,v) = 1 - p_k - p_j + p_k p_j$$

- 2) Hendelsen er slik at feilmodus j dominerer feilmodus k . Det vil si at konsekvensen av hendelsen er den samme som konsekvensen av feilmodus j alene. Ingen ekstra modelltilstand er nødvendig. Overgangssannsynlighetene blir:

$$q_{ij}(i,v) = p_j$$

$$q_{ik}(i,v) = p_k(1 - p_j) \quad (4.33.)$$

$$q_{ii}(i,v) = 1 - p_j - p_k + p_j p_k$$

- 3) Hendelsen er neglisjerbar, det vil f.eks. si at produktet $p_j p_k$ (tap ved hendelsen) er mye mindre enn tilsvarende for hver enkelt feilmodus. Feilmodiene regnes derfor for å være disjunkte. Overgangssannsynlighetene blir:

$$\begin{aligned}q_{ij}(i,v) &= p_j \\q_{ik}(i,v) &= p_k \\q_{ii}(i,v) &= 1 - p_j - p_k\end{aligned}\tag{4.34.}$$

Når modelltilstander defineres vil det alltid være en avveining mellom grov tilstandsinndeling og komplisert sviktstruktur på den ene siden og fin tilstandsinndeling men enklere sviktstruktur på den andre. Med komplisert sviktstruktur menes her at mange tilstander og overganger er sammenfattet i én enkelt modelltilstand. Eksempelet med to feilmodi gir idéer om at sviktstrukturen kan bli ganske komplisert når antall feilmodi øker. Selv om vi strengt tatt bare har én feilmodus (f.eks. ukontrollert utblåsning), kan det være nødvendig å skille mellom flere konsekvenser (f.eks. ulike mengder utsluppet olje) for å kunne beregne forventet tap ved å være i modelltilstanden. Sviktstruktur er dermed betegnelsen på stokastiske trær med rot i modelltilstandene. Slike trær vil bli brukt til å beregne noen forventede kostnader for modelleksempelet i neste kapittel.

La oss gå tilbake til eksempelet med én feilmodus. Vi deler opp p_j i to ledd; ett for teknisk svikt og ett for menneskelig svikt. Sannsynlighet for teknisk svikt må normalt beregnes ved feiltreanalyse, men for hendelser på høyt nivå i systemet kan det være tilgjengelig statistikk å estimere sannsynligheter ut fra. Sannsynlighet for menneskelige feil er ofte vanskeligere å beregne. Menneskelige feil i platformsystemet kan igjen deles i to grupper:

- Annen beslutning enn den optimale tas, når den optimale beslutning forutsettes kjent.
- For gitt beslutning skjer utilstrekkelig/feil utførelse av enkelt-handlinger eller operasjoner.

For modelleksempelet blir ikke den første typen tatt i betraktning. Det er ingen formuleringsmessige problemer med å inkludere en slik feiltype i modellen, men det er diskutabelt om de skal ha betydning for valg av beslutninger. Å velge feil beslutning på tross av at beste beslutning forutsettes kjent bør imidlertid tas med ved beregning av risikoforhold når en gitt plan følges.

Betrakt fremdeles eksempelet med én feilmodus (j), men at beslutningen vi ser på er å gå til operativ tilstand r. Følgende positive sannsynligheter er gitt:

$$\begin{aligned}q_{ij}(r,v) &= p_j \\q_{ji}(r,v) &= p_i \\q_{ir}(r,v) &= 1 - p_j - p_i\end{aligned}\tag{4.35.}$$

Det er nå mulig å forbli flere tidsenheter i tilstand i. Punktsannsynlighetene for oppholdstid T i tilstand i, gitt at beslutningen hele tiden er r blir:

$$\begin{aligned}f_{ii}(t) &= P(T=t) = P(\text{forbli i tilst. i de } t-1 \text{ første trinn}) \\&\quad \cdot P(\text{overgang til tilst. r eller j på trinn } t) \\f_{ii}(t) &= p_i^{t-1}(1 - p_j - p_i + p_j) = (1 - p_i)p_i^{t-1}\end{aligned}\tag{4.36.}$$

$f_{ii}(t)$ er en geometrisk fordeling, som bare avhenger av p_i . Hendelsen som har sannsynligheten p_i har ennå ikke blitt spesifisert. Istedenfor å gi denne hendelsen et meningsfylt innhold kan vi bare utnytte det faktum at vi v.h.j.a. p_i har muligheten til å modellere stokastiske oppholdstider. Forventningen i fordelingen blir:

$$\begin{aligned}E(T) &= \sum_{t=1}^{\infty} t(1-p_i)p_i^{t-1} = (1-p_i) \sum_{t=1}^{\infty} \frac{d}{dp_i} p_i^t = (1-p_i) \frac{d}{dp_i} \left(\frac{p_i}{1-p_i} \right) \\E(T) &= \frac{1}{1-p_i}\end{aligned}\tag{4.37.}$$

At vi er tvunget til å bruke geometrisk fordeling er ingen alvorlig begrensning. Det er bare forventningen $E(T)$ som har betydning for valg av optimal plan, så lenge forventede kostnader brukes som optimalitetskriterium. Dette gjelder også ved bruk av plan-iterasjon. /15/. Med f.eks. $E(T)=100$ ($p_i=0.99$) varierer $f_{ii}(t)$ fra 10^{-2} til 10^{-3} når t går fra 1 til 230. $P(T=t)$ varierer altså relativt lite med t. For store p_i vil $f_{ii}(t)$ likne en uniform fordeling, fordi spredningen i fordelingen er stor. I praksis vil det ofte være slik at vi har et estimat for forventet oppholdstid og at vi vet at spredningen er stor. Modellens grovhet samsvarer derfor med datagrunnlaget på dette punktet.

Betraktningene omkring fordelingen til T gjelder sålenge beslutningen forblir uforandret. En tilstrekkelig, men ikke nødvendig, betingelse for det er at været forblir uforandret og at planen er stasjonær. Imidlertid kan vi for alle overganger konstruere tilsvarende oppholdstidsfordelinger. Vi har nå gjenvunnet noe av det tapte ved å ikke bruke en SemiMarkovbeskrivelse.

4.6. Modelleksempelen: Løsningsmetoder.

Vi bruker samme notasjon som tidligere i kapitlet, bortsett fra at operasjonsprosessens væravhengighet i tillegg kommer inn, som følge av koblingen mellom de to prosessene. Notasjonen blir oppsummert her.

1) Værprosessen: n-te ordens stasjonær Markovkjede med tidsenhet 3 timer.

n_v = antall værtilstander

n_u = antall mulige værutviklinger

$$n_u = n_v^n$$

V_k = værtilstand ved tidspunkt k

$$V_k = \{1, 2, 3, \dots, n_v\}$$

U_k = værutvikling for de n siste trinn fram t.o.m. trinn k

$$U_k = \{1, 2, 3, \dots, n_u\} \quad (U_k \text{ ble tidligere definert som en følge, mens heretter er } U_k \text{ nummeret til en følge, alle mulige følger er nummerert fra 1 til } n_u.)$$

$$p_{ur} = P(V_{k+1} = r \mid U_k = u)$$

$$p_u = \lim_{k \rightarrow \infty} P(U_k = u)$$

2) Operasjonsprosessens: Stasjonær Markov beslutningskjede med tidsenhet 3 timer.

n_x = antall operative tilstander

n_a = totalt antall beslutninger i modellen

X_k = operativ tilstand ved tidspunkt k

$$X_k = \{1, 2, 3, \dots, n_x\}$$

$$q_{ij}(a,v) = P(X_{k+1}=j \mid X_k=i \cap V_k=v \cap \text{beslutning } a \text{ tas ved tidspunkt } k)$$

$$q_j = \lim_{k \rightarrow \infty} P(X_k=i)$$

$K(i,j)$ = kostnad ved å være i operativ tilstand i og gå til j .
(eneste kostnadstype prosessen medfører)

$C(i,v,a)$ = forventet kostnad for ett trinn gitt at vi er i operativ tilstand i , værtilstand v og velger beslutning a .

Oljeboringssystemet og operasjonene som skal studeres er slik at vi kan gjøre beslutningsstrukturen svært enkel. Vi forutsetter at alle beslutninger er av typen:

$a_k(i,u) = j \iff$ Gitt at vi er i operativ tilstand i og værutvikling u , så beslutter vi at neste operative tilstand bør være j og tiltak for overgang til j settes i verk.

Beslutninger "er" altså tilstander, beslutningsmengden er en delmengde av tilstandsrommet. At vi sier at neste tilstand "bør være j " angir at utfallet av beslutningen ikke er sikkert, dvs. at $q_{ij}(a,v) > 0$ også for $j \neq a$.

Flere steder blir det behov for å se på overganger i værprosessen der vi går fra værutvikling $U_k=u$ til $U_{k+1}=w$. Det er klart at ikke alle kombinasjoner av u og w er mulig. For å gjøre formuleringen presis definerer vi en funksjon $\mu(u,v)$ gitt ved

Gitt at $U_k=u$ og $V_{k+1}=v$

Da er $U_{k+1} = \mu(u,v)$

(4.38.)

μ er altså en funksjon som oppdaterer prosessens historie. Overgang i værutvikling fra u til w er da bare mulig for de w som tilfredsstiller $w = \mu(u,v)$, der v er siste værtilstand.

I de likninger værutviklingen inngår lar vi værutviklingen erstatte værtilstanden også i de størrelsene som bare er avhengig av værtilstanden. Værtilstanden er entydig gitt av værutviklingen. Denne konvensjonen gjør skrivemåten litt upresis, men enklere. I beregningsprogrammene vil alle størrelser inngå i likningene ifølge definisjonene.

4.6.1. Endelig tidshorisont: Dynamisk Programmering.

Det er nødvendig med noen tillegssymboler:

n_t = antall beslutningstrinn (tidshorisont)

A_{ik} = mengden av mulige beslutninger på trinn k i operativ tilstand i .

a_k = beslutningsregel på trinn k . $a_k(i,u)$ er den beslutning som regelen a_k gir i operativ tilstand i og værutvikling u (systemtilstand (i,u)).

$d_k = \{a_k, a_{k+1}, \dots, a_{n_t}\} \quad d_k \in D_k$

D_k = mengden av alle mulige planer for trinn k og alle etterfølgende trinn.

$g_k(i,u,d_k)$ = totale forventede kostnader for trinn k og alle etterfølgende trinn, når systemtilstanden er (i,u) og planen d_k følges.

$g'_k(i,u) = \min_{d_k \in D_k} [g_k(i,u,d_k)]$ Minimum fås for planen d'_k .

Optimal plan for hele prosessen er d'_0 og vi får totale forventede kostnader lik $g'_0(i,u)$ når denne planen følges. $g'_k(i,u)$ må tilfredsstillere rekurrenslikningene:

$$g'_k(i,u) = \min_{a \in A_{ik}} \left[C(i,u,a) + \sum_{j=1}^{n_x} \sum_{v=1}^{n_y} g'_{k+1}(j, \mu(u,v)) q_{ij}(a,u) p_{uv} \right] \quad (4.39.)$$

$$g'_{n_t}(i,u) = \min_{a \in A_{in_t}} [C(i,u,a)]$$

I rekurrenslikningen minimaliseres en kostnadssum, hvor det første leddet er forventede kostnader for inneværende trinn og det andre leddet forventede kostnader for alle etterfølgende ledd. På grunn av modelleksempelet spesielle beslutningsstruktur blir $C(i,v,a)$ nå lik

$$C(i,v,a) = \sum_{j=1}^{n_x} K(i,j) q_{ij}(a,v) \quad (4.40.)$$

4.6.2. Uendeling tidshorisont: Lineær Programmering.

Det er praktisk å oppfatte de to koblede stokastiske prosessene

$\{U_k, k=0,1,2,\dots\}$ og $\{X_k, k=0,1,2,\dots\}$ som to prosesser ved LP-formuleringen. Men for å kunne bruke optimalitetskriteriet som ble angitt i avsnitt 4.2. må vi først vise at de to prosessene kan slås sammen til en Markov beslutningskjede. Dette beviset er trivielt; fordi både værprosessen og operasjonsprosessen har hukommelse bare 1 tidshenhet tilbake vil den sammenslåtte prosessen $\{(U_k, X_k), k=0,1,2,3,\dots\}$ også ha Markovegenskapen. Beslutnings- og kostnadsstrukturen er den samme for den sammenslåtte prosessen som for operasjonsprosessen. Kravet om at det må eksistere en tilstand som kan nås fra alle andre tilstander for alle stasjonære planer er oppfylt for den sammenslåtte prosessen hvis og bare hvis den er oppfylt for operasjonsprosessen alene.

La som før A_i være mengden av tilgjengelige beslutninger i operativ tilstand i . La $y_{iu}(a)$ være definert slik:

$$y_{iu}(a) = \begin{cases} 1 & \text{hvis beslutning } a \text{ skal velges i systemtilstand } (i,u) \\ 0 & \text{ellers} \end{cases} \quad (4.41)$$

$$\sum_{a=1}^{n_a} y_{iu}(a) = 1$$

$y_{iu}(a)$, $\forall i,u$ representerer en stasjonær plan. Når planen følges er det bare én mulig beslutning i hver systemtilstand, den a som gjør $y_{iu}(a)=1$. Gitt at en optimal, stasjonær plan eksisterer, minimeres forventet kostnad K for et vilkårlig beslutningstrinn t , når $t \rightarrow \infty$ når denne planen følges. K er gitt ved

$$K = \sum_{i,u,a} \left[\begin{array}{l} \text{Kostnad ved å være i syst.} \\ \text{tilst. } (i,u) \text{ og velge besl. } a \end{array} \right] \cdot P \left(\begin{array}{l} \text{Være i syst.tilst. } (i,u) \\ \text{og velge besl. } a \end{array} \right)$$

$$K = \sum_{i,u,a} C(i,u,a) P(\text{velge besl. } a \mid \text{er i syst.tilst. } (i,u)) P \left(\begin{array}{l} \text{Være i syst.} \\ \text{tilst. } (i,u) \end{array} \right)$$

$$K = \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{u=1}^{n_u} \sum_{a \in A_i} C(i,u,a) y_{iu}(a) q_i p_u \quad (4.42.)$$

K kalles målfunksjonen. Kostnaden prosessen medfører for ett trinn er bare avhengig av hvilken operativ tilstand vi er i og hvilken vi går til. Hvilken tilstand vi går til er avhengig av tilstanden vi er i, hvordan

været er og hvilken beslutning som tas. Forventet kostnad for trinnet når disse tre størrelsene er gitt er:

$$C(i,u,a) = \sum_{j=1}^{n_x} K(i,j) q_{ij}(a,v) \quad (4.43.)$$

p_u kan regnes ut fra overgangssannsynlighetene for værprosessen ved hjelp av likningene

$$p_u = \sum_{j=1}^{n_v} p_w p_{wj} \quad u = \mu(w,j) \quad \forall u \quad (4.44.)$$

$$\sum_{u=1}^{n_u} p_u = 1$$

q_i er planavhengig og er bestemt av likevektslikningene for systemtilstanden; simultan operativ tilstand og værutvikling:

$$q_i p_u = \sum_{j,w} q_j p_w P(\text{gå fra syst.tilst. (j,w) til (i,u)})$$

$$q_i p_u = \sum_{j,w} q_j p_w \sum_a P(\text{gå fra syst.tilst. (j,w) til (i,u)} | \text{besl.a i (j,w)}) \cdot P(\text{velge besl.a i (j,w)})$$

$$q_i p_u = \sum_{j=1}^{n_x} \sum_{w;u=\mu(w,k)} q_j p_w \sum_{a \in A_i} q_{ji}(a,w) p_{wk} y_{jw}(a) \quad (4.45.)$$

La $z_{iu}(a) = q_i p_u y_{iu}(a)$. $y_{iu}(a) = z_{iu}(a) = 0$ for $a \notin A_i$. For LP-løsning er det upraktisk å ha begrensninger på variable i uttrykket for målfunksjonen (K). Vi lar alle summer hvor a varierer løpe fra 1 til n_a og innfører en tilleggsbegrensning som sørger for at bare mulige beslutninger tas:

$$\sum_{a \notin A_i} z_{iu}(a) = 0 \quad (4.46.)$$

At w i likning (4.45.) ikke kan anta verdier slik at $u \neq \mu(w,k)$ betyr at for slike w er $p_{wk} = 0$ for akkurat dette trinnet. Av likningene (4.42.), (4.45.) og (4.46.) får nå følgende LP-problem:

$$\text{Min! } K = \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{u=1}^{n_u} \sum_{a=1}^{n_s} C(i,u,a) z_{iu}(a) \quad (4.47.)$$

under begrensningene:

$$\sum_{a=1}^{n_a} z_{iu}(a) = \sum_{j=1}^{n_x} \sum_{w; u=\mu(w,k)} z_{jw}(a) q_{ji}(a,w) p_{wk}, \quad \forall i,u \quad (4.48.)$$

$$\sum_{a \notin A_i} z_{iu}(a) = 0 \quad \forall i,u \quad (4.49.)$$

$$\sum_{i=1}^{n_x} \sum_{u=1}^{n_u} \sum_{a=1}^{n_a} z_{iu}(a) = 1 \quad (4.50.)$$

$$z_{iu}(a) \geq 0 \quad \forall i,u \quad (4.51.)$$

Ifølge definisjonen av $z_{iu}(a)$ gjelder at

$$q_i = \sum_{u=1}^{n_u} \sum_{a=1}^{n_a} z_{iu}(a) \quad \text{og} \quad p_u = \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{a=1}^{n_a} z_{iu}(a) \quad (4.52.)$$

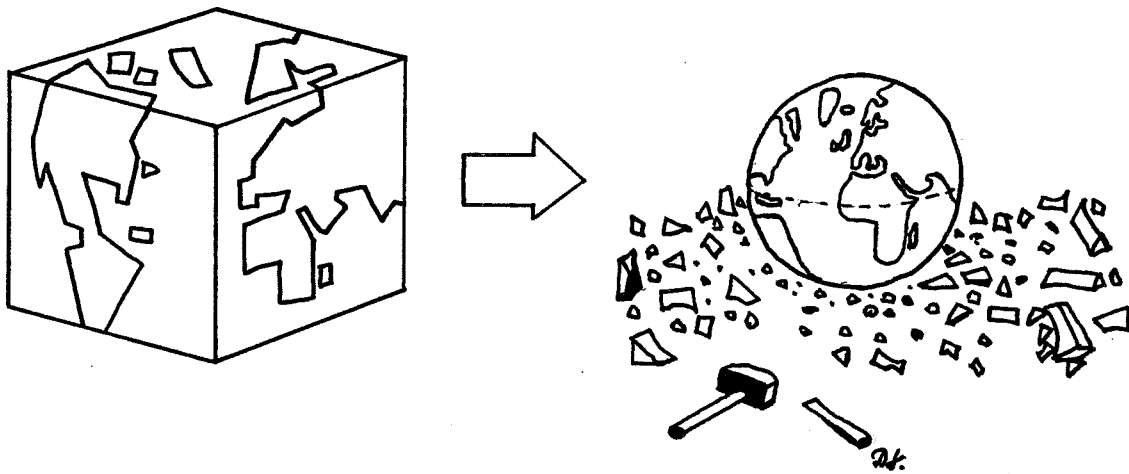
Av løsningen til LP-problemet, $z'_{iu}(a)$, finner vi optimal plan:

$$y'_{iu}(a) = \frac{z'_{iu}(a)}{q_i p_u} = \begin{cases} 1 & \text{for } z'_{iu}(a) > 0 \\ 0 & \text{for } z'_{iu}(a) = 0 \end{cases} \quad (4.53.)$$

Som vi ser er det faktisk ikke nødvendig å beregne p_u på forhånd. p_u og q_i kommer ut som biprodukter av LP-løsningen.

