



Universitetet  
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

## MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering:

Risikostyring/ Offshore sikkerhet

Vårsemesteret, 2015

Åpen

Forfatter: Kjartan Bjørnsen

.....  
(signatur forfatter)

Fagansvarlig: Roger Flage, Universitetet i Stavanger

Veileder(e): Vegard Larsen Tuft, Safetec

Tittel på masteroppgaven: Metode for identifisering av antagelser med avhengig sensitivitet i kvantitativ risikoanalyse (QRA)

Engelsk tittel: Method for identifying assumptions with dependent sensitivity in quantitative risk analysis (QRA)

Studiepoeng: 30

Emneord:

- Antagelser
- Sensitivitet
- Kritikalitet
- Avhengighet
- QRA

Sidetall: 73

+ vedlegg/annet: 0

Stavanger, 15.06.2015

## Takk

Det rettes herved takk til de som har gjort denne oppgaven mulig. Takk til:

Vegard Larsen Tuft fra Safetec for hjelp med utforming av oppgaven, god hjelp under arbeidet og for stor tålmodighet og positivitet i prosessen.

Roger Flage ved universitetet i Stavanger for jevnlig oppfølgingsmøter med særdeles nyttige og relevante tilbakemeldinger og innspill.

Safetec, og spesielt Stavangerkontoret, for å stille med arbeidsplass, datamaskin, godt arbeidsmiljø og hyggelige lunsjer.

Min kone Siri Marie for motivasjon og positivitet gjennom prosessen.

## Sammendrag

Vurdering av antagelsers sensitivitet i forhold til resultater og konklusjoner i kvantitativ risikoanalyse (QRA) kan være en del av risikobeskrivelsen. Sensitivitetsanalyse av antagelsene i QRA gjøres ofte ved å endre en og en antagelse. En utfordring er at antagelsene kan påvirke hverandres sensitivitet. Avvik i en antagelse kan føre til sensitivitetsendring i en annen antagelse. En systematisk metode for å avdekke antagelser som kan få en betydelig sensitivitetsøkning ved avvik i andre antagelser presenteres. Metoden baserer seg på en analyse av hvordan to parametere i et hendelsestre påvirker hverandres sensitivitet. Resultatene i analysen viser at store relative endringer må skje i den ene parameteren for at den andre skal få en betydelig sensitivitetsendring. Metoden baserer seg derfor på å identifisere hvilke antagelser som kan forårsake en slik parameterendring i hendelsestreet, for så å identifisere hvilke antagelser som kan få en betydelig sensitivitetsendring som følger av dette. Det konkluderes med at metoden kan gi verdifull innsikt i hvilke antagelser som er viktig for risikonivået på en installasjon.

# Innhold

---

<b>1</b>	<b>INNLEDNING</b> .....	<b>1</b>
1.1	BAKGRUNN.....	1
1.2	PROBLEMSTILLING.....	1
1.3	AVGRENSNINGER.....	2
1.4	STRUKTUR OG INNHOLD.....	2
1.5	FORKORTELSER.....	3
<b>2</b>	<b>TEORI</b> .....	<b>4</b>
2.1	RISIKOPERSPEKTIV.....	4
2.2	KVANTITATIV RISIKOBESKRIVELSE.....	5
2.2.1	<i>Definisjon</i> .....	5
2.2.2	<i>Metodikk</i> .....	5
2.3	VURDERING AV KUNNSKAPSSTYRKE OG ANTAGELSERS KRITIKALITET SOM UTVIDELSE AV RISIKOBESKRIVELSEN.....	12
2.4	SENSITIVITETSANALYSE.....	14
2.4.1	<i>Definisjon</i> .....	14
2.4.2	<i>Sensitivitetsmål</i> .....	14
2.4.3	<i>Sensitivitetsanalyse i risikoanalysekontekst</i> .....	15
2.5	AVHENGIGHET MELLOM ANTAGELSER.....	18
2.5.1	<i>Eksempel 1</i> .....	18
2.5.2	<i>Eksempel 2</i> .....	19
2.6	PREMISSKART.....	19
2.6.1	<i>Innledning</i> .....	19
2.6.2	<i>Bruksområde</i> .....	20
2.6.3	<i>Eksempel på premisskart</i> .....	20
<b>3</b>	<b>BASIS FOR METODIKK</b> .....	<b>25</b>
3.1	INNLEDNING.....	25
3.2	TO TOLKNINGER AV SENSITIVITET.....	25
3.2.1	<i>Resultatsensitive antagelser</i> .....	25
3.2.2	<i>Konklusjonssensitive antagelser</i> .....	27
3.2.3	<i>Følge for behandling av avhengige antagelser</i> .....	28
3.2.4	<i>Informasjon til beslutninger</i> .....	29
3.3	ANTAGELSE OG PARAMETER.....	30
3.4	SENSITIVITETSANALYSE FOR EN PARAMETER I HENDELSESTRE.....	32
3.5	SENSITIVITETSENDRINGER I HENDELSESTRE.....	38
3.6	SAMMENDRAG AV BASIS FOR METODIKK.....	50
<b>4</b>	<b>METODEFORSLAG FOR Å IDENTIFISERE AVHENGIGHET MELLOM ANTAGELSER</b>	<b>52</b>
4.1	IDENTIFISERING AV AVHENGIGE ANTAGELSER GJENNOM NEGLISJERTE HENDELSER.....	52
4.2	IDENTIFISERING AV AVHENGIGHET MELLOM ANTAGELSER VED IDENTIFISERING AV STORE PARAMETERENDRINGER.....	57
4.3	SAMMENDRAG AV METODE.....	59
<b>5</b>	<b>DISKUSJON</b> .....	<b>62</b>
5.1	METODE.....	62
5.1.1	<i>Basis for metode</i> .....	62
5.1.2	<i>Praktiske aspekter</i> .....	68
5.2	INPUT TIL BESLUTNINGSTAGERE.....	69
5.3	VEIEN VIDERE.....	69