Likning (4.48.) og teoremet om ikke-randomisert optimal plan sørger for at $\sum_a y_{iu}(a) = 1$ for alle i,u som inngår i planen. Det vil si at én og bare én beslutning skal tas i systemtilstand (i,u) . q_i og dermed $z_{iu}(a)$ blir null for alle i som ikke inngår i planen. Normeringslikningen (4.50.) sørger for at $\sum_i q_i = 1$.

5. TILSTANDSDEFINISJONER OG INNHENTING/BEARBEIDING AV MODELLDATA,



- Med et tilstrekkelig antall modifikasjoner vil enhver teori kunne tilpasses allslags fakta.

(Schumpeters lov)

5. TILSTANDSDEFINISJONER OG INNHENTING/BEARBEIDING AV MODELLDATA.

I kapittel 4. ble modellens rammeverk konstruert. Framstillingen var løsningsorientert og valget av teoretisk beskrivelse ble gjort med forventning om at den både er fleksibel og velegnet for analyse. I dette kapitlet skal vi definere tilstander og beregne størrelser slik rammeverket krever for modelleksempelet.

I innledningen ble oppgaven tolket som en "problemorientert metodeutprøving". Det generelle problemet ble beskrevet i kapittel 1., metoden i kapittel 4. og i dette kapitlet skal vi beskrive en del av problemet, som metoden skal utprøves på i kapittel 6. Vi skal se på en avgrenset del av leteboringsaktiviteten. Det er viktig å understreke at avgrensningen og forutsetningene er så betydelige at resultatene ikke kan ha noen særlig praktisk verdi utover det å avdekke egenskaper ved modell og metode.

Kostnader og sannsynligheter som inngår i modellen er meget usikre. Derfor kan det virke unødvendig å ta med i rapporten hvordan disse er beregnet. Men usikre tall og fornuftige gjetninger er og blir en uungåelig del av analyser av denne typen. Selve tankegangen som frambringer tallstørrelser der det tilsynelatende er stor datamangel er derfor interessant. Jeg anser det som viktig at dette kommer med i rapporten, slik at det for andre blir letter å påpeke feil og sviktende forutsetninger.

5.1. Hovedprinsipp for analyse av sammensatte aktiviteter: Faseinndeling.

Aktiviteter som er så omfattende som offshore leteboring etter olje består av mange delaktiviteter eller faser. En fullstendig beslutningsanalyse vil måtte omfatte både beslutninger innen hver enkelt fase og beslutninger om å gå fra en fase til en annen. Analysen ville kreve et stort antall variable som beslutningsgrunnlag, og det å finne optimale beslutningsregler vil måtte gjøres for hele aktiviteten sett under ett. Denne oppgaven ser bare på operativ tilstand og værtilstand som beslutningsgrunnlag. I enhver operativ tilstand vil det i modellen da bare være mulig å gå til operative tilstander som kan nås v.h.j.a. værbetingede operasjonelle beslutninger eller ulykker. Den totale aktiviteten er med dette delt inn i et visst antall ikkekommuniserende klasser av tilstander. Det er nå naturlig å kalle hver klasse en fase. Jo færre beslutningsvariable desto flere faser må aktiviteten deles opp i. Det første skritt ved modellering av leteboringsaktiviteten er

derfor å identifisere faseinndelingen som samsvarer med beslutningsgrunnlaget oppgaven forutsetter. En vanlig inndeling i delaktiviteter er gitt av Danforth /18/:

- 1) Rotasjon
- 2) Trekking av borestreng
- 3) Setting av foringsrør
- 4) Brønnmålinger
- 5) Behandling av sikringsventil og marin returledning
- 6) Fortøyning og ankerbehandling
- 7) Reparasjoner
- 8) Andre

Delaktivitetene er nummerert etter omtrentlig andel av tiden vi holder på med hver delaktivitet. For modelleksempelet skal vi bare se på én fase, som vi kan kalle "boring". Den omfatter delaktivitetene 1,2,5,(6). Flere av disse delaktivitetene pågår også i andre sammenhenger og kan derfor inngå i flere faser.

Følgende definisjon av fase er nyttig for denne oppgaven, og oppsummerer betraktningene som er gjort ovenfor: En fase er en tilstandsklasse som omfatter alle tilstander som kommuniserer v.h.j.a. værbetingede operasjonelle beslutninger eller ulykker. Alle fasene er lukkede klasser. Borefasen er den viktigste fasen; den representerer selve hensikten med aktiviteten og utgjør den største andelen av tiden. Borefasen er den eneste fasen som vil bli modellert for å prøve optimaliseringsmetoden. Med så få tilstandsvariable som vi har må beslutningsreglene vi søker være tidsuavhengige. Vi har ingen variable til å fange opp forhold som tilsier at værbetingede beslutninger bør endres med tiden. Optimaliseringen vil derfor bli formulert som et LP-problem. Noe praktisk eksempel på DP-optimalisering er ikke foretatt i denne oppgaven.

5.2. Definisjon av tilstander i borefasen.

Hensikten med borefasen ligger i navnet; å gjøre brønnen dypere, dvs. komme nærmere et eventuelt reservoar. Borefasen pågår helt fra boringen starter til brønnen er ferdig, men den avbrytes mange ganger underveis av andre faser, f.eks. setting av foringsrør. Mange forhold forandrer seg mye i løpet av tiden brønnen bores, slik at "boring" ikke representerer et

veldefinert verdsett på alle tilstandsvariable. Fordi modelleksempelen bare har to tilstandsvariable må vi forutsette at alle andre relevante tilstandsvariable har "gjennomsnittsverdier". Med gjennomsnittsverdier menes her tilstander som er typiske for de forhold tilgjengelig statistikk gjelder for. For denne oppgaven er det uvesentlig hvilke verdier størrelser som ikke inngår eksplisitt i modellen har. Grunnen til det er forutsetningen om at modellens og optimaliseringsmetodens egenskaper kan avsløres uten en detaljert analyse.

Begrepet "tilstand" blir brukt i dagligtale, men brukes i denne rapporten som et matematisk begrep fra teorien om stokastiske prosesser. Hvs slags virkelige fenomener lar vi inngå i tilstandsbegrepet slik det er brukt i kapittel 4? For leteboringsaktiviteten er hensikten med å definere operative tilstander å kunne ta øyeblikksbilder av systemet. Vi ønsker bilder av systemet for å kunne ta beslutninger. Alle øyeblikksbildene vil i modellen være statiske, uansett om de virkeligheten avbilder aktivitet eller ikke-aktivitet. Modelltilstandene vil derfor måtte omfatte operasjoner, stillstand og konsekvenser. Det finnes et stort antall muligheter når det gjelder tilstandsdefinisjoner. For modelleksempelen må minst ett av følgende to kriterier være oppfylt for at en tilstand er interessant å ha med eksplisitt:

- 1) I tilstanden er det aktuelt og mulig å fatte en beslutning på grunnlag av den operative tilstanden selv og været.
- 2) Tilstanden representerer en konsekvens (kostnad) som har betydning for beslutninger som tas i andre tilstander.

I tillegg må det enten foreligge statistikk slik at nødvendige kostnader og sannsynligheter kan estimeres, eller det må være mulig å gjøre rimelige antagelser om disse. Potensielle tilstander som ikke oppfyller disse kriteriene vil inngå implisitt i andre tilstander.

Under arbeidet med oppgaven tok det lang tid før det var klart hva som det var fornuftig å legge i tilstandsbegrepet og kriteriene for valg av tilstander. Det er vanskelig å gjengi i rapporten resonnementene som ledet til den endelige modelldefinisjon. Men den viktigste erfaringen i denne sammenhengen er at det er viktig å starte med tilstandsbegrepet, å fastlegge innhold og å finne grunnleggende definisjonskriterier.

Modelleksempelen bygger på 9 operative tilstander og det er naturlig å dele borefasen i 3 underklasser av tilstander:

- 1) Rotasjonstilstanden (den tilstand vi ideelt sett skulle være i hele borefasen).
- 2) Ulykkestilstander (tilstander som vi ufrivillig går til som følge av uønskede hendelser).
- 3) Defensive tilstander (tilstander som vi går til v.h.j.a. beslutninger for å redusere sannsynligheten for å komme til ulykkestilstandene).

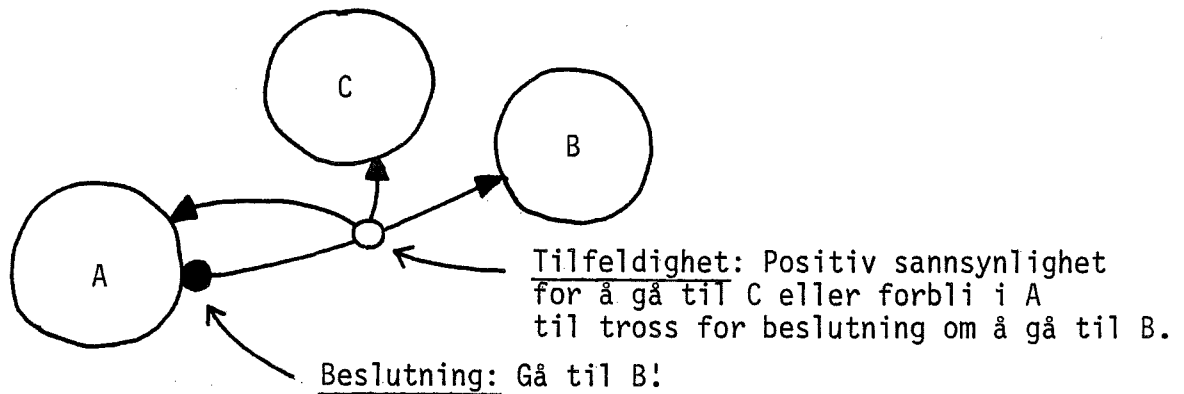
De defensive tilstandene omfatter:

<u>Tilstandsnr.:</u>	<u>Tilstandsnavn:</u>	<u>Beskrivelse:</u>
2	venting	Rotasjon stanset, klar til å trekke opp borestreng og marin returledning.
3	trekk-bor	Borestrengen trekkes ut av brønnen.
4	overlevelse	Alle operasjoner stanset, platformen i "overlevelse"-dypgående, borestreng og marin returledning trukket opp.
5	forlatt borested	Koblet fra brønnen og flyttet unna, i tilfelle utblåsning.
6	klippet borestreng	Nødtiltak for å komme rakst unna borested.

Ulykkestilstandene omfatter:

7	bor-fast	Boret har satt seg fast i brønnen. Svært sårbar hvis tilbakeslag inntreffer.
8	platformskade	Strukturell skade på skrog eller andre platformdeler.
9	utblåsning	Konsekvens av tilbakeslag som ikke ble bragt under kontroll.

Til grafiske tilstandsdiagrammer brukes symbolikken som er vist i figur 5.1. Store sirkler representerer tilstander. Små, svarte sirkler er beslutningsnoder, mens små, hvite sirkler er tilfeldighetsnoder. Retningen ut av en tilfeldighetsnode er bestemt av en sannsynlighetsfordeling. Pilen som går fra en beslutningsnode, rett gjennom en tilfeldighetsnode til en tilstand, angir at beslutning om å gå til denne tilstanden er tatt.

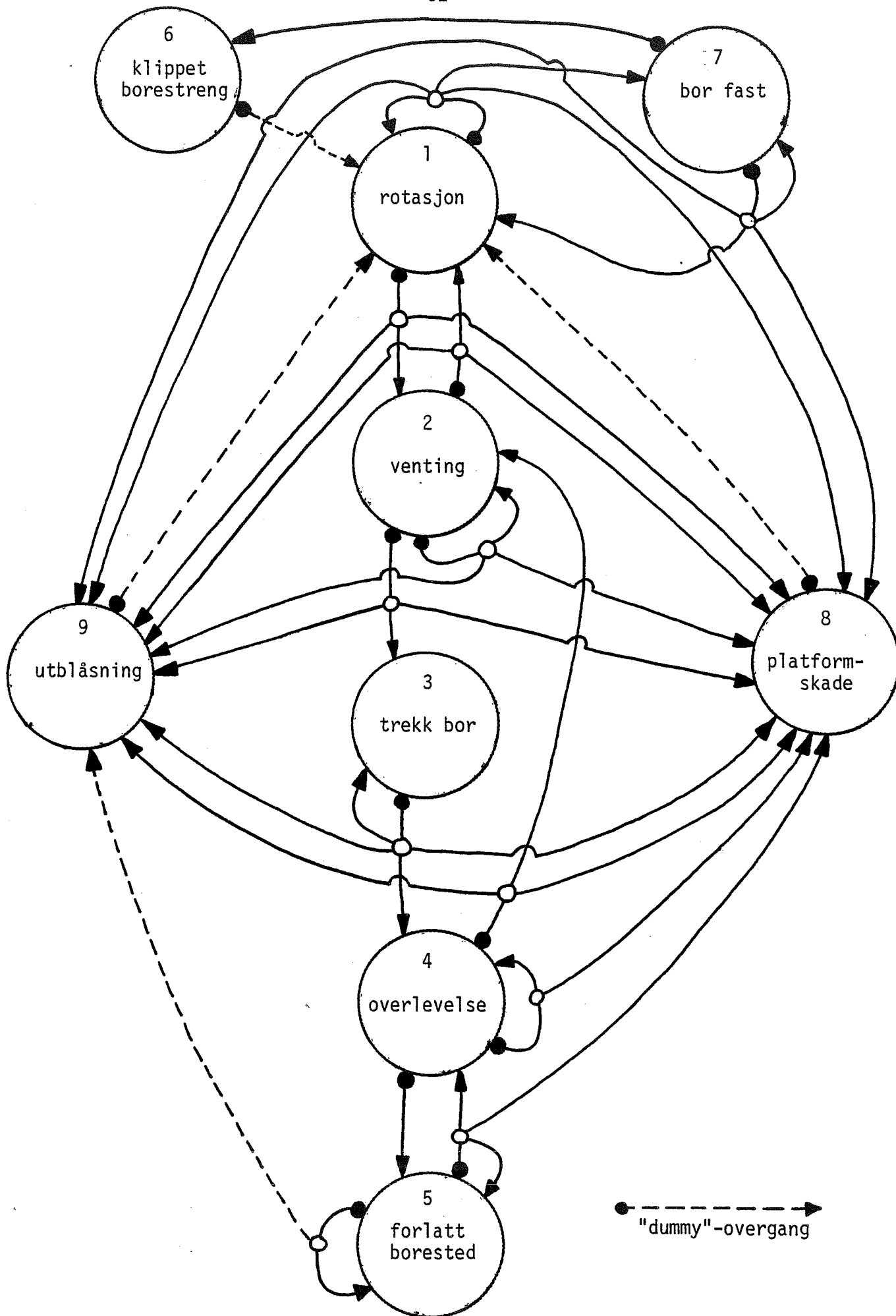


Figur 5.1. Symboler i tilstandsdiagrammer.

Ved hjelp av symboler fra figur 5.1. kan vi definere sammenhenger (overganger og beslutninger) mellom de 9 operative tilstandene i borefasen. Dette er vist i tilstandsdiagrammet figur 5.2. Tilstandene er nummerert slik at delmengden $\{1,2,3,4,5,6\}$ samtidig representerer hele beslutningsmengden. Tilstandene "klippet borestreng"(6), "platformskade"(8) og "utblåsning"(9) er så alvorlige og medfører så store kostnader at det ville være naturlig å la dem være absorberende tilstander. Optimalitetskriteriet som ble referert i avsnitt 4.2. gjør imidlertid dette umulig. Isteden lager vi "dummy"-overganger til tilstand 1 fra disse tilstandene.

5.3. Om overgangssannsynlighetenes avhengighet av været.

Komponenters sviktintensitet er sterkt miljøavhengig. For elektroniske komponenter kan den variere over 2-3 størrelsesordener når ytre forhold går fra svært gode ("air conditioned digital computer") til svært dårlige ("rocket launch"). /19/. Menneskets tendens til å handle feil er også miljøavhengig. Som regel vil stressnivået øke med vanskeligere miljøforhold og dermed øker også feilsannsynlighetene. For de fleste komplekse systemer vil menneskelige feil dominere over teknisk svikt. /5/. Miljøvariasjonene



Figur 5.2. Tilstandsdiagram for modelleksempelen.

på en oljeboringsplattform betyr lite for mye av det tekniske utstyret, sammenliknet med den store forskjellen det er mellom gode og dårlige forhold i eksempelet ovenfor. Dette gjelder naturligvis ikke for utstyr hvis viktigste sviktårsak nettopp er miljøbelastning. For mennesker representerer forskjellen mellom f.eks. stille, pent sommervær og vinterstorm nærmest ytterpunkter når det gjelder stressnivå. Disse betraktningene motiverer følgende forutsetninger for modelleksempelet:

- Sviktsannsynligheter for utstyr hvis viktigste sviktårsak ikke er dårlig vær, antas uavhengig av værtilstanden.
- Sviktsannsynligheter for utstyr hvis viktigste sviktårsak er dårlig vær, er avhengige av værtilstanden. Hvor presist avhengig kan angis er bestemt av tilgjengelig statistikk. Det behandles i avsnitt 5.6.
- Menneskelige feilsannsynligheter er væravhengige og avhengigheten antas å være som angitt i resten av dette avsnittet.

Å vurdere hvordan sannsynligheten for menneskelige feil avhenger av været er svært vanskelig, både teoretisk og praktisk. Det krever også innsikt i andre fagfelt som adferdsvitenskapene og ergonomi. For modelleksempelet vil framstillingen til Bercha & Ass. Ltd. (1978) bli brukt. Rapporten /5/ gir en svært tynn bakgrunn og begrunnelse for sin modellering. Den brukes likevel her, først og fremst fordi den nærmest er ideell for formuleringen av denne oppgaven. Dessuten er usikkerheten i dataene, før væravhengigheten tas i betraktning, så stor at nytten av en mer avansert sviktmodell for mennesker ville være liten.

Prinsippet for væravhengigheten er at feilsannsynlighet i værtilstand i er produktet av feilsannsynlighet i værtilstand 1 (ideelle forhold) og en miljøbelastningsfaktor $MBF(i)$. $MBF(i)$ er "kalibrert" slik at en feilsannsynlighet så stor som 0.2 under ideelle forhold blir ~ 1.0 i dårligste værtilstand. Bercha gir en liste over feilsannsynligheter for en rekke enkelthandlinger og 0.2 er her en øvre grense for menneskelig feilsannsynlighet under ideelle forhold. De 3 værtilstandene som analysen til Bercha bruker tilsvarer omtrent værtilstandene i denne rapporten. Berchas analyse bruker forskjellig MBF for boreskip og "artificial island"-plattformer, men forskjellene er ubetydelige i forhold til datausikkerheten. Boreskip har mest til felles med halvt nedsenkbare plattformer og for modelleksempelet vil disse MBF bli brukt:

$$\begin{aligned} \text{MBF}(1) &= 1 \\ \text{MBF}(2) &= 2 \\ \text{MBF}(3) &= 5 \end{aligned} \tag{5.1.}$$

MBF-faktoren forutsetter at alle sannsynligheter er mindre enn 0.2. MBF kommer både inn ved beslutninger som er eksplisitte i modellen og ved hendelser og beslutninger som er skjult i sammenslåtte hendelseskjeder.

a_i = andelen av året vi er i værtilstand i . Gjennomsnittlig MBF er da

$$\overline{\text{MBF}} = \sum_{i=1}^3 \text{MBF}(i) a_i \tag{5.2.}$$

For modelleksempelen (hvor $a_1=0.35$, $a_2=0.5$ og $a_3=0.15$) er $\overline{\text{MBF}} = 3$. Hvis vi regner som om $\text{MBF}(2) = \overline{\text{MBF}}$, blir bruk av MBF-faktoren svært enkel. Et eksempel:

En sannsynlighet p_m for en type menneskelig feil er estimert på grunnlag av statistikk som ikke skiller mellom ulike værtilstander. Vi søker sannsynlighetene

$$p_m(i) = P(\text{menneskelig feil} \mid \text{er i værtilstand } i) \tag{5.3.}$$

Fordi $p_m = p_m(1) \cdot \overline{\text{MBF}}$ og $\overline{\text{MBF}} = \text{MBF}(2)$ blir

$$\begin{aligned} p_m(1) &= 0.5 p_m \\ p_m(2) &= p_m \\ p_m(3) &= 2.5 p_m \end{aligned} \tag{5.4.}$$

Prinsippet for bruk av MBF er altså at ulykkesstatistikker og feiltreberegninger, som ikke skiller mellom værtilstander, er representative for værtilstand 2.

5.4. Skalering av sannsynligheter.

Alle overgangssannsynligheter i operasjonsprosessen er sannsynligheter for at hendelser inntreffer i løpet av 3 timer (1 tidsenhet). For enkelhets skyld kan vi si at sannsynlighetene har skalering 1 tidsenhet. Tidsenheten og operative tilstander er definert spesielt for modelleksempelen, og derfor foreligger ingen overgangssannsynligheter slik vi trenger dem.

Dette avsnittet presenterer en metode til å omregne sannsynligheter for beslektede hendelser til den form modelleksempelen krever. Omregningen vil bestå i å betrakte samme type hendelse under forskjellig tidshorisont og litt forskjellige betingelser. Omregningen er hovedsaklig en tidskalering av sannsynligheter.

Anta at en aktivitet pågår i en periode t_a . Aktiviteten består av n_f faser og den relative andel av totaltiden t_a vi er i fase i er kjent. I flere av fasene kan en uønsket hendelse (UH) inntreffe.

$$\text{La } p(t) = P(\text{UH inntreffer i tidsintervallet } (0,t)) \quad (5.5.)$$

Vi ønsker å finne sannsynligheten for at UH inntreffer i løpet av 3 timer, gitt at vi er i fase i . Til dette bruker vi en enkel modell; en Markov-prosess i kontinuerlig tid. La tilstandene $\{1,2,3,\dots,n_f\}$ representere de ulike fasene og tilstand 0 at UH har inntruffet. Fra tilstand i til tilstand 0 er overgangsraten λ_i , dvs. at

$$\begin{aligned} p_i(\Delta t) &= P(\text{UH inntreffer i tidsintervallet } (t,t+\Delta t) \mid \text{er i fase } i \text{ i } t) \\ p_i(\Delta t) &= \lambda_i \Delta t + o(\Delta t) \end{aligned} \quad (5.6.)$$

Det vi søker er altså $p_i(\Delta t)$ og for å finne $p_i(\Delta t)$ må vi finne λ_i . Selv om λ_i -ene er ukjente, anta at deres innbyrdes forhold er kjent, slik at vi bare har én ukjent (λ):

$$\lambda_i = b_i \lambda \quad (5.7.)$$

$$\text{La } a_i = P(\text{være i fase } i \text{ ved tid } t \mid \text{ingen UH i } (0,t)) \quad (5.8.)$$

a_i er uavhengig av t og forutsettes lik den relative andel av t_a vi er i fase i .

$$\begin{aligned} &P(\text{UH i } (t,t+\Delta t) \mid \text{ingen UH i } (0,t)) \\ &= \sum_i P(\text{UH i } (t,t+\Delta t) \cap \text{er i fase } i \text{ ved tid } t \mid \text{ingen UH i } (0,t)) \\ &= \sum_i P(\text{UH i } (t,t+\Delta t) \mid \text{er i fase } i \text{ ved tid } t \cap \text{ingen UH i } (0,t)) \\ &\quad \cdot P(\text{er i fase } i \text{ ved tid } t \mid \text{ingen UH i } (0,t)) \\ &= \sum_i (\lambda_i \Delta t + o(\Delta t)) a_i = \Delta t \lambda \sum_i a_i b_i + o(\Delta t) \end{aligned} \quad (5.9.)$$

Likning (5.9.) leder til at tiden til første UH inntreffer er eksponensielt fordelt med parameter $\lambda \sum_i a_i b_i$. Da finner vi λ av likningen:

$$p(t_a) = 1 - e^{-t_a \sum_i a_i b_i \lambda} \quad (5.10.)$$

$$\lambda = \frac{-\ln(1 - p(t_a))}{t_a \sum_i a_i b_i} \quad (5.11.)$$

Hvis t_a er gitt i timer blir den søkte sannsynlighet

$$p_i(3) \approx 3\lambda_i = 3b_i \lambda = \frac{-3b_i \ln(1 - p(t_a))}{t_a \sum_i a_i b_i} \quad (5.12.)$$

Utleddningen av likning (5.12.) gjelder bare i tiden inntil første UH inntreffer. Anta at UH inntreffer i tid $t_1 (< t_a)$. Hvis tilstand 0 er absorberende har likning (5.12.) ingen interesse for $t > t_1$. Hvis tilstand 0 ikke er absorberende, anta vi er tilbake i en av tilstandene $\{1, 2, 3, \dots, n_f\}$ ved tid $t_2 (> t_1)$. Vi kan nå betrakte t_2 som nytt nulltidspunkt og likning (5.12.) gjelder fram til neste UH inntreffer forutsatt at andelen av gjenværende tid $t_a - t_2$ vi er i fase i er lik andelen av totaltiden t_a vi er i fase i . På samme måte vil likning (5.12.) gjelde fram til 3., 4., 5. ... UH inntreffer, så lenge denne forutsetningen gjelder.

$p(t_a)$ er ofte estimert ut fra statistikk over en viss type hendelse. Ved hjelp av metoden som nå er skissert, kan vi beregne $p_i(3)$ som igjen kan brukes til å beregne overgangssannsynligheter.

5.5. Forsinkelseskostnader.

Alle beslutningsanalyser har til hensikt å gjøre forventede tap minst mulig. For leteboringsaktiviteten har vi tre typer kostnader:

- 1) driftsavhengige og driftsuavhengige kostnader som samlet utgjør et nødvendig minimum for at hullet kan bores (obligatoriske kostnader).
- 2) forsinkelseskostnader (kostnader som påløper normal drift utover obligatoriske kostnader. Kostnadene skyldes leie av utstyr og personell som løper selv om aktiviteten stanses for kortere perioder).

- 3) kostnader som følge av ulykker (forsinkelser, tap av menneskeliv, skade på utstyr og miljø).

De obligatoriske kostnadene er uavhengige av operasjonelle beslutninger og kan neglisjeres under optimaliseringen. Beslutningsanalysen har for modell-eksempelet til hensikt å finne de beslutningsregler som gir oss den beste avveining mellom forsinkelseskostnader og ulykkeskostnader.

For borefasen, slik den nå er definert, medfører alle tilstander unntatt "rotasjon" kostnader. Tilstandene "utblåsning", "plattformskade" og "klippet borestreng" medfører ulykkeskostnader, mens de resterende medfører forsinkelseskostnader. Overgang til de siste tilstandene medfører samme kostnad og bør utgjøre $3/24$ av full døgnrate. /3/s.27. Døgnraten for platformen av typen vi ser på settes lik 400 000 kr. Kostnad for én tidsenhet blir 50 000 kr. For ventetilstanden er det naturlig å redusere raten noe, fordi ventetiden ofte kan brukes til aktiviteter som må gjøres uansett. Vi lar kostnaden for de første 3 timene være 25 000 kr. og 50 000 kr. resten av ventetiden. Det medfører at

$$K(1,2) = 25\ 000\ \text{kr.}$$

$$K(2,2) = K(2,3) = K(4,2) = 50\ 000\ \text{kr.}$$

Kostnader for overgang fra tilstandene 6,8 og 9 settes lik null. Grunnen er at hva som skjer etter hendelser med så omfattende konsekvenser ikke har noen innvirkning på beslutningene før hendelsene.

5.6. Modellering av ukontrollert utblåsning.

I figur 5.2. er ukontrollert utblåsning representert ved én tilstand. For modelleksempelet er utblåsning kun en konsekvens av beslutninger og tilfeldigheter som ligger utenfor modellen. Beslutninger som omhandler brønnkontroll baseres på trykk/styrke-forhold i brønnen og annen geologisk informasjon. Ingen av disse størrelsene inngår som tilstandsvariable. Modelltilstanden "utblåsning" omfatter flere typer utblåsninger, med og uten brann osv., som medfører forskjellige kostnader og inntreffer med forskjellige sannsynligheter. Overgangssannsynligheter til "utblåsning" er derfor sannsynligheter for utblåsning av vilkårlig type og kostnad ved overgang er forventet kostnad, gitt at en utblåsning har inntruffet. I dette avsnittet skal vi ta for oss de sider ved ukontrollert utblåsning som er nødvendige

for å beregne overgangssannsynlighetene og forventet kostnad.

For at en utblåsning skal skje må det samtidig være en utløsende årsak og svikt i det apparat som skal nøytralisere årsaken. Alle utløsende årsaker sammenfattes i fenomenet tilbakeslag (engelsk: kick). Tilbakeslag vil si at formasjonsvæske strømmer inn i brønnen og presser boreslammet opp og ut av den. Fire hovedgrunner til at brønnen kan gi tilbakeslag er: 1) For lav tetthet i boreslammet, 2) utilstrekkelig etterfylling av boreslam under rotasjon, 3) suging (når borestrengen trekkes opp) og 4) Tapt sirkulasjon (boreslammet strømmer ut i formasjonen). Dreping av tilbakeslag forutsetter både at tilbakeslaget oppdages tidnok og at brønnkontrollsystemet virker. I motsatt fall opprettholdes ikke boreslamtrykket og olje og/eller gass strømmer ut av brønnen. Barrierene mot utblåsning kan deles i tre grupper: 1) Passive barrierer (foringsrør, sement m.m), 2) væskebarrierer (boreslam og sjøvann) og 3) stengningsbarrierer (sikringsventiler). Mer detaljerte beskrivelser av brønnkontroll og utblåsningsårsaker finnes i /9/, /14/ og /20/.

5.6.1. Sannsynligheter.

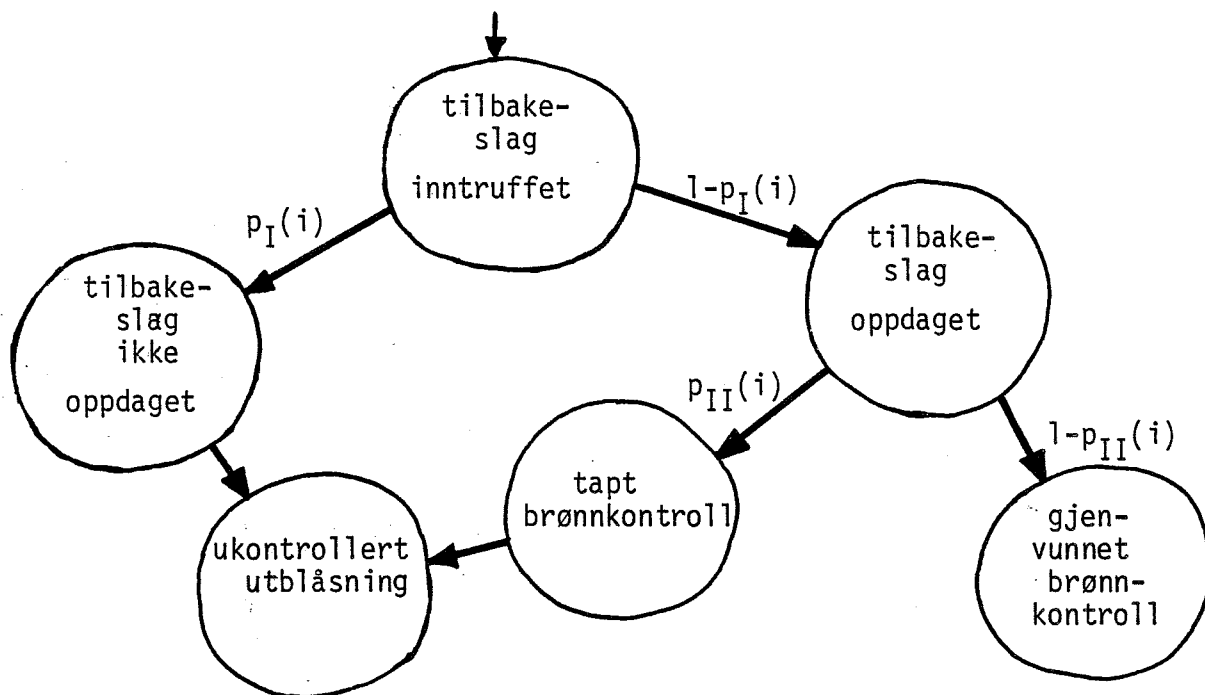
Bercha & Ass. Ltd. (1978) har gjort en feiltreanalyse for å estimere utblåsningssannsynligheten pr. boret brønn i kanadiske arktiske farvann, bl.a. for boreskip. Sannsynlighet for tilbakeslag er skalert pr. boret brønn. Alle andre sannsynligheter er betinget m.h.p. tilbakeslag. Hvis sannsynligheten for tilbakeslag skaleres pr. 3 timer kan deler av feiltreet brukes til å beregne ønskede overgangssannsynligheter. I prinsippet må en være varsom med å benytte sannsynligheter på andre systemer og under andre forhold enn de er beregnet for. To forhold taler for at Berchas analyse likevel brukes som utgangspunkt:

- Alle beregninger av sannsynlighet pr. boret brønn for utblåsning, som er gjort for ulike forhold, varierer lite og ligger mellom $1.6 \cdot 10^{-3}$ og $6.0 \cdot 10^{-3}$. /9/s.55. Overensstemmelse mellom historieske data og teoretiske beregninger angir at teorien er brukbar.
- Bercha har gjort den eneste feiltreanalysen, som gjør at sannsynligheter på lavere nivå enn utblåsning er tilgjengelig. Det er slike tall som er nødvendige i denne oppgaven.

Først skal vi se på mulige hendelser etter at tilbakeslag har inntruffet. Sannsynligheten for at tilbakeslaget ikke oppdages tidsnok er estimert til å være $p_I = 1.1 \cdot 10^{-3}$. Gitt at tilbakeslaget oppdages er sannsynligheten for tapt brønnkontroll estimert til å være $p_{II} = 17.3 \cdot 10^{-3}$. Disse sannsynlighetene gjelder gjennomsnittsværet i boreperioden. Hvis MBF-faktoren, definert i avsnitt 5.3., tas hensyn til i alle menneskelig feilsannsynligheter får vi at de tilsvarende væravhengige sannsynligheter blir:

Værtilstand 1:	$p_I(1) = 0.8 \cdot 10^{-3}$	$p_{II}(1) = 10.5 \cdot 10^{-3}$
" 2:	$p_I(2) = 1.1 \cdot 10^{-3}$	$p_{II}(2) = 17.3 \cdot 10^{-3}$
" 3:	$p_I(3) = 2.0 \cdot 10^{-3}$	$p_{II}(3) = 37.7 \cdot 10^{-3}$

Fra tilbakeslag har inntruffet til avklaring av situasjonen, kan mulige hendelser inntreffe som vist i det stokastiske nettverket i figur 5.3.



Figur 5.3. Hendelser etter at tilbakeslag har inntruffet.

Vi kan nå beregne sannsynlighetene $s(i)$ for at vi får utblåsning i værtilstanden i , gitt at tilbakeslag har inntruffet:

$$s(i) = p_I(i) + (1 - p_I(i))p_{II}(i) \quad (5.13.)$$

$$s(1) = 11.3 \cdot 10^{-3}$$

$$s(2) = 18.4 \cdot 10^{-3}$$

$$s(3) = 39.7 \cdot 10^{-3}$$

Sannsynlighet for minst ett tilbakeslag for én boret brønn er estimert til $p_{TS} = 0.28$. Det er da forutsatt at det tar 4 måneder å bore en brønn. Sannsynligheten for tilbakeslag avhenger av hvilken operative fase vi er i og p_{TS} representerer et gjennomsnitt for alle faser i løpet av 4 måneder. Vi skal bruke p_{TS} til å finne

$$p_{TSi}(\Delta t) = P(\text{tilbakeslag inntreffer i } (t, t+\Delta t) \mid \text{er i fase } i \text{ ved tid } t) \quad (5.14.)$$

for $\Delta t = 3$ timer. Modellen for skaleringen av sannsynligheter, gitt i avsnitt 5.4., kan brukes her. Følgende verdier på a_i og b_i benyttes:

fase A: rotasjon	$a_A = 0.3$	$b_A = 10$
fase B: trekking av borestreng	$a_B = 0.1$	$b_B = 20$
fase B: setting av foringsrør	$a_C = 0.1$	$b_C = 1$
andre faser	$a_k b_k \approx 0$	

a_i er hentet fra /18/ og justert noe pga. det harde klima i arktiske strøk. Variasjon i ventetider under ulike klima- og geologiforhold gjør a_i -ene usikre. b_i representerer fornuftige gjetninger fra fagfolk. Utblåsning kan også inntreffe i andre tilstander enn rotasjon, f.eks. når platformen er frakoblet brønnen. Disse tilfellene kan neglisjeres i beregningene, men vil bli omtalt senere. Bruk av likning (5.12.) gir

$$\begin{aligned} \text{rotasjon: } p_{TS1}(3) &= 6.6 \cdot 10^{-4} \\ \text{trekk-bor: } p_{TS3}(3) &= 13.2 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

(Indeksene tilsvarer tilstandsnummereringen fra avsnitt 5.2.) Tilbakeslag er en hendelse som er svært avhengig av menneskers evne til å beslutte og handle riktig. Vi innfører derfor væravhengighet i $p_{TSi}(3)$ på samme måte som tidligere i avsnittet. Dette er ikke gjort av Bercha, men avhengigheten antas å være ganske lik den som gjelder for $p_I(i)$ og $p_{II}(i)$, og vi bruker følgende verdier:

$$\begin{aligned} \text{Værtilstand 1: } p_{TS1}(3,1) &= 4.0 \cdot 10^{-4} \\ \text{" 2: } p_{TS1}(3,2) &= 6.6 \cdot 10^{-4} \\ \text{" 3: } p_{TS1}(3,2) &= 14.0 \cdot 10^{-4} \end{aligned} \quad p_{TS3}(3,v) = 2p_{TS1}(3,v) \quad v=1,2,3$$

Sannsynlighet for utblåsning i løpet av 3 timer, gitt at vi er i tilstand i og værtilstand v er nå gitt ved:

$$p_{Ui}(3,v) = p_{TSi}(3,v) \cdot s(v) \quad (5.15.)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Værtilstand 1: } & p_{U1}(3,1) = 0.5 \cdot 10^{-5} \\ \text{" } & 2: p_{U1}(3,2) = 1.2 \cdot 10^{-5} \\ \text{" } & 3: p_{U1}(3,3) = 5.6 \cdot 10^{-5} \end{array} \quad \begin{array}{l} p_{U3}(3,v) = 2p_{U1}(3,v) \\ v=1,2,3 \end{array}$$

Utrekningene forutsetter at $s(v)$ er uavhengig av tilstanden, noe som strengt tatt ikke er holdbart. Mulighetene til brønnkontroll er tilstandsavhengig, men det finnes dårlig grunnlag for å anslå avhengigheten kvantitativt. Til nå har vi bare sett på overganger fra "rotasjon"- og "trekk-bor"-tilstandene til utblåsning. Nå skal vi også se på overgang fra andre tilstander. Utblåsningssannsynligheten i "venting" er noe lavere enn for "rotasjon", vi antar ca 50% lavere: $p_{U2}(3,v) = 0.5 \cdot p_{U1}(3,v)$. Utblåsning kan også inntreffe i "overlevelse" og "forlatt borested"-tilstandene, men for sistnevnte vil det ikke medføre skade på mennesker eller utstyr, slik at vi ser bort fra muligheten for utblåsning. I "overlevelse"-tilstanden er platformen frakoblet brønnen og sikringsventilen stengt. Et tilbakeslag fra brønnen (f.eks. hvis boreslam strømmer ut i formasjonen) kan da resultere i kraterutblåsning, som gjør at platformen mister oppdrift og kan synke. Selv om det er muligheter for utblåsning (mindre enn for "rotasjon", "venting" og "trekk-bor"), vil det ikke være noe argument mot å gå til "overlevelse"-tilstanden, idet denne tilstanden først og fremst er en beskyttelse mot platformbelastninger. Derfor neglisjeres muligheten i modellen.