<b>6</b>	<b>KONKLUSJON.....</b>	<b>71</b>
<b>7</b>	<b>REFERANSER.....</b>	<b>72</b>

## Liste over figurer

Figur 1: Enkelt hendelsestre, gitt den initierende hendelsen gasslekkasje [8: s577].....	11
Figur 2: Matrise for kritikalitetsgradering av antagelser. Rød = høy, gul=medium, grønn= lav .....	13
Figur 3: Hendelsestre for prosesslekkasjer [14: s 2].....	20
Figur 4: Hendelsessekvens for prosesslekkasjer[14: s 3].....	21
Figur 5: Hendelsessekvens med sensitiviteter[14: s 4] .....	22
Figur 6: Hendelsessekvens med sensitivitet og kunnskapsstyrke. Sirkel=høy , oktagonal= medium og firkant=svak [14: s 5].....	23
Figur 7: Premisskart for dimisjonering av brannlast. [14: s 5]: .....	24
Figur 8: Endret resultatsensitivitet i $a_2$ pga avhengighet med $a_1$ .....	26
Figur 9: Endret konklusjonssensitivitet i $a_2$ pga avhengighet med $a_1$ .....	28
Figur 10: Eksempel på hendelsestre .....	32
Figur 11: Utdrag av hendelsestre .....	39
Figur 12: Sensitivitet i $p_2$ i forhold til hvor stor andel av $PLL_1$ utgjør av $PLL$ .....	45
Figur 13: Sensitivitet i $p_2$ ved basecase og ved en 30% økning i $p_1$ .....	46
Figur 14: Relativ sensitivitetsendring i $p_2$ ved en 30% økning i $p_1$ .....	47
Figur 15: Sensitivitet i $p_2$ ved basecase og ved 30, 50 og 100% økning i $p_1$ .....	48
Figur 16: Relativ sensitivitetsendring i $p_2$ ved en 50 og 100% økning i $p_1$ .....	49

# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Tradisjonelt har definisjonen av risiko vært knyttet til en kombinasjon av sannsynlighet og konsekvens i forbindelse med ulike hendelser [1]. Dette er dog en definisjon flere i fagmiljøet ikke lenger anerkjenner [1]. Dette fordi sannsynlighetsbegrepet i risikokontekst hovedsakelig innebærer relative frekvenser eller subjektive sannsynligheter [1]. Det blir hevdet at usikkerheten rundt hendelser og konsekvenser strekker seg lengre enn disse begrepene. Følgelig er termen usikkerhet tatt i bruk i stedet for sannsynlighet for å definere risiko. Denne utvidelsen av risikoperspektivet får følger for hvordan risiko beskrives og kommuniseres [2]. Hovedhensikten ved å utføre risikoanalyser er å gi beslutningsgrunnlag til beslutningstagere [3]. Med et utvidet risikoperspektiv må derfor også risikobeskrivelsen gå forbi sannsynligheter for å belyse flere aspekter relevante for beslutningene som skal støttes [2].

En måte dette kan gjøres er å vurdere kritikaliteten i de forskjellige antagelsene som er gjort i risikoanalysen [10]. Denne kritikaliteten avgjøres ut i fra to vurderinger [10]. Den første er en vurdering av kunnskapen antagelsen er basert på, og den andre er en vurdering av sensitiviteten til antagelsen [10]. Sensitiviteten til antagelsen sier noe om hvor stor påvirkning et avvik i antagelsen vil ha på resultatene og konklusjonene i analysen [10]. Er for eksempel antagelsen basert på svak kunnskap, og har høy sensitivitet, vil den bli vurdert som kritisk for analysen [10].

En utfordring med sensitivitetsvurderingen er at antagelsene kan være avhengige av hverandre. Det vil si at avvik i en antagelse kan føre til endring i sensitivitet i en annen antagelse. Dagens metoder for å vurdere sensitivitet i antagelsene vurderer generelt sensitiviteten i en og en antagelse [13]. Metodene sier dermed mindre om hvordan avvik antagelsene påvirker hverandres sensitivitet [11]. Dette kan føre til at antagelser som potensielt kan bli svært sensitive hvis antatte forhold endres, blir presentert som lite sensitive da man har liten oversikt over disse sammenhengene. Beslutningstagere kan dermed få ufullstendig informasjon om sensitiviteten og kritikaliteten i visse antagelser. Det trengs derfor en systematisk metode for å avdekke antagelser i kvantitativ risikoanalyse som i utgangspunktet har blitt vurdert som mindre sensitive, men som potensielt kan bli sensitive.

## 1.2 Problemstilling

Hvordan kan man systematisk avdekke antagelser i en QRA (Quantitative risk assessment) som i utgangspunktet er vurdert som mindre sensitive for resultater og konklusjoner, men som ved avvik i andre antagelser kan bli sensitive.

### 1.3 Avgrensninger

De aktuelle avgrensningene for denne oppgaven vil bli presentert punktvis i det følgende.