Overgangssannsynlighetene er avhengige av beslutninger. For overganger til "utblåsning" lar vi avhengigheten være slik:

$$\left. \begin{array}{ll} q_{i9}(i,v) = p_{Ui}(3,v) & i=1,2,3 \\ q_{i9}(i+1,v) = p_{Ui+1}(3,v) & i=1,2 \\ q_{29}(1,v) = p_{U1}(3,v) \\ q_{49}(2,v) = p_{U2}(3,v) \\ q_{39}(4,v) = p_{U3}(3,v) \end{array} \right\} v=1,2,3$$

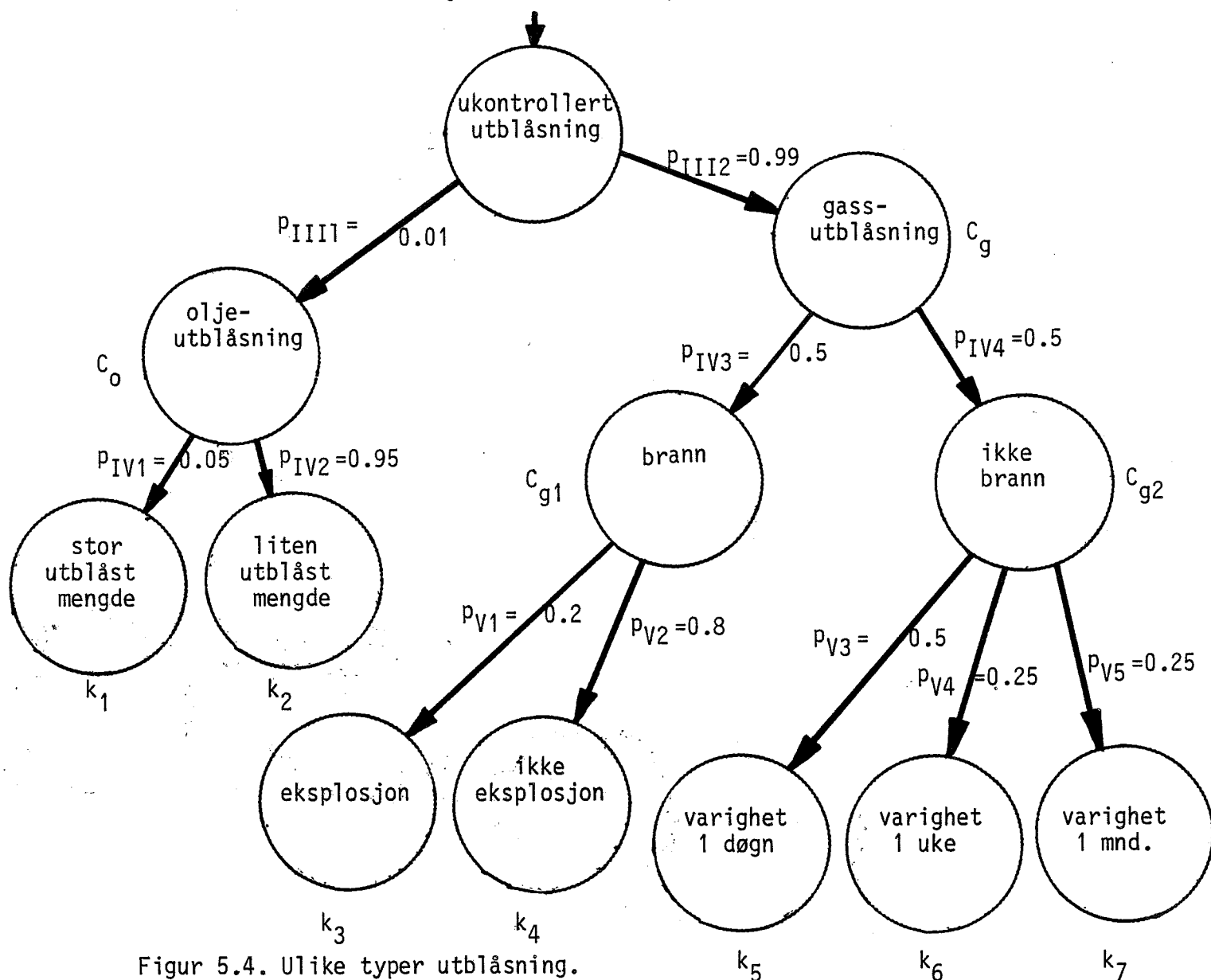
Hvis boret setter seg fast under rotasjon er vi svært sårbare for tilbakeslag. Vi antar derfor at utblåsningssannsynligheten i "bor-fast" er $0.5 \cdot$ tilbakeslagssannsynligheten i tilstand 1:

$$q_{79}(1,v) = 0.5 \cdot p_{TS1}(3,v) \quad v=1,2,3$$

Denne sårbarheten gjør at det i nødsfall kan bære aktuelt å klippe borestrengen, kaste av marin returledning og forlate borestedet.

5.6.2. Kostnader.

En ukontrollert utblåsning er en hendelse som varierer sterkt mht. alvorlighet og kostnader. Konsekvensene er avhengige av om det er en oljeutblåsning, om den medfører brann etc. Det stokastiske treet i figur 5.4. viser én måte å skille mellom de viktigste konsekvenstypene.



Figur 5.4. Ulike typer utblåsning.

Sannsynlighetene i figuren er delvis basert på statistikk fra NOU 1979:8 og fagfolks vurderinger. Omlag halvparten av alle gassutblåsninger medfører brann ($p_{IV3}=0.5$). Sannsynligheten for eksplosjon, gitt brann er estimert til $p_{V1}=0.2$. Gassutblåsning med brann vil påføre platformen betydelige skader som medfører store kostnader i tillegg til forsinkelseskostnadene. Vi regner med riggleie for 1 måned, 50% av platformens totalverdi med eksplosjon og 20% av platformens totalverdi uten eksplosjon.

$$C_{g1} = k_3 P_{V1} + k_4 P_{V2} + 12.0 \text{ mill. kr.}$$

$$C_{g1} = (0.5 \cdot 400 \cdot 0.2 + 0.2 \cdot 400 \cdot 0.8 + 12.0 \text{ mill. kr.} = 116.0 \text{ mill. kr.}$$

For gassutblåsning uten brann er det forsinkelsen som avgjør kostnadene. Det er vanskelig å vurdere hvordan varigheten er (kontinuerlig) fordelt, og dermed også forventet varighet. En enkel metode til å finne en fornuftig forventningsverdi på, er å plukke ut noen diskrete, typiske varigheter og anslå tilsvarende punktsannsynligheter. Det ble gjort i dette tilfellet. Med en døgnrate på 0.4 mill. kr. blir $k_5=0.4$ mill. kr., $k_6=2.8$ mill. kr. og $k_7=12.0$ mill. kr. Vi regner også med en forventet kostnad på 1.1 mill. kr. for skade på utstyr. Det gir

$$C_{g2} = k_5 P_{V3} + k_6 P_{V4} + k_7 P_{V5} + 1.1 \text{ mill. kr.}$$

$$C_{g2} = 5.0 \text{ mill. kr.}$$

Dette gir forventet kostnad ved gassutblåsning

$$C_g = C_{g1} P_{IV4} + C_{g2} P_{IV5} = 60.5 \text{ mill. kr.}$$

En oljeutblåsning ved leteboring har svært lav sannsynlighet når en ikke borer inn i reservoaret. 1% av utblåsningene i dette tilfellet antas å være oljeutblåsninger ($p_{III1}=0.01$). Oljeutblåsninger utgjør ca 60% av alle utblåsninger i reservoaret ($p_{III1}=0.6$). Det er vanskelig å anslå hvordan størrelsen og varigheten av en oljeutblåsning fordeler seg. Slike data er avhengig av geologiske forhold. En stor utblåsning som ifølge /5/ utgjør ca 5% av alle oljeutblåsninger kan ha disse typiske kostnadene:

Tapt olje	600 mill. kr.
Tapt gass (10%)	60 "
Boring av avlastn.brønn	300 "
Brønndreping	20 "
Oppsamling, erstatn.etc.	50 "
<hr/> Sum	<hr/> 1 030 mill. kr.

Kostnadene for en liten oljeutblåsning forutsettes å være ca 10% av summen ovenfor, altså 100 mill. kr. En oljeutblåsning medfører også gassutblåsning slik at tilsvarende forventede kostnader må legges til. Dermed får vi forventede kostnader ved oljeutblåsning:

$$C_0 = k_1 P_{IV1} + k_1 P_{IV2} + C_g$$

$$C_0 = (100 \cdot 0.95 + 1030 \cdot 0.05 + 60.5) \text{ mill. kr.} = 207.5 \text{ mill. kr.}$$

Forventet kostnad ved utblåsning blir nå:

$$\text{utenfor reservoar: } C_0 = 62 \text{ mill. kr.}$$

$$\text{i reservoar: } C_0 = 149 \text{ mill. kr.}$$

5.7. Modellering av ulykker som leder til platformskader.

Modelltilstanden "platformskade" omfatter alle typer strukturelle skader hvor dårlig vær var en av hovedårsakene. I en rapport av Snider et.al. /21/ er sannsynligheten pr. riggår for platformskade estimert til $p_s = 0.23$. Estimeringen bygger på ulykkesdata fra Nordsjøen for årene 1972-75 og sannsynligheten p_s er tilnærmet den samme som tilsvarende for Mexicogulfen. p_s vil bli brukt til å beregne overgangssannsynligheter til tilstanden "platformskade".

5.7.1. Sannsynligheter.

Anta at hendelsene som fører til platformskade for gitt operativ tilstand og værtilstand v har hendelsesrate λ_{iv} gitt ved:

$$s_{iv}(\Delta t) = P(\text{hendelse i tidsintervallet } (t, t+\Delta t) \mid \text{er i } (i, v) \text{ i } t)$$
$$s_{iv}(\Delta t) = \lambda_{iv} \Delta t + o(\Delta t) \quad v, i=1,2,3,4 \quad (5.16.)$$

Vi har nå en tilsvarende modell som vi brukte for tilstanden "utblåsning", og som ble presentert generelt i avsnittet om skalering av sannsynligheter. Imidlertid varierer nå λ_{iv} også med været, og det er vanskelig å anslå fornuftige verdier på alle a_{iv} og b_{iv} , som skal til for å bruke likning (5.12.).

Vi må derfor gjøre noen flere tilnærmelser. Rotasjonstilstanden og ventetilstanden har samme dypgående. En rimelig antagelse er derfor at $\lambda_{1v} = \lambda_{2v}$ for alle værtilstander, fordi ventetilstanden først og fremst er defensiv mht. brønnen og ikke platformen. Videre er det rimelig å anta at ulykkesintensitetene er null i værtilstandene 1 og 2 for "overlevelse"- og "forlatt borested"-tilstandene. I værtilstand 1 antas også intensitetene å være null

for "rotasjon" og "venting". Over 70% av alle skader skjer i dårlig vær. Tatt i betraktning at dårlig vær (værtilstand 3) forekommer under 20% av tiden vil vi anta at λ_{13} er omtrent en størrelsesorden høyere enn λ_{12} . Vi setter $\lambda_{13} = 10\lambda_{12}$. I værtilstand 3 antar vi at ulykkesintensitetene i "overlevelse"-dypgående er en størrelsesorden mindre enn for operativt dypgående. Mange platformskader har oppstått under forflytning av platformen, men tilstanden "forlatt borested" representerer kortvarige, ubetydelige forflytninger. Disse resonnementene leder til følgende verdier på b_{iv} :

Værtilstand	Operativ tilstand i				
	v	1	2	3	4
1	0	0	0	0	0
2	1	1	1	0	0
3	10	10	10	1	0

Tabell 5.1. Oversikt over b_{iv} ($\lambda_{iv} = b_{iv}\lambda$).

Andelen av tiden vi enten er i rotasjonstilstanden eller ventetilstanden er så stor at for skaleringen av p_s kan vi regne som om vi alltid er i én av disse to tilstandene. Da er vi tilbake i den generelle skaleringsmodellen. Værtilstandene representerer nå fasene, slik at andelen av tiden vi er i værtilstand i er a_i og b_i tilsvarer 1. kolonne i tabell 5.1.

$$\begin{array}{ll}
 a_1 = 0.35 & b_1 = 0 \\
 a_2 = 0.50 & b_2 = 1 \\
 a_3 = 0.15 & b_3 = 10
 \end{array}$$

a_i er grovt beregnet ved å ta gjennomsnittet av stasjonærsannsynlighetene for de 3 bølge- og vindtilstandene, sommer og vinter, fra Vedlegg 1. Likning (5.12.) gir at

$$\lambda = 1.5 \cdot 10^{-5}$$

Dette gir følgende tabell over $s_{iy}(3)$:

Værtilstand	Operativ tilstand				
V	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	0.5	0.5	0.5	0	0
3	4.5	4.5	4.5	0.5	0

Tabell 5.2. Oversikt over $s_{iy}(3) \cdot 10^4$ ($s_{iy}(3) = 3b_{iy}\lambda$).

Foreløpig har overgangssannsynlighetene til tilstanden "platformskade" bare vært avhengige av operativ tilstand og værtilstand. Men overgangssannsynlighetene $q_{ij}(a,v)$ er også avhengige av hvilken beslutning som tas i tilstand i . Følgende regler for hvordan denne avhengigheten skal komme inn vil bli brukt for tilstandene 1,2,3,4,5:

$$\begin{array}{ll}
 q_{i8}(i,v) = s_{iv}(3) & i=1,2,3,4,5 \\
 q_{i8}(i+1,v) = s_{iv}(3) & i=1,2,3,4 \\
 q_{i8}(i-1,v) = s_{i-1v}(3) & i=2,4,5 \\
 q_{48}(2,v) = s_{2v}(3) & \\
 q_{78}(1,v) = q_{18}(1,v) &
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array}} \right\} v=1,2,3$$

Disse konvensjonene medfører at sannsynligheten for platformskade for en gitt overgang er lik den største av $s_i(3,v)$ for de to tilstandene. Grunnen er at operasjonen som en overgang representerer også innebærer risiko.

5.7.2. Kostnader.

Platformskader, slik modelltilstanden er definert, representerer alt fra små ubetydelige skader, til totalhavari. For å tilordne en kostnad til overgang til "platformskade" er det nødvendig å gjøre en litt mer detaljert analyse av denne tilstanden. Vi deler først "platformskade" inn i 4 grupper etter alvorlighetsgrad; 1) ingen skade, 2) liten skade, 3) alvorlig skade og 4) totalhavari. "ingen skade" omfatter skader som er såvidt ubetydelige at de har liten eller ingen innvirkning på operasjoner og beslutninger. Snider et.al. /21/ presenterer en oversikt over antall ulykker i hver gruppe, hvor dårlig vær var en av hovedårsakene, for årene 1972-75. Oversikten som også brukes av Moan, gjelder alle typer mobile rigger og totalt antall ulykker var 56. Disse tallene antas å gi brukbare estimater for hvordan

ulykkesgradene fordeler seg i værtilstand 3, gitt at en ulykke har inntruffet. Denne fordelingen må generelt antas å avhenge både av tilstanden vi kom fra og værtilstanden. Det finnes ikke noe datagrunnlag til å estimere fordelingen i andre enn værtilstand 3, eller å betinge fordelingen mht. tilstand vi kom fra. Derfor gjøres disse forutsetningene: 1) Fordelingen er uavhengig av tilstanden vi kom fra. 2) Fordelingen i værtilstandene 2 og 3 er den samme (i værtilstand 1 er sannsynligheten for platformskade lik null for alle skadetyper).

$$\text{La } r_j = P(\text{skade i gruppe } j \text{ platformskade}) \quad (5.17.)$$

Disse estimatene av r_j er gjort på grunnlag av rapporten til Snider:

$$\begin{aligned} r_1 &= 0.2 \\ r_2 &= 0.5 \\ r_3 &= 0.2 \\ r_4 &= 0.1 \end{aligned}$$

Det finnes ingen entydig måte å tilordne kostnader til de fire ulykkesgruppene på. Å bruke tall for én spesiell platform er en mulighet, men sannsynlighetene for at disse skadene oppstår er estimert på grunnlag av statistikk som omfatter mange rigger. Modelleksempelen representerer et slags gjennomsnitt, derfor bør også kostnadene gjøre det. Tidsskriftet "Ocean Industry" har gitt en oversikt over alle kjente ulykker som resulterte i platformskader, helt tilbake til 1955. For hver ulykke er skadens kostnad anslått. Oversikten skiller mellom små skader, som her tilsvarer gruppe 2 og store skader, som tilsvarer gruppe 3 og 4. La $KS(i)$ være forventet kostnad ved skade i gruppe i , vi setter $KS(1)=0$. På grunnlag av oversikten settes $KS(2)=3$ mill. kr. og $KS(3)=50$ mill. kr. $KS(4)$ er platformens totalverdi som avhenger av dens alder osv. Vi forutsetter at modellplatformen har totalverdien $KS(4)=400$ mill. kr. Forventet kostnad ved en vilkårlig platformskade blir dermed:

$$CS = \sum_{j=1}^4 KS(j) r_j = 51.5 \text{ mill. kr.}$$

5.8. Andre sannsynligheter og kostnader.

Utblåsningssannsynligheten og sannsynlighet for platformskade i tilstanden "bor-fast" er beregnet tidligere. Sannsynligheten for at boret setter seg fast under rotasjon er av samme størrelsesorden som sannsynligheten for tilbakeslag. Vi bruker derfor:

$$q_{17}(1,1) = q_{27}(1,1) = 4.0 \cdot 10^{-4}$$

$$q_{17}(1,2) = q_{27}(1,2) = 6.6 \cdot 10^{-4}$$

$$q_{17}(1,3) = q_{27}(1,3) = 14.0 \cdot 10^{-4}$$

Beslutningen om å klippe borestrengen og forlate borestedet er svært kostbar. Vi lar $K(7,6) = 25$ mill. kr., som inkluderer forsinkelseskostnad og leie av serviceselskap. Med dette er alle sannsynligheter for å gå til ulykkestilstander bestemt. For de tilstandovergangene som har stokastiske oppholdstider skal vi nå finne tilsvarende overgangssannsynligheter ut fra forventet oppholdstid. Hvis N =antall døgn som skal til for å være tilbake i "rotasjon" etter at boret har satt seg fast, bruker vi $E(N)=3$ i værtilstand 1 og 2 og $E(N)=5$ i værtilstand 3. Ifølge likning (4.37.) får vi da overgangssannsynlighetene (1 døgn = 8 tidsenheter):

$$q_{77}(1,1) = 0.958$$

$$q_{77}(1,2) = 0.958$$

$$q_{77}(1,3) = 0.975$$

Tiden det tar å trekke borestrengen kan variere noe. Hvis N =antall tidsenheter for oppholdstiden i tilstand 3, setter vi $E(N)=1$ i værtilstand 1, $E(N)=1.25$ i værtilstand 2 og $E(N)=2$ i værtilstand 3. Det blir sannsynlighetene for å forbli i tilstand 3 lik

$$q_{33}(4,1) = 0$$

$$q_{33}(4,2) = 0.2$$

$$q_{33}(4,3) = 0.5$$

I tilstand 5 lar vi forventet oppholdstid være $E(N)=4$ i alle værtilstander. Det gir følgende sannsynligheter for å forbli i tilstanden hvis vi beslutter å gå til tilstand 4:

$$q_{55}(4,v) = 0.75$$

$$v=1,2,3$$

Beslutningen om å forbli i tilstand 5 gir egentlig sikkert resultat, men vi trenger en "dummy"-overgang fra tilstand 5 for at optimalitetsforutsetningen holder. Den sa at det måtte eksistere minst én tilstand som kan nås fra alle tilstander, uansett hvilken stasjonære plan som ble fulgt. Tilstand 1 er en slik tilstand, hvis vi innfører disse "dummy"-overgangene:

$$\begin{aligned}q_{59}(5,v) &= 10^{-6} \\q_{61}(1,v) &= 1 \\q_{81}(1,v) &= 1 \\q_{91}(1,v) &= 1\end{aligned}\quad v=1,2,3$$

Disse overgangene vil ikke ha noen innvirkning på hva som blir optimal plan. Sannsynligheten for å forbli i tilstand 5 når vi beslutter det blir da:

$$q_{55}(5,v) = 1 - 10^{-6} \quad v=1,2,3$$

Beslutningen å klippe borestrengen gir sikkert resultat:

$$q_{76}(6,v) = 1 \quad v=1,2,3$$

Nå er alle sannsynligheter for ikke-besluttede overganger og sikre overganger bestemt. For alle usikre beslutninger og mulige overganger kan vi nå beregne sannsynlighetene for at resultatet av beslutningene blir som ønsket:

$$q_{ia}(a,v) = 1 - \sum_{j \neq a} q_{ij}(a,v) \quad (5.18.)$$

Alle overgangssannsynligheter som nå ikke eksplisitt er bestemt til å være positive er null. Tabell over $q_{ij}(a,v)$ finnes i Vedlegg 2.

Til optimaliseringen som skal gjøres i neste kapittel brukes de sannsynlighetene som nå er beregnet for tilstandsdiagrammet i figur 5.2. De kostnadene som blir brukt gjelder når vi ikke er i reservoaret. Været representeres ved vindstyrke modellert som en 2. ordens Markovkjede.

5.9. Nyttevurdering av risiko.

"Nytte" (engelsk: utility) betegner i beslutningsteorien ønskeligheten av en hendelse eller situasjon. Begrepet er positivt ladet, men blir også brukt om negative situasjoner, f.eks. økonomiske tap. Behovet for nyttevurderinger kommer inn når ønskeligheten av et tap ikke proporsjonalt med forventet tap (tapets størrelse når tapet er sikkert). Enda klarere blir behovet for nyttebegrepet når en situasjon ikke kan beskrives fullstendig med målevariable, og kvalitative kjennetegn må tas med. Nyttebegrepet og nyttefunksjoner blir omtalt kort og uformelt her for å vise på hvilken måte det kommer inn i beslutningsanalysen.

La Y være et stokastisk tap, for enkelhets skyld i kroner. Punktsannsynlighetene for Y er $P(Y=y) = f(y)$ og utfallsrommet til Y er $\underline{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$. $L_1 = (\underline{y}, f)$ kalles da et prospekt. La $L_2 = (\underline{y}, h)$ være et annet prospekt. Hvilket prospekt er minst ønskelig? Det kommer an på vår nyttevurdering av risikoen da to funksjonene f og h representerer. En nyttefunksjon $u(L)$ defineres som en tilordning mellom et prospekt og dets ønskelighet som tilfredsstillende kravene:

$$\begin{aligned} u(L_1) > u(L_2) &\iff L_1 \text{ er mer ønskelig enn } L_2 \\ u(L_1) = u(L_2) &\iff L_1 \text{ er like ønskelig som } L_2 \\ u(L_1) < u(L_2) &\iff L_1 \text{ er mindre ønskelig enn } L_2 \end{aligned} \quad (5.19.)$$

Nyttefunksjonen u definert slik er "ordinal", dvs. den sier bare noe om preferanserekkefølgen av mulige prospekter og ikke noe om preferansens styrke. Vi forutsetter videre at vi har en "skalar" nyttefunksjon, som også gir preferansens styrke. For modelleksempelet står vi ved hvert beslutningstidspunkt overfor prospektene:

$$\begin{aligned} L_{iu}(a) &= (\underline{y}_i, f_{iua}) && a \in A_i \\ \text{der} \quad \underline{y}_i &= \sum_{j=1}^{n_x} \{K(i,j)\} \\ f_{iua} &= \sum_{j=1}^{n_x} \{q_{ij}(a,u)\} \end{aligned} \quad (5.20.)$$

I formuleringen av optimaliseringsproblemet sammenliknes forventede kostnader $C(i,u,a)$ for prospektene. Vi har da implisitt forutsatt at ønskeligheten av prospektene er proporsjonal med forventede kostnader for prospektene.

Denne nyttevurderingen kalles risikonøytral. For å demonstrere hvilken rolle nyttevurderingen spiller, ser vi på et eksempel:

I en tilstand har vi valget mellom to beslutninger med væruavhengig risiko. Vi står overfor prospektene:

$$L_1 = (y, f)$$

$$\begin{aligned} \text{der } y_1 &= 0 \text{ kr.} & f(0) &= 1 - 10^{-4} \\ y_2 &= 200 \cdot 10^6 \text{ kr.} & f(200 \cdot 10^6) &= 10^{-4} \end{aligned}$$

$$L_2 = (x, h)$$

$$\text{der } x = 20\,000 \text{ kr.} \quad h(20\,000) = 1$$

Hvis kronebeløpene representerer tap, har vi nå 3 måter å vurdere de to prospektene på:

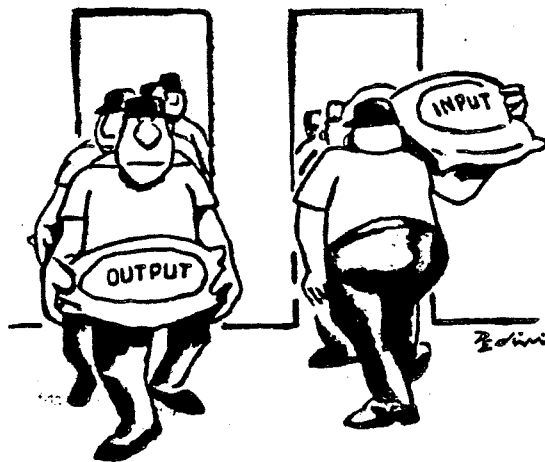
<u>Nyttevurdering:</u>	<u>Tenkemåte:</u>	<u>Betegnelse på nyttevurdering:</u>
$u(L_1) < u(L_2)$	"Tapet på 200 mill. kr. er så katastrofalt at jeg er villig til å gjøre "hva som helst" for å unngå det."	risikoaversjon
$u(L_1) = u(L_2)$	"Forventet tap er 20 000 kr. for begge prospekter, slik at de må være like dårlige."	risikonøytralitet
$u(L_1) > u(L_2)$	"Det <u>sikre</u> tapet på 20 000 kr. er så stort at jeg er villig til å neglisjere den lille sannsynligheten 10^{-4} ."	risikoattraksjon

Hvilken nyttevurdering har oljeselskapene? Forsikringselskapene?

Fagforeningene? Naturvernforbundet? Arbeiderne? Alle interessenter vil trolig ha risikoaversjon, fordi oljevirkksomheten er en vedvarende aktivitet som i det lange løp ville medføre nettotap hvis nyttevurderingen var risikoattraktiv. Formen på nyttefunksjonene til interessentene vil trolig være forskjellige. Hvis nyttefunksjonen u for beslutningstageren i modelleksempelet var kjent ville $C(i, u, a)$ erstattes med $u(L_{iu}(a))$ og optimal plan ville være den som maksimerte forventet nytte.

Nyttefunksjoner har mest vært behandlet teoretisk og det eksisterer ingen informasjon om nyttevurderinger av risiko ved oljevirkosomheten. Derfor gjøres optimaliseringene i kapittel 6 under risikonøytralitet. Den eneste måten å bringe inn risikovurderinger på er nå ved følsomhetsanalyse. Risikoaversjon betyr at det legges relativt mer vekt på store kostnader, selv om sannsynlighetene er små. Å variere kostnader og sannsynligheter kan dermed også tolkes som variasjoner i nyttevurdering.

6. LØSNING AV OPTIMALISERINGSPROBLEM - RESULTATER.



- Garbage in - garbage out.
(Computerloven)

6. LØSNING AV OPTIMALISERINGSPROBLEM - RESULTATER.

6.1. Standardisering av LP-formulering.

I kapittel 4. ble problemet å finne stasjonær optimal plan formulert som et LP-problem, dvs. at problemet viste seg å ha LP-struktur. Fordi variablene hadde mer enn én indeks ble målfunksjonen og begrensningene uryddige. Enten problemet skal løses for hånd eller maskinelt må formuleringen standardiseres, det betyr her bl.a. å forenkle indekseringen. Et standard LP-problem har formen

$$\text{Min! } K = \sum_i c_i z_i \quad (6.1.)$$

under begrensningene

$$\sum_j m_{ij} z_j = b_i \quad \forall i \quad (6.2.)$$

$$z_i \geq 0 \quad \forall i \quad (6.3.)$$

Sammenhengen mellom den 1-dimensjonale indekseringen av z_j og den 3-dimensjonale indekseringen av $z_{ju}(a)$ defineres slik:

$$j = (i-1)n_u n_a + (u-1)n_a + a \quad (6.4.)$$

$$n_z = \max(j) = n_x n_u n_a$$

Antall variable er $n_z = n_x n_u n_a$ og antall begrensninger er $n_b = 2n_x n_u + 1$. For modelleksempelen med $n_x = n_u = 9$ og $n_a = 6$ blir $n_z = 486$ og $n_b = 163$. Koeffisientene i det standardiserte LP-problemet er beregnet v.h.j.a. FORTRAN-subrutiner, som igjen bygger på likninger fra kapittel 4. (Sammenhengen mellom den 3-dimensjonale og 1-dimensjonale indekseringen refereres her fordi den har betydning for logikken i subrutinene og for tolkningen av datamaskinutskrifter av LP-løsninger.)

6.2. Innmating av LP-problem for datamaskinløsning.

Selve beregningene og anvendelsene av datamaskin for modelleksempelen ligger litt utenfor det som egentlig hører hjemme i rapporten. Men denne

delen av arbeidet er likevel så tidkrevende og problemfylt at hovedpunktene bør rapporteres.

Nesten alle løsningsmetoder for LP-problemer som er i bruk er varianter av den såkalte Simplexalgoritmen, som ble utviklet av G.B. Dantzig i 1947. LP-formulering av virkelige problemer medfører ofte svært mange variable og begrensninger og krever maskinell løsning, og Simplexalgoritmen er ideell for datamaskinutførelse. Utvikling og utbredelse av LP har derfor gått hånd i hånd med utviklingen av datamaskiner. Simplexalgoritmen betraktes som den mest effektive metoden til å løse LP-problemer. Praksis viser at algoritmens effektivitet er noe avhengig av antall begrensninger, men mindre avhengig av antall variable. Regnetid på datamaskin er funnet å variere tilnærmet med antall begrensninger (m) som m^3 . /23/s.53.

Det finnes flere omfattende programpakker for LP-problemer. En av disse er FMPS (Functional Mathematical Programming System) som er skreddersydd for datamaskiner i UNIVAC 1100 - serien etter en FORTRAN-"lest". FMPS-pakken kan brukes på mange problemtyper (ikke bare LP) og brukermanualen /24/ er meget volumnøs og krever god innsikt i LP. Nygreen /25/ har i et 20-siders notat trukket ut av manualen det mest nødvendige for å løse "vanlige" LP-problemer. Men beslutningsproblemer adskiller seg noe fra "vanlige" LP-problemer, slik at det var nødvendig å sette seg inn i manualen. Spesielt for vårt LP-problem er at alle høyresidene (b_i) er lik null for alle i , unntatt for normeringslikningen (hvor $b_i=1$). LP gir gode muligheter for følsomhetsanalyser, bl.a. ved å variere b_i -ene, som vanligvis er parametre i modellen. I vårt problem representerer b_i -ene imidlertid noe av strukturen i modellen, idet vi har med sannsynligheter å gjøre. Denne formen for følsomhetsanalyse er dermed uinteressant. Det som imidlertid er interessant er simplexkriteriene til de ikke-basisvariable (her: de $z_{iu}(a)$ som er null). Simplexkriteriet til en variabel $z_{iu}(a)$ er et tall som sier hvor mye kostnaden $C(i,u,a)$ må reduseres for at det skal bli optimalt å ta $z_{iu}(a)$ inn i basis, dvs. sette $z_{iu}(a) > 0$ og dermed $y_{iu}(a)=1$. Simplexkriteriene følger automatisk med ved løsningsutskrifter fra FMPS.

Fordi mange av størrelsene som inngår i vårt problem er produkter av små sannsynligheter og dermed er svært små, må noen nulltoleransegrenser i FMPS-pakken settes lavere enn standardverdiene.

FMPS er egentlig en stor samling med prosedyrer eller subrutiner som kan

kalles fra et styreprogram. Styreprogrammet må skrives i et styrespråk som er spesielt for FMPS, men likner på FORTRAN. Noen prosedyrer er obligatoriske for at optimaliseringen kan gjøres. De resterende er til for å gjøre problemløsningen fleksibel og velegnet for et spesielt problem. Styreprogrammet som ble brukt for vårt problem er gjengitt i Vedlegg 5.

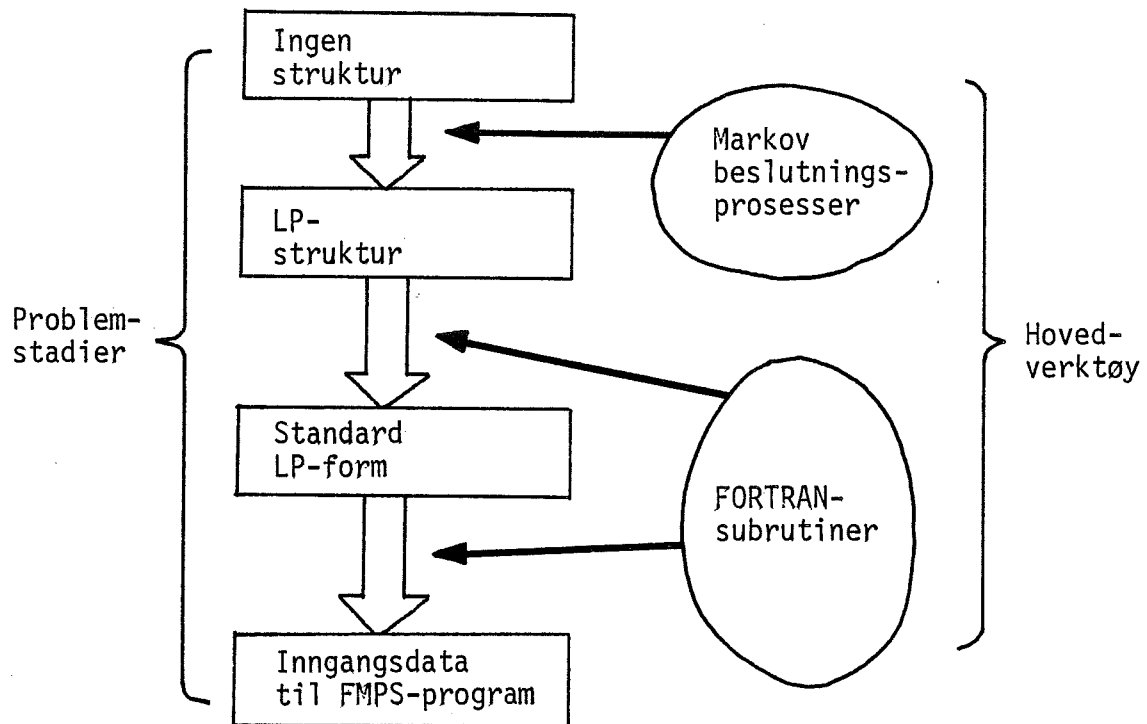
FMPS krever at inngangsdata er ordnet i et spesielt format. Hullkortene (eller databilder på fil) skal følge umiddelbart etter styreprogrammet. Første databilde angir problemets navn. De neste databildene angir navn på begrensningslikningene (ROWS) og en bokstavkode som angir relasjonstype for likningen (E for = og N for målfunksjonen). Videre følger databilder som angir variabelnavn (COLUMNS) og alle matriseelementer forskjellige fra null. Til slutt følger alle $b_i \neq 0$. Utdrag fra en kortbildegserie for vårt problem er vist i Vedlegg 6.

Å sette opp databildene er et stort og meget tidkrevende arbeid. Beslutningsproblemet (med antall begrensninger lik 163 og antall variable lik 486) er for stort til at databildene kan settes opp manuelt. Det finnes en egen programpakke (GAMMA) som hører til FMPS til å gjøre dette. Fordi det også er tidkrevende å lære å bruke GAMMA ble et program til å sette opp databildene programmert spesielt for dette problemet. Programmet med tilhørende subrutiner finnes i Vedlegg 7. CPU-tid på NORD 10/S datamaskin for å sette opp en databildeserie var ca 2 minutter.

6.3. Oppsummering før løsning.

Når oppgavens problemstilling ble presentert i innledningen var det umulig å forutsi hvilken vei som ville føre fram til løsning. Egentlig var det ikke engang sikkert at metodeidéen ville være brukbar, eller eventuelt hva idéen ville strande på. Foreløpig kan vi ikke si noe om framgangsmåtenes praktiske anvendbarhet. Til slike konklusjoner er det nødvendig med resultater av metoden, altså en konkret løsning. Likevel er det allerede nå forsvarlig å si at alle metodens prinsipper virker. Med det menes at det ikke finnes alvorlige formuleringsproblemer, med påfølgende forutsetninger som reduseres realismen sterkt. Så lenge systemet kan modelleres som en Markovbeslutningsprosess vil optimaliseringsmetoden virke uendret. At metodens prinsipper virker dokumenteres av at den gjorde det mulig å bringe et ustrukturert problem til et stadium der det foreligger som inngangsdata til en generell programpakke.

Figur 6.1. viser de fire skrittene på denne veien.



Figur 6.1. Fire skritt mot løsningsorientert problemstruktur.

6.4. Løsning og følsomhetsanalyse.

Forberedelsene til løsning, tilpasning av FMPS og oppsetting av inngangsdata, tok uforholdsmessig mye tid. Praktiske vansker i dette arbeidet medførte dessuten mange ubrukelige kjøring, slik at kostnadsgrensen for oppgaven nærmet seg raskt. Det har gått noe utover diskusjonen av resultatene. Det som er gjort av diskusjon og følsomhetsanalyse er derfor bare det som er mest nødvendig for å trekke en del prinsipielle konklusjoner.

Den første kjøringen som ble gjort var med kostnadene i Vedlegg 3, sannsynlighetene i Vedlegg 2 og værdadataene i Vedlegg 1 (2. ordens Markovkjede av vind - vinter). Optimal plan ble nådd etter 254 iterasjoner (CPU-tid ca 15 sek.) og verdien på målfunksjonen var ca 16 000 kr. FMPS gir også enkelte tilleggsopplysninger om LP-problemet. Bl.a. kan det nevnes at begrensingsmatrisen hadde 2342 positive elementer (av ialt 69 218).