- I oppgaven vil det bli sett på QRA i en offshorekontekst. Det betyr at metodeforslaget først og fremst er laget med tanke på å passe inn i QRA-metodikken som ofte benyttes i offshorekontekst.
- Metoden vil begrense seg til å avdekke antagelser som har blitt vurdert som mindre sensitive for analysen, men som potensielt kan bli sensitive. Dette betyr at metoden kun legger vekt på å avdekke antagelser som kan ha en relativt stor sensitivitetsendring.
- Metoden er ikke laget for å behandle avhengighet mellom antagelser som inngår sammen i komplekse modeller som for eksempel antennings-, brann- og eksplosjonsmodeller. Egne analyser på hvordan antagelser kan påvirke hverandres sensitivitet innad i slike modeller må gjøres.
- Metoden foreslått vil ikke ta sikte på å identifisere antagelser som potensielt kan få relativt stor reduksjon i sensitivitet ved endring i av antatte forhold.

### 1.4 Struktur og innhold

Opgaven vil bli presentert med en innledende teoridel først. Hovedsakelig er det to hensikter med denne delen. Den første hensikten er å sette metodeforslaget inn i en metodisk kontekst for QRA. Dette vil si å presentere og belyse QRA-metodikken som metoden er ment å passe inn i. Den andre hensikten er å presentere og definere sentrale elementer som metoden baserer seg på. To konkrete eksempler på avhengige antagelser er også presentert i denne delen. Disse to eksemplene kan om ønskelig leses først, for å få en bedre forståelse av problemstillingen før man leser resten av oppgaven.

I kapittel 3 vil ulike aspekter rundt avhengighet mellom antagelser bli drøftet. Dette for å identifisere nøkkelaspekter med problemstillingen som videre brukes som basis for metoden. På slutten av dette kapittelet vil et kortfattet sammendrag oppsummere funnene.

Metoden vil videre bli presentert i kapittel 4. Metoden vil være todelt og hver del blir presentert for seg, som en steg for steg liste. Ingen formel casestudie er gjort i forbindelse med oppgaven, men relevante eksempler vil være integrert i metodebeskrivelsen for å illustrerer og klargjør hvert steg. Et kortfattet sammendrag av metoden vil bli presentert til slutt i dette kapittelet.

En diskusjon rundt metodens basis, begrensninger, nytteverdi og praktiske aspekter vil så bli gjort i kapittel 5.

## 1.5 Forkortelser

ESD	Emergency shut down system
FMEA	Failure mode and effects analysis
FTA	Fault tree analysis
HAZOP	Hazard and operability analysis
HSF	Hovedsikkerhetsfunksjon
OAT	One-factor-at-a-time
PLF	Platform
QRA	Quantitative risk assessment



## 2 Teori

### 2.1 Risikoperspektiv

Som innledning til denne oppgaven vil det bli klargjort hvilket risikoperspektiv oppgaven bygger på. Dette fordi perspektivet man har på risiko vil avgjøre hvordan man betrakter, beskriver og kommuniserer risiko. Risikoperspektivet som tillegges i denne oppgaven er et bredere perspektiv på risiko enn hva man tradisjonelt har hatt. Denne delen inneholder en kort beskrivelse av hvorfor aktører i fagmiljøet argumenterer for en slik en utvidelse av risikoperspektivet, og hvordan problemstillingen i denne oppgaven passer inn i dette perspektivet.

Tradisjonelt har risiko blitt betraktet som en kombinasjon av hendelser (A), konsekvenser (C) og sannsynlighet (P), notert som henholdsvis (A, C, P) [1]. Selv om ingen entydig definisjon på risiko finnes siterer Aven[1] flere velbrukte definisjoner som alle betrakter risiko som (A, C, P):

*“(1) Risk is the combination of probability and extent of consequences (Ale, 2002).*

*(2) Risk is a measure of the probability and severity of adverse effects (Lowrance, 1976).*

*(3) Risk is probability and consequence, more specifically risk is equal to the triplet  $(s_i, p_i, c_i)$ , where  $s_i$  is the  $i$ th scenario,  $p_i$  is the probability of that scenario, and  $c_i$  is the consequence of the  $i$ th scenario,  $i = 1, 2, \dots, N$  (Kaplan and Garrick, 1981).”*

Aven [1: side 1081]

Aven[1] argumenterer for at dette perspektivet på risiko er for smalt. Basisen for dette er at P i hovedsak kun kan tolkes som subjektive sannsynligheter eller frekvensbaserte sannsynligheter i en risikokontekst [4]. I følge Aven[1] kan ikke P bety subjektive sannsynligheter. Dette fordi man må ha et rammeverk for risiko som strekker seg lenger enn subjektive sannsynligheter [1]. Ser man på den andre mulige tolkningen av P, frekvens baserte sannsynligheter, argumenterer Aven[1] for at dette også er en for smal definisjon av risiko. Dette fordi det kan tenkes situasjoner hvor andelen av utfall i det lange løp ikke gir mening, da repetisjon av ”lignende situasjoner” blir umulig å forestille seg [1]. Aven[1] eksemplifiserer dette med at det ikke er mulig å tolke sannsynligheten for et terroristangrep med frekvenssannsynlighet.

Med et (A,C,P) perspektiv på risiko begrenser også usikkerhetsbeskrivelse seg til subjektive sannsynligheter og frekvenssannsynligheter [1]. Dette kan føre til flere utfordringer. Apostolakis[ 5 ] peker eksempelvis på uenighet mellom eksperter vedrørende en sannsynlighetsverdi eller fordeling som en utfordring. Sannsynlighetsteori kan ikke tvinge frem enighet mellom ekspertene [5]. Aven[1] legger vekt på at sannsynlighetsverdier og fordelinger kan være basert på svak kunnskap og ikke rettferdiggjorte antagelser. Sannsynlighetene i seg selv reflekterer ikke kvaliteten på kunnskapen de baserer seg på.