Optimal plan var å fortsette å bore for alle værutviklinger, untatt 33 da beslutning om å gå til "venting" skulle tas. Men i "venting" sa planen at en umiddelbart skulle sette igang rotasjonen igjen. I "bor-fast"-tilstanden var det optimalt å forsøke å løsne boret igjen for alle værutviklinger. Denne planen er lite defensiv og det kan tenkes å ha tre grunner:

- 1) Værtilstandene skiller ikke ut vær som er så dårlig at defensive tiltak må tas.
- 2) Modellen og dataene er såvidt dårlige at de ikke avslører vesentlige forskjeller mellom beslutningsalternativene.
- 3) Optimaliseringen er gjort under risikonøytralitet og den nytte-vurderingen fører faktisk til en dristig plan.

Hensikten med følsomhetsanalysen er å gi svar på hvilke av disse punktene som er mest vesentlige.

Den første endringen som ble gjort var å øke $K(1,2)$ til 50 000 kr. Det medførte at det ble optimalt å alltid forbli i "rotasjon". Ved isteden å redusere $K(1,2)$ til 15 000 kr. ble det optimalt å gå til "venting" for værutviklingene 23 og 33. Det er vanskelig å avgjøre hva kostnaden ved å gå til "venting" bør være for modelleksempelen. Størrelsen på $K(1,2)$ avhenger av i hvilken grad et kort opphold i "venting" representerer forsinkelse av totalaktiviteten.

Hvorfor ble det ikke lønnsomt å forbli i "venting" når været var dårlig? Det skyldtes at kostnaden ved å forbli var for høy i forhold til hva vi oppnådde av risikoreduksjon. Sannsynligheter for utblåsning og platformskade måtte reduseres med omtrent en størrelsesorden i "venting" for at det kunne bli lønnsomt å forbli i tilstanden.

Forsøk på å se hvordan risikoaversjon ville påvirke resultatene ble gjort ved å legge mer vekt på store, usikre kostnader og mindre vekt på små, sikre kostnader. Alle forsinkelseskostnader for 1 tidsenhet på 50 000 kr. ble redusert til 30 000 kr. og $K(1,2)$ var lik 15 000 kr. Sannsynlighetene for å gå til "utblåsning" og "platformskade" ble multiplisert med 2 i værtilstand 2 og 3 i værtilstand. Eneste endring fra forrige plan ble at beslutning om å gå til "venting" fra "rotasjon" skulle tas for værutviklingene 13, 23 og 33. Det har altså hittil ikke vært lønnsomt å

trekke borestrengen.

Simplexkriteriet for $z_{2u}(3)$ var for alle u i dette tilfellet for store til at det kunne bli optimalt å ta noen $z_{2u}(3)$ inn i basis bare med små datavariasjoner. Med daværende kostnadsstruktur ville det dermed ikke kunne bli lønnsomt å trekke borestrengen. Å trekke borestrengen er både en operasjon som må gjøres før vi kan gå til "overlevelse" eller "forlatt borested" og en operasjon som innimellom må gjøres av boretekniske årsaker. Det er en svakhet ved modellen at den ikke skiller mellom de to tilfellene, fordi forsinkelseskostnadene åpenbart ikke kan være de samme. Modelltilstanden "trekk-bor" medfører økt utblåsningsrisiko i begynnelsen og "faller mellom to stoler", fordi den kan ha to ulike hensikter. På den ene siden vil en trekke boret av boretekniske årsaker når det er pent vær og på den andre siden av nødhensyn når det er (blir) dårlig vær.

I modelleksempelet er "trekk-bor" en for stor tapsbarriere å overstige for å komme til sikrere tilstander til at den vil fungere som ledd i et defensivt tiltak. Dette kan bare skyldes at modellen ikke er god nok.

Når borestrengen trekkes av boretekniske årsaker er det ikke rimelig at forsinkelseskost påløper. Derfor ble en kjøring med $K(2,3)=K(3,3)=K(3,4)=0$ prøvd. Det ga ingen forandring av optimal plan. Men hvis utblåsningsrisikoen i den første delen av operasjonen (overgang 2 - 3) ble redusert med ca 25% skulle boret trekkes for værutvikling 22. "Trekk-bor"-tilstanden ville da fungere som en (urealistisk) kombinasjon av nødvendighet og nødhandling. I og med at det aldri ble aktuelt å trekke borestrengen av nødhensyn, var det heller ikke aktuelt å være i "overlevelse" eller "forlatt borested". Risikoreduksjonen ved å forlate borestedet var ikke nok til at det ville kunne oppveie ekstra forsinkelseskostnader. Med det dårlige datagrunnlaget for tilstandene 4 og 5 var det heller ikke mulig å modellere disse bedre.

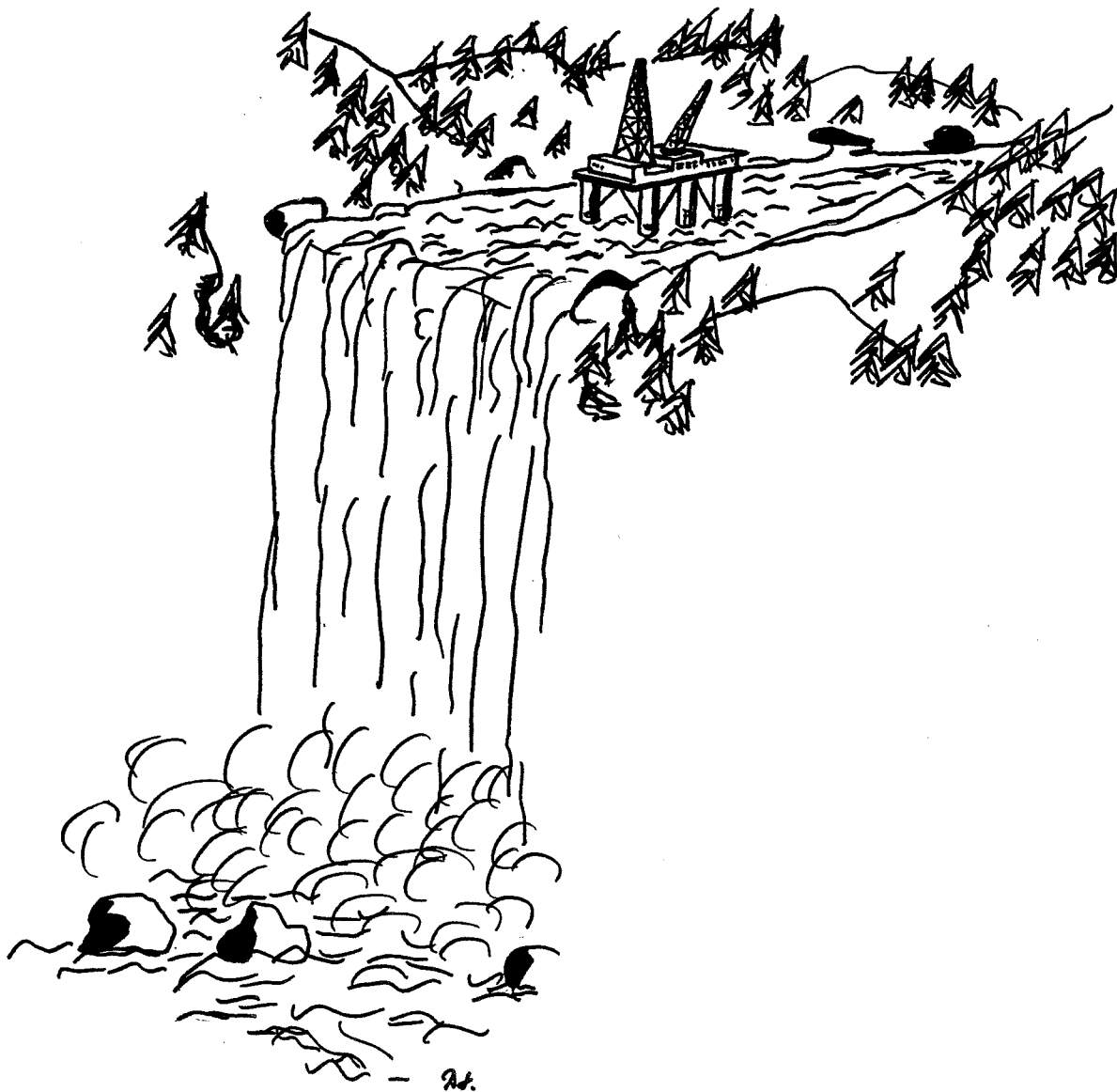
Som tidligere nevnt ble det aldri lønnsomt å klippe borestrengen. Denne regelen var egentlig gitt på forhånd, fordi kostnaden forbundet med denne handlingen (25 mill. kr.) er svært mye mer dominerende enn utblåsningsrisikoen. I praksis vil heller aldri borestrengen klippes bare fordi boret setter seg fast. Hvis derimot et tilbakeslag oppstår mens boret sitter fast, kan handlingen være lønnsom. Tilbakeslag inngikk ikke som tilstand, slik at modellen var for grov til å fange opp dette. Hvis "bor-fast"-tilstanden betinges mhp. at tilbakeslag har inntruffet i tillegg, kan modellen likevel gi noe informasjon.

Hvis utblåsningssannsynligheten i "bor-fast/tilbakeslag" var større enn 0.01 ville det være lønnsomt å klippe borestrengen og forlate borestedet. Dette baserte seg på at forventet oppholdstid i tilstanden fremdeles var 5 dager. Men forandringen vi gjorde medfører at avklaring av situasjonen vil skje raskere. Med forventet oppholdstid lik 6 timer måtte tilsvarende sannsynlighet være større enn 0.2. Sårbarheten når boret sitter fast er stor, slik at utblåsningssannsynlighet gitt tilbakeslag trolig er stor, f.eks. omkring 0.2? Med den forandringen som ble gjort ble beslutnings 6 aktuell, men det ble ikke sett på hvordan vær-avhengigheten var.

Vi kan betrakte modellering av et system som opptegning av et kart på grunnlag av en begrenset informasjonsmengde. Løsning og følsomhetsanalyse av den typen som er gjort her har til hensikt å fortelle hvor godt kartet stemmer med terrenget, evt. hvor mye kartet må justeres for at overensstemmelsen skal bli tilfredsstillende. I dette tilfellet ga kartet svært liten informasjon, men prøvejusteringer fortalte at en grundigere analyse kan gi brukbar beskrivelse. Modelleksempelen har flere åpenbare svakheter, men en del av disse var ventet på forhånd. De justeringer som skulle til for å gi fornuftige resultater lå likevel innenfor de usikkerhetsgrenser som skyldtes dataene og manglende nyttefunksjoner.

Når det gjelder data er små sannsynligheter og store kostnader de mest usikre tallene. Men vi er nødt til å akseptere ganske store usikkerhet i slike tall. Derimot bør usikkerheten i "små" kostnader, dvs. kostnader som påløper med stor sannsynlighet kunne reduseres betraktelig. Et problem for modelleksempelen var at det ikke var klart hva som egentlig kunne betraktes som forsinkelse. I en grundigere analyse er det viktig å kartlegge nøyaktig de "små", hyppige kostnadene, fordi resultatene er mest følsomme for disse. Med det menes at variasjoner i små, sikre kostnader ga utslag som på en enkel måte kunne vurderes driftsøkonomisk. Variasjoner i prospekter med store kostnader og små sannsynligheter ga også utslag. Men betydningen av disse utslagene er uklar, fordi vi manglet kunnskap om ønskeligheten av slike prospekter. Følsomhet bør i denne sammenhengen også omfatte hvor entydig tolkningen av utslagene er, ikke bare utslagenes størrelse.

7. KONKLUSJONER,



- En katastrofe er lik energi pluss feilinformasjon.

(Turners katastrofelov)

7. KONKLUSJONER.

7.1. Problemformulering og teoriandvendelse.

7.1.1. Er problemstillingen fruktbar?

Denne oppgaven sprang ut av et utilfredsstilt behov, nemlig behovet for kvantitative, sammenliknende helhetsvurderinger av værbedingede, operasjonelle beslutninger ved offshore oljeboring. Oppgaven har tatt for seg én mulig angrepsmåte. Arbeidet viser at den ga forventede resultater, noe som derfor også bekrefter at problemstillingen var fornuftig.

Det er ingen prinsipielle og få praktiske hindringer for at en beslutningsanalyse av denne typen kan gjennomføres i praksis til operasjonelt bruk.

Derimot vil kvaliteten og anvendbarheten av slike analyser avhenge av at systemmodellene er svært gode.

Under er de viktigste erfaringene fra arbeidet oppsummert. De 3 faktorene som bidro mest til å hindre en bedre analyse av modelleksempelen:

- 1) Datamangel
- 2) Manglende nyttefunksjoner
- 3) Tilstandsinndelingen

De 3 faktorene som betyr minst, hvis analysen av modelleksempelen skulle forbedres:

- 1) Prosessbeskrivelsen (Markov beslutningskjede)
- 2) Antall værtilstander
- 3) LP-løsning

I resten av kapitlet behandles disse erfaringene mer detaljert.

7.1.2. Hvorfor Markovbeskrivelsen var hensiktsmessig.

Værprosessen forelå på forhånd modellert som Markovkjeder, og det begrenset valgmulighetene for operasjonsprosessmodellen. En ren Markovbeskrivelse ble valgt først og fremst pga. sin enkelhet. Nyttien av en mer avansert modell ville på ingen måte ha stått i forhold til økningen i kompleksitet og uoversiktighet.

Det er grunn til å tro at en ren Markovbeskrivelse vil være god nok også for grundigere og mer omfattende analyser enn denne.

Modellvalget må alltid samsvare med tilgjengelige data og en SemiMarkov beslutningsprosess vil kreve mye bedre data enn det det er realistisk å finne i dag.

Det som betyr noe for optimaliseringen er for hver tilstand de forventede kostnader ved å ta de ulike beslutningene og hvor ofte vi er i den beslutningssituasjonen, dvs. (stasjonær-)sannsynlighetene for å være i tilstanden. De forventede kostnadene (for ett beslutningstrinn) kan angis med samme nøyaktighet i modeller med forskjellig kompleksitet og detaljeringsgrad. Disse kostnadene, som er avhengige av små sviktsannsynligheter, kan antas å være mer usikre enn forskjellene i stasjonærsannsynligheter for forskjellige modeller. Dette tilsier altså valg av enkel modell. En annen konsekvens av den dominerende usikkerheten i forventede kostnader for et trinn ved å ta en gitt beslutning er at den samme usikkerheten reduserer betydningen av nøyaktighet i værdadataene.

Så lenge en modell er så grov som modelleksempelen og datagrunnlaget like dårlig, er resultatene lite følsomme for den relativt lille usikkerheten i værsannsynlighetene.

Det betyr at det for en så grov modell har liten betydning om vi bruker vind eller bølger eller en kombinasjon til å beskrive været. Det betyr ikke at forskjeller i vær eller klima på forskjellige geografiske steder har liten betydning for virksomhetene.

Hvis Dynamisk Programmering skal brukes, er en ikke avhengig av modeller av Markov, SemiMarkovtype o.l.. Det er da f.eks. mulig å la overgangsreglene variere både med tilstand og beslutningstrinn.

For korte tidshorisonter og svært detaljerte systembeskrivelser kan dette være nyttig å benytte seg av.

Det var naturlig å bruke en stokastisk beslutningsprosess for problemer av den typen oppgaven tok opp. Men det er også mulig å gjøre en grov, kvantitativ beslutningsanalyse uten noen prosessbeskrivelse. Det kan gjøres ved å betrakte beslutningsvalg i alle tilstander som engangvalg, hvor en ser på konsekvensene noen få tidsenheter fram. En får da ett beslutningstre for hver tilstand. Prisen for forenklingen er at mange kostnader må bestemmes ved antagelser og fornuftige gjetninger. En slik analyse kan bare ta mål av å frambringe gode beslutninger, ikke optimale beslutninger.

7.1.3. Om informasjonsgrunnlaget og tilstandsdefinisjoner.

Beslutningsgrunnlaget i modelleksempelen er minimum av hva som er nødvendig for å gjøre en meningsfull analyse. At værtilstanden inngikk som eneste tilstandsvariabel i tillegg til operativ tilstand skyldes at den er en spesielt viktig risikofaktor og at den er rimelig enkel å modellere. Dessuten var det mulig å finne brukbare kvantitative sammenhenger mellom været og ulykkesfrekvenser. Tilstandsbeskrivelsen måtte gjøres såvidt enkel for at alle ledd i problembehandlingen kunne gjennomføres på kort tid.

For modelleksempelen var det gunstig å la beslutningsmengden være en delmengde av tilstandsmengden. Det både forenklet formuleringen og muliggjorde oversiktlig grafisk presentasjon av beslutningsprosessen.

Mulige beslutninger i modellen var dermed stort sett bestemt ved valget av tilstandsvariable. Selv om modelleksempelen var enkelt, ga det informasjon om modell og metode som ventet.

Det er trolig fornuftig å velge samme beslutningsstruktur også for andre problemer der det er mulig.

Det stiller litt spesielle krav til tilstandsdefinisjonene og begrepet tilstand må gis et veldefinert innhold. De tilstandene som kan nås ved bevisste, aktive handlinger vil da utgjøre beslutningsmengden.

Den viktigste erfaringen fra modelleringsfasen er at det tidlig i arbeidet må etableres kriterier for valg av modelltilstander.

Det må stilles spørsmål om hva tilstandene er ment å avbilde.

Slike kriterier vil være spesielle for hvert enkelt problem og vil måtte settes opp på grunnlag av:

- 1) hvilken fase av aktiviteten som studeres,
- 2) hvilke beslutninger analysen skal fokuseres på,
- 3) hvilke tilstandsvariable (beslutningsgrunnlag) beslutningene krever
- 4) datagrunnlaget for tilstandsvariablene.

I tillegg til kravet om talldata, er det også nødvendig med beskrivelser av systemene/aktivitetsfasene som skal modelleres. For oljeaktiviteten er det stor mangel på slike beskrivelser myntet på andre enn fagfolk innen oljeindustrien.

Når det gjelder kostnadsdata er det viktigst å kartlegge de "små", hyppige kostnader nøyaktig, framfor de store, sjeldne.

Denne konklusjonen sier det motsatte av hva som er vanlig for risikoanalyser, men i en beslutningsanalyse settes risiko for store, sjeldne tap opp mot mindre, hyppige tap. Resultatene er mest følsomme for den siste tapstypen.

Tilstandsinndelingen for værprosessen ble utelukkende bestemt av tilgjengelige værdata. Allerede i utgangspunktet var det klart at inndelingen var for mye forskjøvet mot pent vær. To eksempler på muligens bedre tilstandsinndelinger:

Vindtilstand 1: <14 m/s	Bølgetilstand 1: < 4 m
" 2: 14.0-20.7 m/s	" 2: 4.0-6.9 m
" 3: >20.7 m/s	" 3: >6.0 m

Selv om det finnes værdata for en bedre tilstandsinndeling er en fremdeles avhengig av å kjenne sviktsannsynligheter som er betinget mhp. nettopp disse tilstandene.

Dette vil være et større problem jo flere tilstandsvariable modellen har, fordi vi er avhengige av at betingelsene for dataene samsvarer med modelltilstandene.

Det bør være et mål å få bedre kunnskap om sammenhengen mellom ulike værfaktorer og menneskers/utstyrs tendens til å feile. Det er også nødvendig å vite mer om hvilke værfaktorer som betyr mest i ulike situasjoner. Dette vil bidra til bedre tilstandsinndelinger for værprosessen og værbetingede sviktsannsynligheter.