Aven[1] argumenterer for et bredere perspektiv på risiko, og følgelig en bredere beskrivelse av risiko. Aven[1] foreslår et risikoperspektiv (A,C,U), hvor U representerer usikkerhet om A og C. Risikobeskrivelsen ved dette risikoperspektivet tar formen (A',C',Q,K) [1]. A' og C' representerer identifiserte hendelser og konsekvenser [1]. Q representerer måten man representerer usikkerheten U, eksempelvis ved sannsynlighetsteori [1]. K representerer kunnskapen og informasjonen som Q baserer seg på [1].

De praktiske implikasjonene ved å utvide risikoperspektivet og risikobeskrivelsen har blitt videre beskrevet av Aven[2]. Her pekes det på usikkerhetsintervall for konsekvenser, evaluering av potensielle overraskelser og vurdering av kunnskapstyrken som analysen bygger på, som utvidelser av risikobeskrivelsen [2]. De to første elementene vil ikke være direkte relevante for denne oppgaven, og vil derfor ikke bli videre vektlagt. Vurdering av kunnskapsstyrken vil derimot være tett knyttet til problemstillingen i denne oppgaven. Hvordan denne vurderingen av kunnskapsstyrken kan utføres har tidligere blitt beskrevet i litteraturen, se for eksempel Flage & Aven[10], Aven[2] og Aven & Pedersen [6]. Denne oppgaven vil bygge videre på dette arbeidet ved å ta sikte på å videre utforske hvordan kritikaliteten i antagelsene som ligger til grunn for en QRA kan bli vurdert. Konkret vil dette gjøres gjennom å foreslå en metode for å identifisere antagelser i QRA som potensielt kan få en relativt stor sensitivitetsendring ved avvik i andre antagelser.

For å sette dette metodeforslaget inn i en tydelig metodisk kontekst for QRA vil det først bli presentert hvordan risiko kvantifiseres gjennom QRA metodikken, for så å beskrive hvordan den kvantitative beskrivelsen av risiko utvides ved vurdering av kunnskapsstyrke og kritikalitet i antagelser.

## **2.2 Kvantitativ risikobeskrivelse**

En kort presentasjon av grunnleggende prinsipper og metodikk tilknyttet QRA i en offshorekontekst følger i denne delen. I hovedsak vil dette kapittelet være basert på Vinnem [7, 8]. Hvor andre kilder er brukt vil det være oppgitt egne referanser.

### **2.2.1 Definisjon**

QRA kan både forkorte "Quantitative Risk Analysis" og "Quantified Risk Analysis". I noen sammenhenger kan også "Assessment" erstatte "Analysis". Hvis man gjør dette, inkluderes også evalueringen av resultatene i analysen i begrepet. I denne oppgaven vil QRA hovedsakelig referere til "Quantitative Risk Analysis".

### **2.2.2 Metodikk**

I dette avsnittet vil QRA metodikken, som metodeforslaget i oppgaven bygger på, bli presentert. Det minnes om at i kapittel 2.3 vil det videre bli presentert hvordan risikobeskrivelsen kan utvides fra nettopp denne kvantitative beskrivelsen, ved å inkludere vurderingen av kunnskapen analysen bygger på.

Dette avsnittet vil dog utelukkende fokusere på måten den kvantitative risikoen kalkuleres i en QRA.

### Risikomål

Risiko kan kvantifiseres på flere måter. Dette inkluderer for eksempel sannsynlighetsfordelinger, forventningsverdier og sannsynligheter for visse typer konsekvenser. Måten det vil bli fokusert på i denne oppgaven er risiko som forventningsverdi. Dette er trolig den vanligste måten å kvantifisere risiko i en offshorekontekst ifølge Vinnem.

Først vil en generell modell for risikoindeks  $R$ , i tråd Berner & Flage[9], bli presentert. Her lar man  $Y$  være en ukjent størrelse av tap. Dette kan eksempelvis være antall døde. Videre representerer  $R$  forventningsverdien til tapet  $Y$ , betinget på en annen ukjent størrelse  $X$ .  $R(X)$  kan uttrykkes som:

$$R(X) = cE(Y|X, K) \quad (1)$$

Hvor:

$c$  = normaliserende konstant

$K$  = kunnskapen  $R$  baserer seg på.

$R$  betinget på  $X = x_0$  er følgelig

$$R(x_0) = cE(Y|X = x_0, K) \quad (2)$$

$R(X)$  er et generelt uttrykk for flere ulike risikoindeks som uttrykker forventningsverdien til et tap med hensyn på den ukjente størrelsen  $X$ . Legg merke til at  $X = x_0$  representerer en antagelse vedrørende  $X$  som blir gjort i forbindelse med kalkuleringen av  $R$ . Berner & Flage [9] lister opp noen eksempler på antagelser:

- Ved brønnutblåsning er den potensielle raten 80 kg/s. Her er  $X$  utblåsningsraten og  $X = x_0 = 80$  kg/s
- Plattformens bærende struktur tåler kollisjonsenergi på opp til 9 MJ. Her er  $X$  tålegrensen til plattformen og  $X = x_0 = 9$  MJ
- Ved en antent brønnutblåsning er antallet momentant døde 1. Her er  $X$  antall døde ved en antent brønnutblåsning og  $X = x_0 = 1$
- Gasskonsentrasjonen synker med 50% for hver åttende meter fra lekkasjepunktet. Her er  $X$  gasskonsentrasjonen  $u$  på  $v$  meter fra lekkasjepunktet.  $X = x_0 = G(u, v) = u(0,5)^{v/8}$

Merk at i det siste eksempelet er antagelsen at modellen korresponderer med virkeligheten og dermed ikke gir feil. Denne måten å betrakte risikoindeks  $R$  og antagelsene  $X = x_0$  vil være gjennomgående i denne oppgaven.

Den generelle modellen for risikoindeks  $R$ , som denne oppgaven baserer seg på, er nå vist. Videre vil den praktiske måten man kalkulerer  $R$  i en offshore kontekst bli presentert. Vinnem presenterer hvordan dette kan gjøres:

*"An operational expression for practical calculation of risk is the following, which underlines how risk is calculated, by multiplying probability and numerical value of the consequence for each accident sequence  $i$ , and summed over all (I) potential accident sequences" Vinnem[7: side 25]*

Utrykket for risikoindeks  $R$  er følgende:

$$R = \sum_i p_i \cdot c_i \quad (3)$$

Hvor:

$p_i$  = sannsynligheten for ulykkessekvens  $i$

$c_i$  = konsekvensen av ulykkessekvens  $i$

I samsvar med uttrykk 2 er også her risikoindeks  $R$  forventningsverdien av et tap. Tapet kan dog referere til forskjellige elementer, derfor refereres det ofte til ulike kategorier av risiko. Disse kategoriene blir ofte referert til som personellrisiko, miljørisiko og eiendelrisiko. Et utvalg av ulike risikoindeks for personellrisiko vil nå bli presentert. Disse vil det også bli referert til senere i oppgaven.

### **Risiko for installasjon**

PLL kan tolkes som forventningen til antall døde. Dette kan eksempelvis regnes over en bestemt tidsperiode på en bestemt installasjon. I QRA kan PLL uttrykkes som:

$$PLL = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J f_{nj} \cdot E(C_{nj}) \quad (4)$$

Hvor:

$f_{nj}$  = årlig frekvens av ulykkesscenario  $n$  med konsekvens  $j$  for personell.

$E(C_{nj})$  = Forventningsverdien for antall døde ved ulykkesscenario  $n$  med konsekvens  $j$  for personell.

$N$  = Antall identifiserte ulykkesscenarioer på installasjonen.

$J$  = Antall konsekvenstyper som for eksempel momentan død og død ved flukt og evakuering

Frekvens  $f_{nj}$  kan uttrykkes som en serie av avhengige faktorer:

$$f_{nj} = f_{lekkasje,n} \cdot p_{tenn,n} \cdot p_{feil,n} \cdot p_{esk,n} \cdot u_{nj} \quad (5)$$

Hvor:

$f_{lekkasje,n}$  =lekkasjefrekvens

$p_{tenn,n}$  = sannsynlighet for tenning, gitt en lekkasje

$p_{feil,n}$  = sannsynlighet for feiling i sikkerhetssystemer gitt en antent lekkasje

$p_{esk,n}$  =sannsynlighet for eskalering gitt en antent lekkasje og feiling av sikkerhetssystemene

$u_{nj}$  = andel av scenarioer som fører til døde

### **Individuell risiko**

Det er hovedsakelig to mål for individuell risiko i denne sammenhengen, henholdsvis FAR og AIR. Begge kan uttrykkes betinget på PLL. FAR uttrykker forventet antall døde per 100 millioner eksponerte timer mens AIR uttrykker den gjennomsnittlige risikoen for død for en eksponert person.

$$FAR = \frac{PLL \cdot 10^8}{Eksponerte timer} = \frac{PLL \cdot 10^8}{POB_{gj} \cdot 8760} \quad (6)$$

$$AIR = \frac{PLL}{Eksponerte personer} = \frac{PLL}{POB_{gj} \cdot \frac{8760}{H}} \quad (7)$$

Hvor:

$POB_{gj}$  =Gjennomsnittlig antall personell på installasjon

$H$  =totalt antall timer på installasjon i året for en person

### **Frekvens av tap av hovedsikkerhetsfunksjoner**

Frekvens av tap av hovedsikkerhetsfunksjoner er en indirekte måte å beskrive personellrisiko. Tapet er relatert til såkalte hovedsikkerhetsfunksjoner (HSF). HSF er funksjoner som ved ulykker skal bidra til å ivareta sikkerheten til personellet. 5 ulike funksjoner inngår ofte i HSF:

- Tilfluktssted
- Bærende struktur
- Rømningsveier
- Kontrollfunksjoner ved nødstilfeller
- Eskaleringshindring

Frekvensen for tap av HSF regnes:

$$f_{tap,i} = \sum_{n=1}^N f_n \cdot p_{tap,n,i} \quad (8)$$

Hvor:

$f_{tap,i}$  = frekvens for tap av HSF  $i$

$f_n$  = frekvens av scenario  $n$

$p_{tap,n,i}$  = sannsynlighet for tap av HSF  $i$ , gitt scenario  $n$

$N$  = Antall ulykkesscenario

### **Analytiske faser**

En QRA består av flere analytiske faser. Disse fasene blir delt inn i 3 og er:

- Identifisering av initierende hendelser
- Årsaksanalyse
- Konsekvensanalyse

Det vil i dette avsnittet bli kort gjort rede for de forskjellige delene, for å sette metodeforslaget i oppgaven inn i en tydelig analytisk kontekst.

#### ***Identifisering av initierende hendelser***

Identifisering av initierende hendelser er en systematisk gjennomgang av mulige hendelser som kan lede til ulykker på installasjonen. Etter beste evne skal det sikres at ingen relevante hendelser blir oversett.