7.1.4. Behovet for kvantitative nyttevurderinger.

Det som ble minimert for modelleksempelet var forventede kostnader. Holdningen til risiko (nyttevurderingen) sies da å være risikonøytral. Risikonøytrale beslutningsanalyser fører til for dristige beslutninger hvis beslutningstakeren egentlig har risikoaversjon. Penger var den dominerende tapstype, slik at denne nyttevurderingen her har få moralske og politiske sider. Men selv med penger som eneste tapstype er holdningen til risiko avgjørende for beslutningsvalgene.

Nyttevurderingen av risiko er så betydningsfull at de fleste tallvariasjoner som ble gjort i følsomhetsanalysen kan oppfattes som variasjoner i nyttevurdering.

Det er ikke urimelig å anta at usikkerheten i resultater pga. manglende kvantitative nyttefunksjoner er av samme størrelsesorden som datausikkerheten.

En måte å ta nyttevurderinger med i analysen er, som nevnt ovenfor, å se hvor følsomme resultatene er for variasjoner i vurderingen. Det bør likevel være et mål å kartlegge og systematisere den informasjon som allerede finnes om holdninger til risiko. I tillegg bør det også være et mål å finne fram til kvantitative nyttefunksjoner for de aller mest aktuelle tapstyper. Slik kunnskap vil være til fordel både for faglige studier og offentlig debatt om sikkerhetsspørsmål.

7.2. Løsningsmetode og resultat anvendelse.

7.2.1. Om strategiske beslutninger.

En av forskjellene mellom strategiske og operasjonelle beslutninger er at strategiske beslutninger tas for å oppfylle langsiktige mål, de representerer ofte engangsvalg. Et eksempel på strategisk beslutning er at Stortinget fattet vedtak om å starte leteboring etter olje på Haltenbanken og Tromsøflaket. Beslutningsgrunnlaget for dette vedtaket er et annet enn for beslutningsvalget trekke borestreng/ikke trekke borestreng.

Til tross for at ulike hensyn skal tas ved strategiske og operasjonelle beslutninger, bærer den operasjonelle beslutningsanalysen i seg informasjon til mer langsiktige vurderinger.

En optimalisering som den som er gjort her produserer den beste planen vi kan følge, gitt at aktiviteten skal pågå. Modellen og planen kan brukes til å beregne hvordan aktiviteten vil forløpe. Selv om vi følger en optimal plan er det mulig at aktiviteten ikke vil forløpe som ønsket. Optimal plan kan f.eks. være så defensiv at aktiviteten vil bli ulønnsom. Den kan også være så dristig at risikonivået er uakseptabelt for samfunnet (når planen er subjektivt optimal for operatørselskapet).

Et viktig biprodukt av en operasjonell beslutningsanalyse er derfor at optimal plan også kan gi informasjon om prinsipielle sider ved aktiviteten.

Fordi konsekvensene av strategiske beslutninger er svært mye større enn for operasjonelle beslutninger, vil denne anvendelsen kreve en tilsvarende grundigere analyse.

7.2.2. Om hjelpesystem for beslutninger.

En beslutningsregel er en entydig tilordning mellom en tilstand og en handling. Den forutsetter at det for enhver tenkelig situasjon på forhånd er bestemt hva som skal videre gjøres. Det finnes neppe noen virkelig beslutningssituasjon hvor beslutningstakeren er eller bør være konsekvent i sine valg. Konsekvente beslutninger forutsetter at modellen som bragte

fram reglene tok hensyn til alle tenkelige situasjoner. Teorien bygger på at det er tilfelle. Derfor er det grunnleggende, om enn banalt, å huske på at det er modellen som optimaliseres og ikke selve systemet. Modellen vil alltid bare kunne avbilde deler av virkeligheten. "Skrivebordsbeslutninger" som er resultat av teoretisk beregnede regler kan kalles modelloptimale. Det vi ønsker er systemoptimale beslutninger. Det kan vi ikke oppnå med et modellverktøy alene. Derfor vil det i praksis alltid være nødvendig med mennesker som griper inn der modellen kommer til kort. Regler som følges konsekvent har den fordel at de ikke påvirkes av situasjonsbestemte, subjektive oppfatninger, som lett påvirkes av uvesentligheter og forstyrrelser. På den annen side er det helt klart at regler ikke alltid kan følges konsekvent, fordi reglene ikke kan omfatte alle mulige situasjoner.

Hvis beslutningsanalyse skal kunne brukes som et styringsverktøy under operasjonelle forhold er det derfor grunnleggende å fastlegge hvordan beslutningsreglene skal brukes.

Vi kan dele bruken i 3 modt: 1) reglene følges ukritisk, 2) reglene brukes sammen med tilleggsinformasjon, erfaring og intuisjon og 3) reglene settes ut av kraft. At en bruksmodus er gitt betyr at en overordnet regel på en eller annen måte angir når beslutningsreglene skal brukes nettopp på denne måten.

Hvis vi har en beslutningsmodell tilgjengelig under operasjon av et system og veldefinerte bruksmodi for beslutningsreglene, har vi det som kalles Hjelpesystem for beslutninger (DSS = Decision Support System).

Hensikten med DSS er å bruke de beste egenskapene til mennesket/ beregningsmodellen og unngå de dårlige, dvs. en slag spesialisering i henhold til kompetanse. Måten tilleggsinformasjon kombineres med modelloptimale beslutninger på er bestemt av hvordan DSS er laget.

Modelloptimale beslutninger har blitt oppfattet som én ingrediens i et DSS, selv om den anvendelsen mer er en idé enn virkelighet i dag. Resultatene for modelleksempelen hadde likevel bare til hensikt å trekke konklusjoner av den typen som er gjort. Arbeidet viser at modellen og metoden som ble demonstrert på modelleksempelen kan brukes

som regneverktøy i et DSS. Denne oppgaven gir ikke grunnlag for noen utfyllende diskusjon av resultat anvendelser for operasjonelle beslutningsanalyser. Det bør skje i prosjekter som spesielt tar opp det.

7.2.3. Løsningsmetoder.

Lineær Programmering (LP) er en av de mest utbredte metoder til optimalisering under lineære begrensninger. Metoden har flere fordeler som betyr mye hvis den skal brukes som regneverktøy i et hjelpesystem for beslutninger (DSS). Algoritmens effektivitet er lite følsom for problemets størrelse og den er spesielt høy for beslutningsprosesser. Grunnen er at den arbeider seg raskere fram til optimal løsning når begrensningene er strenge (mulighetsområdet er lite). Beslutningsprosesser har ingen ulikheter, bare likninger som begrensninger, noe som reduserer mulighetsområdet sterkt. Dessuten er det svært mange av variablene som på forhånd kreves lik null.

I et DSS vil optimalisering skje regelmessig.

LP er godt egnet for gjentatte optimaliseringer, spesielt når optimal plan endrer seg relativt lite fra gang til gang.

Algoritmen må alltid forsynes med en startløsning og hvis siste plan brukes, vil bare noe få iterasjoner være nødvendige for å finne oppdatert plan. Gode muligheter for følsomhetsanalyse øker anvendbarheten av metoden i et DSS, f.eks. i de situasjoner tilleggsinformasjon må innhentes. Den viktigste ulempen er arbeidet med å formattere inngangsdata til løsningsprogrammer.

For problemer med endelig tidshorizont må Dynamisk Programmering (DP) brukes. Metoden er mindre effektiv enn LP og betraktelig mer følsom for problemets størrelse. DP er imidlertid en mer generell metode enn LP og kan brukes på mer kompliserte problemstrukturer enn Markov/Semi-Markovmodellene. DP problemer kan ofte omformuleres til LP-problemer (av annen type enn LP-problemet for uendelig tidshorizont). Plan-iterasjon er en metode spesielt for beslutningsprosesser. Det burde være interessant og fruktbart å implementere metoden på datamaskin og sammenlikne den med LP.

8. REFERANSER.

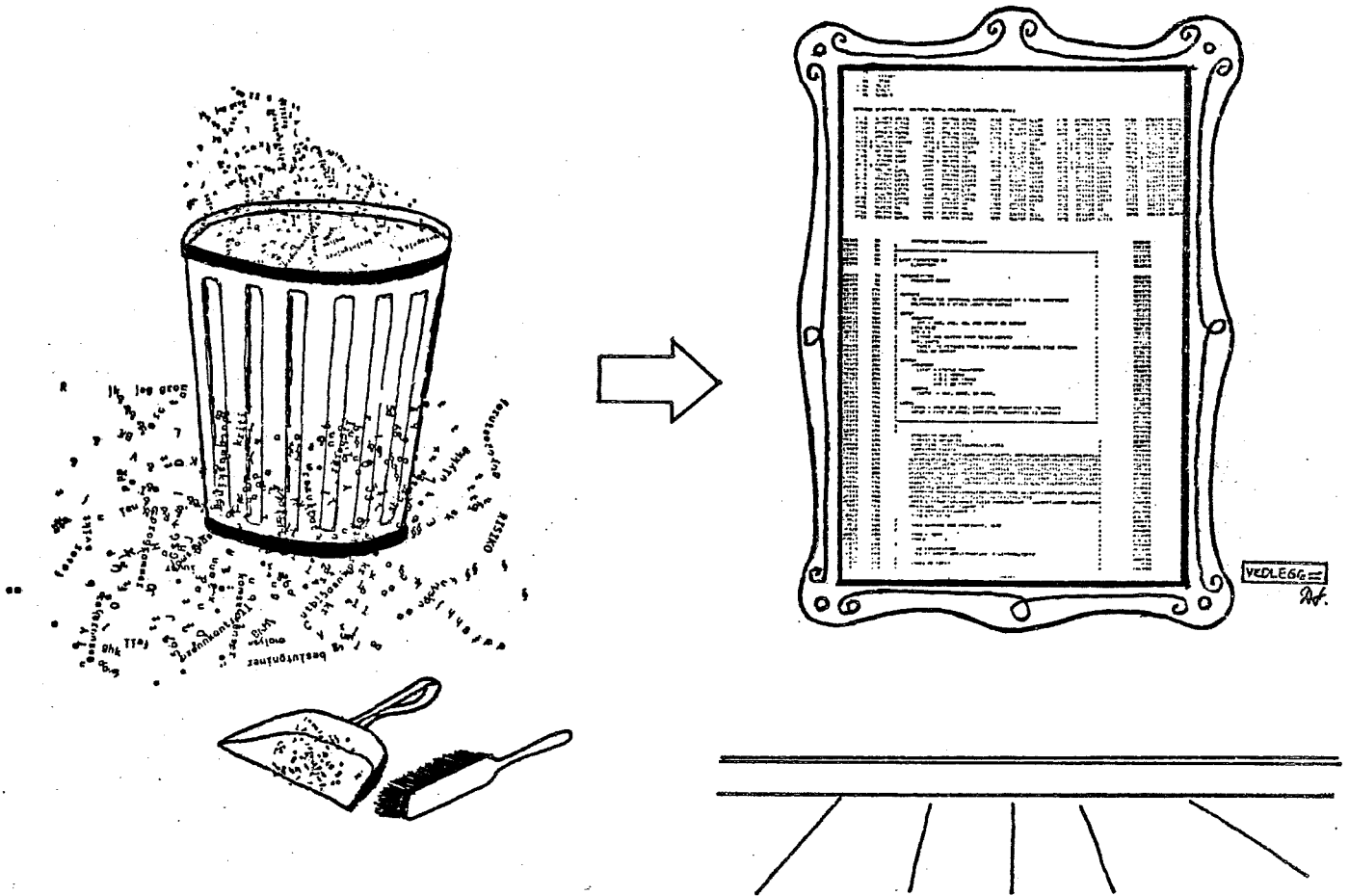
- /1/ Hovden,J.: "Vurdering av ulykkesrisiko", Tapir, Trondheim 1979.
- /2/ Keeney,R.L. & Raiffa,H.: "Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs", John Wiley & Sons, New York 1976.
- /3/ Moan,T.: "Risk assessment of mobile rig operations", Rapport SK/R 46, Institutt for marine konstruksjoner, Trondheim 1979.
- /4/ "Risikovurdering - en undersøkelse av risikonivåer innen petroleumsvirksomheten på norsk sokkel", Rapport Nr.26-27/3 i "Sikkerhet på sokkelen"-programmet.
- /5/ Bercha,F.G. & Ass. Ltd.: "Probabilities of blowouts in Canadian arctic waters", Report EPS 3-EC-78-12 of the Environment Canada AMOP Program, 1978.
- /6/ "Hyppighet av ukontrollerte utblåsninger i Nordsjøbassenget", Rapport Nr. 73/2 i "Sikkerhet på sokkelen"-programmet, Trondheim 1980.
- /7/ Huff,J.R.: "Rig casualties - statistics and analysis", Proceedings, Offshore North Sea, 1974.
- /8/ Håland,L.: "Bidrag til beskrivelse av klimaet på kontinental-sokkelen", Det Norske Meteorologiske Institutt, Sci.rep. 18, Oslo 1978.
- /9/ "Risiko for utblåsning på norsk kontinentalsokkel", Norges Offentlige Utredninger NOU 1979:8, Universitetsforlaget, Oslo 1979.
- /10/ Eidsvik,K.J.: "Identification of models for some time series of atmospheric origin with Akaike's Information Criterion", Journal of Applied Meteorology, Vol 19, No4 1980.
- /11/ Brev av 3. oktober 1980 fra Det Norske Meteorologiske Institutt.
- /12/ "Aker H3 Operations Manual", Akergruppen.
- /13/ Palmer,J & Edström,L.: "Offshore", Styrelsen för teknisk utveckling, STU-informasjon nr. 118 - 1979.

- /14/ Westergaard, R.H. et.al.: "Blowout Barriers for Schedules Operations", SI-report 231-771105, Oslo 1979.
- /15/ Howard, R.A.: "Dynamic Probabilistic Systems" Vol II, John Wiley & Sons Inc., New York 1971.
- /16/ Ross, S.M.: "Applied Probability Models With Optimization Applications", Holden-Day, San Fransisco 1969.
- /17/ Fredrikson, G.: "Beslutningsanalyse. Anvendelser av dynamisk programmering", SI-rapport 80587-1, Oslo 1980.
- /18/ Danforth, L.J.: "Environmental Constraints on drill rig configurations", Marine Technology, Vol 14, No.3 1977.
- /19/ Edwards, G.T.: "The variability of failure data", UK Atomic Energy Authority, Culchet Warrington 1979.
- /20/ Moore, P.L.: "Drilling Practices Manual", The Petroleum Publishing Co., Tulsa 1974.
- /21/ Snider, W.D. et.al.: "Management of Mid-Atlantic offshore development risks", Marine Technology, Vol 14, October 1977.
- /22/ "Tables on major and minor mobile rig mishaps", Ocean Industry, March 1977.
- /23/ Phillips, D.T.: "Operations Research: Principles and Praticce", John Wiley & Sons Inc., New York 1976.
- /24/ "Functional Mathematical Programming System (FMPS). Programmers Reference", Sperry Univac 1100-series, Sperry Rand Corporation 1977.
- /25/ Nygreen, B.: "Kort om standardprogrammer for Lineær Programmering, med eksempler fra FMPS", Institutt for sosialøkonomi, Trondheim 1979.
- /26/ Nygreen, B.: "Dynamisk Programmering. En elementær innføring", Institutt for sosialøkonomi, Trondheim 1979.

Kilder som det ikke er referert til i teksten:

- /27/ Hernes,G.: "Hvorfor alt går galt og andre lover for det moderne menneske", Universitetsforlaget, Oslo 1980.
- /28/ Westergaard,R.H.: "Underwater blowout", Environment International, Vol. 3, 1980.
- /29/ "Contingency Plan - SEDCO 707", Saga Petroleum A/S.
- /30/ "Contingency Plan - BYFORD DOLPHIN", Saga Petroleum A/S.
- /31/ "Floating drilling operations manual, 1977", Statoil.
- /32/ "Well killing work sheet", Phillips Petroleum Company of Norway.

9. VEDLEGG,



- Ta vare på data,
det viser at du har arbeidet.

(Finagles 3. forskningsregel)

Vedlegg 1. Overgangssannsynligheter for værprosessen.

(Basert på observasjoner fra værskipet "Polarfront")

VAERINDIKATOR: BOELGER-VINTER MODELL: 3. ORDENS MARKOVKJEDE			
UTVIK- LING SISTE 3 TRINN	NESTE VAERTILSTAND		
	1	2	3
111	0.83	0.17	0.00
112	0.12	0.85	0.03
113	0.00	0.29	0.71
121	0.75	0.24	0.01
122	0.10	0.85	0.05
123	0.00	0.07	0.93
131	0.33	0.33	0.33
132	0.00	1.00	0.00
133	0.00	0.13	0.87
211	0.79	0.21	0.00
212	0.13	0.81	0.06
213	0.00	0.00	1.00
221	0.75	0.24	0.01
222	0.05	0.90	0.05
223	0.01	0.19	0.81
231	0.67	0.33	0.00
232	0.05	0.98	0.07
233	0.01	0.19	0.80
311	0.71	0.29	0.00
312	0.08	0.75	0.17
313	0.00	0.00	1.00
321	0.54	0.38	0.08
322	0.08	0.84	0.08
323	0.00	0.21	0.79
331	0.61	0.33	0.06
332	0.07	0.80	0.13
333	0.01	0.15	0.84

VAERINDIKATOR: VIND - SOMMER MODELL: 3. ORDENS MARKOVKJEDE				VAERINDIKATOR: VIND - VINTER MODELL: 3. ORDENS MARKOVKJEDE			
UTVIK- LING SISTE 3 TRINN	NESTE VAERTILSTAND			UTVIK- LING SISTE 3 TRINN	NESTE VAERTILSTAND		
	1	2	3		1	2	3
111	0.91	0.09	0.00	111	0.81	0.19	0.00
112	0.29	0.70	0.01	112	0.21	0.68	0.01
113	0.00	0.25	0.75	113	0.03	0.26	0.71
121	0.70	0.30	0.00	121	0.69	0.28	0.03
122	0.19	0.79	0.02	122	0.13	0.73	0.14
123	0.06	0.38	0.56	123	0.03	0.24	0.73
131	0.33	0.33	0.33	131	0.50	0.50	0.00
132	0.25	0.75	0.00	132	0.05	0.69	0.26
133	0.00	0.14	0.86	133	0.00	0.16	0.84
211	0.85	0.15	0.00	211	0.73	0.24	0.03
212	0.31	0.68	0.01	212	0.22	0.69	0.09
213	0.00	0.67	0.33	213	0.03	0.25	0.72
221	0.76	0.24	0.00	221	0.67	0.31	0.02
222	0.15	0.82	0.03	222	0.14	0.74	0.12
223	0.01	0.38	0.61	223	0.01	0.31	0.68
231	1.00	0.00	0.00	231	0.33	0.50	0.17
232	0.06	0.87	0.07	232	0.08	0.70	0.22
233	0.00	0.42	0.58	233	0.01	0.25	0.74
311	0.50	0.50	0.00	311	0.66	0.30	0.04
312	0.33	0.33	0.33	312	0.09	0.82	0.09
313	0.33	0.33	0.33	313	0.00	0.14	0.86
321	0.92	0.08	0.00	321	0.67	0.30	0.10
322	0.16	0.76	0.08	322	0.13	0.71	0.16
323	0.00	0.62	0.38	323	0.00	0.33	0.67
331	1.00	0.00	0.00	331	0.48	0.39	0.13
332	0.06	0.85	0.09	332	0.10	0.67	0.23
333	0.01	0.29	0.70	333	0.01	0.18	0.81