#### ***Årsaksanalyse***

I årsaksanalysen vurderes det hva som er faktorene som kan lede til de identifiserte initierende hendelsene. Denne analysen har tre hensikter

- Identifikasjon av hvilke faktorer og hvilke kombinasjoner av faktorer som kan lede til de identifiserte initierende hendelsene
- Identifisere muligheter for risikoreduserende tiltak
- Gjøre en vurdering av sannsynligheten for at de initierende hendelsene oppstår

Det første punktet er i hovedsak kvalitativt og kan utføres med ulike metoder som HAZOP, FTA og FMEA. Denne kvalitative vurderingen etablerer videre basisen for det tredje punktet, som i hovedsak er kvantitativt. Også for å vurdere sannsynligheten for de initierende hendelsene kan metodikken variere. Dette kan eksempelvis være ved bruk av FTA, ETA og Monte Carlo simuleringer. Som Vinnem påpeker er dog den mest brukte metoden i offshore risikoanalysekontekst kalkulering av frekvens av initierende hendelser basert på

historiske data. Vinnem påpeker også at man bør begrense bruken av denne metoden da den kun fokuserer på å frembringe et tall, ikke på hvordan hendelsene kan forebygges. Skal metoden brukes pekes det på fire punkter som må adresseres.

- Datagrunnlagets robusthet må vurderes
- Datagrunnlaget og modellene datagrunnlaget brukes i må være relevant for installasjonen man ser på
- Omfanget på datagrunnlaget må være slik at det kan frembringe konklusjoner som er robuste
- Mulige trender i datagrunnlaget må tas hensyn til

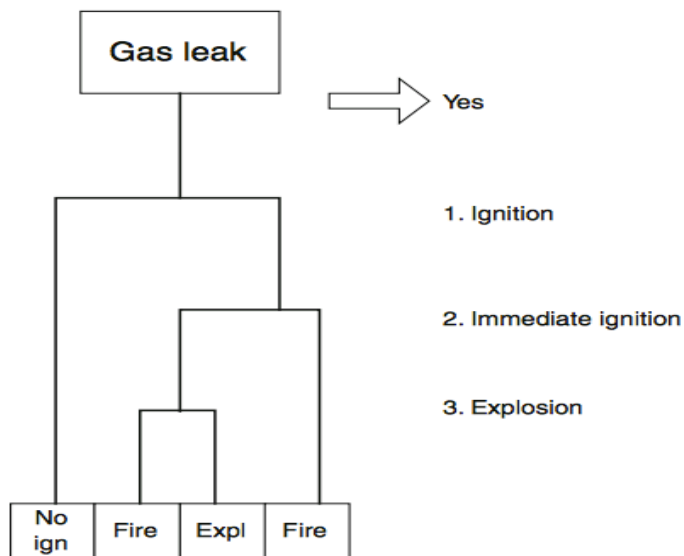
Kalkulering av frekvens til initierende hendelse ved bruk av historisk data vil være den metodiske konteksten for årsaksanalysen for denne oppgaven.

### ***Konsekvensanalyse***

Konsekvensanalysen kan deles inn i tre deler. Den første delen handler om å modellere ulykkessekvenser gitt en initierende hendelse. Den neste delen handler om å modellere de fysiske følgene av de forskjellige ulykkessekvensene. Den siste handler om å kvantifiserer konsekvensene for de forskjellige dimensjonene personell, miljø og eiendeler. Forskjellige modeller og verktøy brukes for å behandle de to siste delene av konsekvensanalysen. Dette kan være avhengig av hvilken type initierende hendelse man vurderer konsekvensen av, for eksempel kan forskjellige hendelser føre til brann, eksplosjon, kollisjon etc. Ved modelleringen av ulykkessekvenser er hendelsestreeanalyse, også referert til som ETA, den desidert mest brukte metoden i følge Vinnem. Metodene for å behandle avhengige antagelser baserer seg på bruken av ETA. Det vil derfor til slutt i dette kapitlet bli sett nærmere på hvordan hendelsestrær brukes for å modellere ulykkessekvenser gitt en initierende hendelse.

### ***Modellering av ulykkessekvenser med hendelsestrær***

Startpunktet for et hendelsestre i denne sammenhengen er en initierende hendelse sammen med den tildelte frekvensen for denne hendelsen. Dette kalles ofte topphendelsen. Ved bruk av en liste med ja-nei spørsmål kan man videre avgjør mulige slutthendelser for topphendelsen. Videre ved å gi hvert svar en sannsynlighet kan man kalkulerer frekvensen for hver av slutthendelsene. Hendelsestreet representerer denne modelleringen av hendelsessekvenser grafisk slik at man får et overblikk over de ulike slutthendelsene den initierende hendelsen kan føre til. Figur 1 illustrerer et enkelt hendelsestre basert på tre ja-nei spørsmål [8: side 577]:



Figur 1: Enkelt hendelsestre, gitt den initierende hendelsen gasslekkasje [8: s577]

For hvert spørsmål ser man at en gren i hendelsestreet blir til to grener. Disse punktene kalles noder. For risikoanalyser i offshorekontekst er initierende hendelser relatert til hydrokarboner en stor bidragsyter til den totale risikoen. Et hendelsestre til en slik topphendelse kan ha noder relatert til:

- Deteksjon av lekkasje
- Antenning av lekkasje
- Forsinket antenning av lekkasje
- Feil i ESD system
- Feil i avblødningsventiler
- Feil i Isoleringsventiler
- Feil i branndeteksjon
- Feil i røykdeteksjon
- Feil i sprinklersystem
- Eskalering

For hver av nodene blir det tildelt to betingede sannsynlighetsverdier, en for ja og en for nei. Den initierende hendelsen og sluthendelsene er som oftest frekvenser. Følgelig kan frekvensen til sluthendelsene uttrykkes:

$$f_j = f_i \prod_K p_k \quad (9)$$

Hvor

$f_j$  = frekvensen til sluthendelse  $j$

$f_i$  = frekvensen til den initierende hendelsen  $i$

$p_k$  = den betingede sannsynligheten for gren  $k$  i hendelsestreet

$K$  = Alle grenene som former veien fra den initierende hendelsen til sluthendelse  $j$ .



### 2.3 Vurdering av kunnskapsstyrke og antagelsers kritikalitet som utvidelse av risikobeskrivelsen

Den metodiske konteksten for å kvantifisere risiko for denne oppgaven er presentert i kapittel 2.2.2. Videre husk at risikomodellen fra uttrykk 2 ble uttrykt som:

$$R(x_0) = cE(Y|X = x_0, K)$$

Forventningen til tapet  $Y$  er betinget både på antagelsen  $X = x_0$  og den øvrige kunnskapen  $K$ . Forslag fra litteraturen på hvordan  $K$  kan inkluderes i risikobeskrivelsen vil nå bli presentert.

Aven[2] presenterer to måter å vurdere kunnskapen  $R(x_0)$  er betinget på. Den ene metoden baserer seg på en direkte gradering av kunnskapsstyrken ved bruk av kriterier. Gradene kunnskapsstyrken kan få er henholdsvis svak, medium og sterk [2]. Kriteriene som brukes er satt frem av Flage & Aven[10]. Ut i fra disse kriteriene kan man gradere kunnskapsstyrken som sterk hvis alle følgende utsagn anses riktige:

*"-The phenomena involved are well understood; the models used are known to give predictions with the required accuracy.*

*-The assumptions made are seen as very reasonable.*

*-Much reliable data are available.*

*-There is broad agreement among experts. "*

Flage & Aven [10: side 14 ]

Videre graderes kunnskapsstyrken som svak hvis en av de følgende utsagnene er riktige:

*"-The phenomena involved are not well understood; models are non-existent or known/believed to give poor predictions.*

*-The assumptions made represent strong simplifications.*

*-Data are not available, or are unreliable.*

*-There is lack of agreement/consensus among experts. "*

Flage og Aven [10: side 14 ]

Tilfeller som verken kan klassifiseres som sterk eller svak får graden medium[10].

Den andre metoden presentert av Aven[2] tar utgangspunkt i antagelsene analysen baserer seg på. Den baserer seg på å gi en kritikalitetsvurdering av hver antagelse[2]. Denne kritikalitetsvurderingen baserer seg på følgen for  $R$  ved avvik fra forholdene som antagelsene stadfester, et usikkerhetsmål på om avvikene kan oppstå og konsekvensene av dette, og til slutt kunnskapen man baserer evalueringene på [2]. Aven[2] eksemplifiserer denne metoden med en grov tilnærming hvor kritikaliteten i antagelsene kun avgjøres på grunnlag av kriteriene for kunnskapsstyrke. En grundigere metode demonstreres også. Her vurderes kritikaliteten til antagelsene ved å se på ulike avvik fra antagelsene. For hvert avvik graderes fire forskjellige momenter som lav, medium og høy. Disse momentene er henholdsvis størrelse på avvik, sannsynlighet for at avvik oppstår, hvilken effekt avviket gir på konsekvens og kunnskapsstyrken som de foregående vurderingene er basert på [2]. Denne kunnskapsstyrken vurderes ut fra de samme kriteriene fra Flage & Aven[10].

Metoden for vurdering av kunnskap lagt til grunn for denne oppgaven er basert på Flage & Aven[10]. Antagelsene som ligger til grunn for analysen blir listet og gitt en kritikalitetsgrad basert på sensitiviteten til antagelsene og kunnskapsstyrken bak antagelsene. Sensitivitetsgraden er en vurdering av hvor stor effekt avvik i antagelsene vil ha på resultatene og konklusjonene i analysen [10]. Sensitivitetsgraden til antagelsene blir satt til lav, medium eller høy [10]. Hvordan denne sensitivitetsgraderingen blir gjort vil det bli kommet tilbake til i avsnitt 2.4, som omhandler sensitivitetsanalyse. Vurderingen av kunnskapsstyrken antagelsen er basert på, vurderes ut ifra de samme kriteriene som i de foregående metodene beskrevet i dette kapittelet [10]. Kombinasjonen av sensitivitetsgrad og kunnskapsstyrke gir kritikalitetsgraden til antagelsen [10]. Matrisen i Figur 2 er et eksempel som viser hvordan kritikaliteten kan bli avgjort hvor grønn farge representerer lav, gul representerer medium og rød representerer høy kritikalitet.

<b>Sensitivitet:</b>	Lav	Medium	Høy
<b>Kunnskapsstyrke</b>			
Sterk			
Medium			
Svak			

Figur 2: Matrise for kritikalitetsgradering av antagelser. Rød = høy, gul=medium, grønn= lav

Som en videre utvidelse av beskrivelsen av kunnskap med denne metoden kan også modellkvaliteten og kvaliteten i datagrunnlaget vurderes og presenteres eksplisitt. Dette er for eksempel i tråd med Vinnem[7] som pekte på vurdering av robusthet, relevans, omfang og mulige trender som fire elementer som måtte adresseres i forbindelse med datagrunnlaget man baserte frekvensen av

initierende hendelser på. Vinnem[7] nevnte også at relevansen i modellene datagrunnlaget ble brukt i måtte adresseres. Dette aspektet av kunnskapsvurderingen vil dog ikke beskrives i detalj i denne sammenheng da det ikke er direkte relevant for metodeforslaget som presenteres.

### **Utvidelse av kritikalitetsvurdering**

Det er så langt vist at kritikalitetsvurdering av antagelser er en måte å vurdere og presentere kunnskapen og basisen i en QRA på. Det vil i denne delen videre bli klargjort hvordan metodeforslaget i denne oppgaven er en utvidelse av kritikalitetsvurderingen av antagelser.