VAERINDIKATOR: BOELGER-SOMMER MODELL: 2. ORDENS MARKOVKJEDE				VAERINDIKATOR: BOELGER-VINTER MODELL: 2. ORDENS MARKOVKJEDE			
UTVIK- LING SISTE 2 TRINN	NESTE TILSTAND			UTVIK- LING SISTE 2 TRINN	NESTE TILSTAND		
	1	2	3		1	2	3
11	0.90	0.10	0.00	11	0.822	0.178	0.000
12	0.17	0.83	0.00	12	0.122	0.839	0.040
13	0.00	0.00	1.00	13	0.000	0.000	1.000
21	0.83	0.17	0.00	21	0.738	0.248	0.014
22	0.09	0.90	0.01	22	0.054	0.894	0.051
23	0.00	0.28	0.72	23	0.008	0.187	0.813
31	1.00	0.00	0.00	31	0.619	0.330	0.051
32	0.05	0.90	0.05	32	0.066	0.816	0.118
33	0.01	0.27	0.72	33	0.010	0.157	0.832
STASJ. SANNS.	0.48	0.50	0.02	STASJ. SANNS.	0.194	0.609	0.197
VAERINDIKATOR: VIND - SOMMER MODELL: 2. ORDENS MARKOVKJEDE				VAERINDIKATOR: VIND - VINTER MODELL: 2. ORDENS MARKOVKJEDE			
UTVIK- LING SISTE 2 TRINN	NESTE TILSTAND			UTVIK- LING SISTE 2 TRINN	NESTE TILSTAND		
	1	2	3		1	2	3
11	0.904	0.096	0.000	11	0.793	0.201	0.006
12	0.295	0.695	0.010	12	0.211	0.692	0.097
13	0.333	0.333	0.333	13	0.027	0.242	0.731
21	0.744	0.256	0.000	21	0.674	0.303	0.029
22	0.157	0.814	0.030	22	0.137	0.735	0.128
23	0.012	0.399	0.588	23	0.010	0.308	0.683
31	1.000	0.000	0.000	31	0.449	0.417	0.134
32	0.060	0.858	0.082	32	0.093	0.679	0.227
33	0.007	0.334	0.659	33	0.010	0.193	0.795
STASJ. SANNS.	0.594	0.378	0.029	STASJ. SANNS.	0.276	0.444	0.280

Vedlegg 2. Overgangssannsynligheter for operasjonsprosessen ($q_{ij}(a,v)$).
(i prosent)

$\begin{matrix} j \\ i-a \ v \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1-1 1 2 3	99.9595 99.9278- 99.8094						0.0400 0.0660 0.1400	0.0000 0.0050 0.0450	0.0005 0.0012 0.0056
1-2		99.9998 99.9944 99.9522						0.0000 0.0050 0.0450	0.0003 0.0006 0.0028
2-1	99.9995- 99.9938 99.9494							0.0000 0.0050 0.0450	0.0005 0.0012 0.0056
2-2		99.9998 99.9944 99.9522						0.0000 0.0050 0.0450	0.0003 0.0006 0.0028
2-3			99.9985 99.9914 99.9362					0.0000 0.0050 0.0450	0.0015 0.0036 0.0168
3-4			0.0000 20.0000- 50.0000	99.9995 79.9938- 49.9494				0.0000 0.0050 0.0450	0.0005 0.0012 0.0056
4-2		99.9998 99.9944 99.9522						0.0000 0.0050 0.0450	0.0003 0.0006 0.0028
4-4				100.0000 100.0000 99.9950				0.0000 0.0000 0.0050	
4-5					100.0000 100.0000 99.9950			0.0000 0.0000 0.0050	
5-4				25.0000 25.0000 24.9950	75.0000 75.0000 75.0000			0.0000 0.0000 0.0050	
5-5					99.9999 99.9999 99.9999				0.0001 0.0001 0.0001
6-1	100.0000 100.0000 100.0000								
7-1	4.1200 2.4620- 2.3850						95.0000 97.5000 97.5000	0.0000 0.0050 0.0450	0.0200 0.0330 0.0700
7-6						100.0000 100.0000 100.0000			
8-1	100.0000 100.0000 100.0000								
9-1	100.0000 100.0000 100.0000								

Tomme ruter: umulige overganger.

Vedlegg 3. Overgangskostnader $(K(i,j))$.
(i 1000 kroner)

i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	25					50	51500	62000
2	0	50	50					51500	62000
3	0		50	50				51500	62000
4		50		50	50			51500	62000
5				50	50			51500	0
6	0								
7	0					25000	50	51500	62000
8	0								
9	0								

Tomme ruter: umulige overganger.

Vedlegg 4. Forventede, beslutningsbetingede kostnader (C(i,u,a)), (i mill. kr).

operativ tilst.(i)	værlst. (u)	Beslutning(a)					
		1	2	3	4	5	6
1	1	0.000330	0.025155				
1	2	0.003352	0.027946	X	X	X	X
1	3	0.026717	0.049899				
2	1	0.000310	0.050155	0.050929			
2	2	0.003319	0.052944	0.054803	X	X	X
2	3	0.026647	0.074887	0.083560			
3	1				0.050310		
3	2	X	X	X	0.053316	X	X
3	3				0.076622		
4	1		0.050155		0.050000	0.050000	
4	2	X	0.052944	X	0.050000	0.050000	X
4	3		0.074887		0.052572	0.050000	
5	1				0.050000	0.050000	
5	2	X	X	X	0.050000	0.050000	X
5	3				0.052572	0.050000	
6	1						
6	2		X	X	X	X	X
6	3						
7	1	0.060300					25.000000
7	2	0.071785	X	X	X	X	25.000000
7	3	0.115325					25.000000
8	1						
8	2		X	X	X	X	X
8	3						
9	1						
9	2		X	X	X	X	X
9	3						

X: umulig beslutning.

Tomme ruter: 0

Vedlegg 5. Styreprogram for FMPS-løsning.

```
C.      ***** STYREPROGRAM *****
C.
C.      KALLER FMPS LP-MODUS:
C.      CALL ENTER(LP)
C.
C.      TILDELING AV SETNINGSNR. FOR INVERTERING AV BASISMATRISEN:
C.      ASSIGN 100 TO KINV
C.
C.      DATASETTETS NAVN:
C.      ADATA='WELLDONE'
C.
C.      INNLESING AV DATASETTE SOM FOELGER ETTER STYREPROGRAMMET:
C.      CALL INPUT
C.
C.      MAALFUNKSJONENS NAVN:
C.      AOBJ='KOSTNAD'
C.
C.      HOEYRESIDENS NAVN:
C.      ARHS='HS'
C.
C.      MAALFUNKSJONEN SKAL MINIMERES:
C.      FDBJWT=1.0
C.
C.      NULLTOLERANSE FOR FORBEDRING AV LOESNING:
C.      FDJZT=1.0D-25
C.
C.      NULLTOLERANSE FOR MULIG BASIS:
C.      FINFZT=1.0D-35
C.
C.      ABSOLUTT NULLTOLERANSE:
C.      FABSZT=1.0D-25
C.
C.      NULLTOLERANSER VED INVERTERING OG PIVOTERING:
C.      FMINVT=1.0D-30
C.      FMPIVT=1.0D-30
C.
C.      OPTIMALISERING OG RAPPORTERING:
C.      CALL OPTIMIZE
C.      CALL SOLUTION
C.
C.      STOP
C.
100 CALL INVERT
RETURN
END
```

Vedlegg 6. Utdrag av FMPS-databildeserie.

Angivelse av navn på problem.

Angivelse av navn på begrensningene

Angivelse av navn på variablene og spesifisering av alle positive matrise-elementer.

Angivelse av høyresidene

Avslutning

NAME	WELLDONE
ROWS	
N KOSTNAD	
E LVEKT 11	
E LVEKT 12	
E LVEKT 13	
E LVEKT 14	
E LVEKT 15	
E LVEKT 16	
E LVEKT 17	
E LVEKT 18	
E LVEKT 19	
E LVEKT 21	
...	
E BSLUT 93	
E BSLUT 94	
E BSLUT 95	
E BSLUT 96	
E BSLUT 97	
E BSLUT 98	
E BSLUT 99	
E NORMER	
COLUMNS	
Z111 KOSTNAD	0.0003101
Z111 LVEKT 11	-0.2070071
Z111 LVEKT 12	0.2009982
Z111 LVEKT 13	0.0059999
Z111 LVEKT 21	0.7929960
Z111 LVEKT 22	0.2009990
Z111 LVEKT 23	0.0060000
Z111 LVEKT 61	0.7930000
Z111 LVEKT 62	0.2010000
Z111 LVEKT 63	0.0060000
Z111 LVEKT 71	-0.0063440
Z111 LVEKT 72	-0.0016080
Z111 LVEKT 73	-0.0009480
...	
Z111 LVEKT 81	0.7930000
Z111 LVEKT 82	0.2010000
Z111 LVEKT 83	0.0060000
Z111 LVEKT 91	0.7930000
Z111 LVEKT 92	0.2010000
Z111 LVEKT 93	0.0060000
Z111 NORMER	1.0000000
Z112 KOSTNAD	0.0150310
Z112 LVEKT 11	-1.0000000
Z112 NORMER	1.0000000
Z113 KOSTNAD	0.0000000
Z113 LVEKT 11	-1.0000000
Z113 BSLUT 11	1.0000000
Z113 NORMER	1.0000000
Z114 KOSTNAD	0.0000000
Z114 LVEKT 11	-1.0000000
...	
Z995 BSLUT 99	1.0000000
Z995 NORMER	1.0000000
Z996 KOSTNAD	0.0000000
Z996 LVEKT 99	-1.0000000
Z996 BSLUT 99	1.0000000
Z996 NORMER	1.0000000
RHS	
HS	NORMER 1.0
ENDATA	
NAME	ZZZZZZZZ
ENDATA	

Vedlegg 7. Program til standardisering av LP-problem og oppsetting av FMPS-databilder.

```
1* C PROGRAM: SETTLP
2* C
3* C HENSIKT: LESE INN DATA FOR MODELLEKSEMPELET, STANDARDISERE LP-
4* C FORMULERINGEN OG SETTE OPP DATABILDER FOR FMPS-PAKKEN.
5* C
6* C COMMON /LIM/ NX,NU,NA
7* C
8* C REAL P(9,3),Q(9,9,6,3),K(9,9),C(486)
9* C
10* C FMPS-DATABILDER LAGRES PAA FILEN "DATABILDER":
11* C OPEN(8,FILE='DATABILDER',ACCESS='RW',ERR=990)
12* C
13* C NX=ANTALL OPERATIVE TILSTANDER:
14* C NX=9
15* C
16* C NU=ANTALL VAERUTVIKLINGER:
17* C NU=9
18* C
19* C NA=ANTALL BESLUTNINGER:
20* C NA=6
21* C
22* C INNLESNING AV DATA (SANNSYNLIGHETER OG KOSTANDER):
23* C CALL DATA(Q,P,K)
24* C
25* C STANDARDISERING AV MAALFUNKSJONEN:
26* C CALL FKOST(Q,K,C)
27* C
28* C OPPSETTING AV DATABILDER SOM ANGIR LINJENAVN I LP-PROBLEMETS
29* C BEGRENSNINGSMATRISER:
30* C CALL ROWS
31* C
32* C STANDARDISERING AV BEGRENSNINGSMATRISER OG OPPSETTING AV DATABILDER
33* C SOM ANGIR ELEMENTENE I MATRISER OG NAVN PAA VARIABLENE:
34* C CALL COLUMNS(P,Q,C)
35* C
36* C OPPSETTING AV DATABILDER SOM ANGIR HOEYRESIDENE I BEGRENSNINGS-
37* C MATRISER:
38* C CALL RHS
39* C
40* C CLOSE(8)
41* C GO TO 1000
42* C
43* C 990 WRITE(1,995)
44* C 995 FORMAT(///'***** MATING AV "DATABILDER" SVIKTET *****'//)
45* C
46* C 1000 CONTINUE
47* C END
```

```
48*      SUBROUTINE IDV(IU, I, J)
49*  C
50*  C      HENSIKT: FOR GITT VAERUTVIKLING IU IDENTIFISERE DE TO
51*  C      TILSVARENDE VAERTILSTANDER I OG J.
52*  C
53*  C      COMMON /LIM/ NX, NU, NA
54*  C
55*  C      DO 100 II=1,3
56*  C      DO 100 JJ=1,3
57*  C      IF (IU.NE.((II-1)*3+JJ)) GO TO 100
58*  C      I=II
59*  C      J=JJ
60*  C      RETURN
61* 100 CONTINUE
62*  C
63*  C      RETURN
64*  C      END
```

```
65*      SUBROUTINE FKOST(Q, K, C)
66*  C
67*  C      HENSIKT: AA BEREGNE C(I, U, a).
68*  C
69*  C      COMMON /LIM/ NX, NU, NA
70*  C
71*  C      REAL Q(9,9,6,3), K(9,9), C(486)
72*  C
73*  C      DO 100 I=1, NX
74*  C      DO 100 IU=1, NU
75*  C      DO 100 IA=1, NA
76*  C      NDX=(I-1)*NU*NA+(IU-1)*NA+IA
77*  C
78*  C      CALL IDV(IU, IV, JV)
79*  C      SUM=0.0
80*  C      DO 50 J=1, NX
81*  C      SUM=SUM+K(I, J)*Q(I, J, IA, JV)
82* 50 CONTINUE
83* 80 C(NDX)=SUM/1000.0
84* 100 CONTINUE
85*  C      RETURN
86*  C      END
```

```

87*          SUBROUTINE·BGRENS(I·BGR·I·IU·J·IW·IA·Q·P·M)
88*      C
89*      C          HENSIKT: AA BEREGNE·MATRISEELEMENTET·M·I·BEGRENSNINGSMATRISEN·
90*      C          FOR·VARIABLEN·Z(J·IW·IA)·I·LIKNINGEN·GITT·VED·
91*      C          OPERATIV·TILSTAND·I·VAERUTVIKLING·IU·OG·LIKNINGSTYPE·IBGR·
92*      C
93*      C          IBGR=1:·LIKEVEKTSLIKNING·
94*      C          IBGR=2:·LIKNING·SOM·ANGIR·BESLUTNINGSMENGDER
95*      C
96*      REAL Q(9·9·6·3)·P(9·3)·M
97*      M=0·0
98*      IF (IBGR·EQ·2) GO·TO·200
99*      C
100*     C          LIKEVEKTSLIKNING:
101*     C          CALL IDV(IW·IW1·IW2)
102*     C          CALL IDV(IU·IU1·IU2)
103*     C
104*     IF (I·EQ·J·AND·IU·EQ·IW) GO·TO·120
105*     IF (IW2·NE·IU1) GO·TO·300
106*     M=Q(I·J·IA·IU1)*P(IW·IU2)
107*     GO·TO·300
108*     C
109*     120  IF (IW1·EQ·IW2) GO·TO·150
110*     M=-1·0
111*     GO TO 300
112*     C
113*     150  M=Q(J·J·IA·IW1)*P(IW·IW1)-1·0
114*     GO TO 300
115*     C
116*     C          LIKNING·SOM·ANGIR·BESLUTNINGSMENGDER:
117*     200  IF (J·NE·I·OR·IU·NE·IW) GO TO 300
118*     DO 205 K=1·9
119*     IF (Q(I·K·IA·I)·GT·1·0E-9) GO·TO·300
120*     205  CONTINUE
121*     M=1·0
122*     C
123*     300  CONTINUE
124*     RETURN
125*     END

126*          SUBROUTINE·ROWS
127*      C
128*     C          HENSIKT:·SETTE·OPP·DATABILDENE·SOM·NAVNGIR·LINJENE·I·LP-PROBLEMETS·
129*     C          BEGRENSNINGSMATRISE·
130*     C
131*     COMMON /LIM/ NX·NU·NA
132*     WRITE(8·10)
133*     10·  FORMAT('NAME'·10X·'WELLDONE'/'ROWS'/' N·KOSTNAD')
134*     C
135*     NXU=NX*NU
136*     DO 100 I=1·NX
137*     DO 100 IU=1·NU
138*     WRITE(8·50) I·IU
139*     50  FORMAT(' E·LVEKT·'·211)
140*     100  CONTINUE
141*     C
142*     DO 200 I=1·NX
143*     DO 200 IU=1·NU
144*     WRITE(8·150) I·IU
145*     150  FORMAT(' E·BSLUT·'·211)
146*     200  CONTINUE
147*     C
148*     WRITE(8·250)
149*     250  FORMAT(' E·NORMER·'/'COLUMNS')
150*     C
151*     RETURN
152*     END

```



```
153*      SUBROUTINE COLUMNS(P,Q,C)
154*      C
155*      C      HENSIKT: STANDARDISERE BEGRENSNINGSMATRISEN OG SETTE OPP DATABILDER
156*      C      FOR MATRISEN, SAMT AA ANGI NAVN PAA VARIABLENE.
157*      C
158*      COMMON /LIM/ NX,NU,NA
159*      C
160*      REAL P(9,3),Q(9,9,6,3),C(486),M
161*      C
162*      C      1 LOEKKE FOR HVER VARIABLE:
163*      DO 600 J=1,NX
164*      DO 600 IW=1,NU
165*      DO 600 IA=1,NA
166*      C
167*      NDX=(J-1)*NU*NA+(IW-1)*NA+IA
168*      C
169*      C      FOR HVER VARIABLE SPESIFISERES KOEFFISIENTEN I MAALFUNKSJONEN FOERST:
170*      50  WRITE(8,100) J, IW, IA, C(NDX)
171*      100  FORMAT(4X, 'Z', 3I1, 6X, 'KOSTNAD', 4X, F11.7)
172*      C
173*      C      LIKEVEKTSLIKNINGENE:
174*      DO 300 I=1,NX
175*      DO 300 IU=1,NU
176*      C
177*      CALL BGRENS(1, I, IU, J, IW, IA, Q, P, M)
178*      IF (ABS(M) .LT. 1.0E-9) GO TO 300
179*      200  WRITE(8,250) J, IW, IA, I, IU, M
180*      250  FORMAT(4X, 'Z', 3I1, 6X, 'LVEKT', 2I1, 3X, F11.7)
181*      300  CONTINUE
182*      C
183*      C      BESLUTNINGSMENGDENE:
184*      DO 500 I=1,NX
185*      DO 500 IU=1,NU
186*      C
187*      CALL BGRENS(2, I, IU, J, IW, IA, Q, P, M)
188*      IF (ABS(M) .LT. 1.0E-9) GO TO 500
189*      400  WRITE(8,450) J, IW, IA, I, IU, M
190*      450  FORMAT(4X, 'Z', 3I1, 6X, 'BSLUT', 2I1, 3X, F11.7)
191*      500  CONTINUE
192*      C
193*      C      NORMERING:
194*      M=1.0
195*      WRITE(8,550) J, IW, IA, M
196*      550  FORMAT(4X, 'Z', 3I1, 6X, 'NORMER', 4X, F11.7)
197*      C
198*      600  CONTINUE
199*      C
200*      RETURN
201*      END
```

```
202*      SUBROUTINE RHS
203*      C
204*      C      HENSIKT: SETTE OPP DATABILDER SOM SPESIFISERER HOEYRESIDENE
205*      C      I BEGRENSNINGSLIKNINGENE.
206*      C
207*      C      PRINSIPP: BARE NORMERINGSLIKNINGEN HAR POSITIV HOEYRESIDE.
208*      C
209*      COMMON /LIM/ NX,NU,NA
210*      C
211*      WRITE(8,10)
212*      10  FORMAT('RHS' /4X, 'HS', 8X, 'NORMER', 5X, '1.0' // 'ENDATA' //
213*      * 'NAME          ZZZZZZZZ' // 'ENDATA')
214*      C
215*      RETURN
216*      END
```