Sensitivitetsvurderinger i QRA-sammenheng gjøres ofte ved bruk av one-factor-at-a-time (OAT) metodikk [13]. Dette vil si at man gjør endring i en antagelse om gangen, for så å undersøke effekten i output fra risikomodellen. Som sett fra forrige kapittel brukes denne informasjonen til å kartlegge hvilke antagelser som har høy grad av påvirkning på resultater og konklusjoner og videre til å vurdere kritikaliteten av antagelsen. Utfordringen ved en slik OAT metodikk er imidlertid at den ikke er laget for å kartlegge hvordan endringer i antagelser påvirker hverandres sensitivitet [11]. Sensitivitetsvurderingen som gjøres på antagelsene er derfor basert på at det ikke er avvik i de resterende antagelsene. Kritikalitetsvurderingen av antagelsene tar med andre ord ikke hensyn til om noen av antagelsene kan få forandret sin kritikalitet om antatte forhold endres. Følgelig kan kritikalitetsvurderingen bli mer fullstendig om det kan bli gjort rede for forhold kritikalitetsvurderingen kan endres.

Siden sensitivitet i antagelser er en sentral del av denne oppgaven vil det nå komme et kapittel om sensitivitetsanalyse og hvordan sensitiviteten i antagelser kan vurderes i en QRA kontekst.

## **2.4 Sensitivitetsanalyse**

### **2.4.1 Definisjon**

For å definere sensitivitetsanalyse brukes den brede definisjonen Saltelli et al[11]:

***Definition** Sensitivity analysis studies the relationships between information flowing in and out of the model"*

Saltelli et al [11: side 4]

### **2.4.2 Sensitivitetsmål**

Definisjonen på sensitivitetsanalyse presentert er svært bred. Saltelli et al[11] understreker hvorfor denne definisjonen er bred ved å vise flere ulike måter å måle sensitivitet. Et eksempel på slike ulike måter fra Saltelli et al[11] vil nå bli gjengitt. I dette eksempelet er det modellert en renseriregning som:

$$C = \sum_i C_i \quad (10)$$

Hvor

$C$  = total kostnad

$C_i$  = kostnad for plagg  $i$

Hvilket plagg, eller parameter i modellen, som er mest sensitiv kan nå måles på ulike måter. For eksempel kan man se på sensitiviteten til plagg  $i$  på følgende måte:

$$S_i = \frac{\partial C}{\partial C_i} \quad (11)$$

Sensiviteten blir her kalkulert fra et fast referansepunkt  $C^0$ . Ved dette punktet har også alle  $C_i$  en fast referanseverdi  $C_i^0$ .  $S_i$  er derfor et lokalt sensitivitetsmål som måler den umiddelbare effekten i  $C$  ved en liten endring i  $C_i$ . I dette tilfellet vil alle plaggene ha lik sensitivitet, nemlig 1.

En alternativ måte kan være å se på den umiddelbare effekten i  $C$  ved en liten fraksjonsmessig endring i  $C_i$ :

$$S_i = \frac{\partial C}{\partial C_i} \cdot \frac{C_i^0}{C^0} \quad (12)$$

Ved bruk av dette målet vil det plagget som er dyrest å rense ha størst sensitivitet.

Til slutt kunne man målt sensitiviteten som:

$$S_i = \frac{\partial C}{\partial C_i} \cdot \frac{std(C_i)}{std(C)} \quad (13)$$

Her kalkuleres sensitiviteten som den umiddelbare effekten i  $C$  ved å endre  $C_i$  en liten fraksjon av standardavviket til  $C_i$ . Ved dette målet vil plagget som har høyest standard avvik bli ansett som det mest sensitive.

#### 2.4.3 Sensitivitetsanalyse i risikoanalysekontekst

Som sett er definisjonen på sensitivitetsanalyse brukt av Saltelli et al [11] svært bred. Dette fører til at metodikken i sensitivitetsanalyser varierer etter hvilken kontekst man befinner seg i. En del av litteraturen har derfor også beskrevet

bruk av sensitivitetsanalyser i risikokontekst, og spesielt i sammenheng med pålitelighetsanalyse, se for eksempel Saltelli et al[11] og Kuo et al[12].

I forbindelse med QRA presenterer Aven[13] to sensitivitetsmål som ofte er brukt. Før disse blir presentert, vil uttrykk 2 bli omskrevet til å inkludere mer enn en antagelse. Husk at fra kapittel 2.2.2 er det generelle uttrykket for risikoindeks  $R$  er:

$$R(x_0) = cE(Y|X = x_0, K)$$

Hvor  $X = x_0$  representerer en antagelse som er gjort.

I en QRA vil det være svært mange ulike størrelser tapet  $Y$  er betinget på. Derfor lar vi nå:

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$$

$X$  representerer dermed alle ukjente størrelser som tapet  $Y$  er betinget på. Dermed kan en av antagelsene gjort i en QRA skrives:

$$X_i = x_{i,0}$$

Utrykk 2 omfatter dermed alle antagelsene gjort i en QRA.

Med denne basisen kan sensitivitetsmålene fra Aven [13] presenteres:

1. Den første metoden dreier seg om å vise hvordan risikoindeks  $R$  varierer som en funksjon av en antagelse  $X_i = x_{i,0}$  [13]. Alle andre antagelser holdes konstant. Ofte kan antagelsene varieres over store spenn for å rangere viktigheten av dem [13].
2. Den andre ofte brukte metoden presentert av Aven[13] er å finne den umiddelbare endringen i  $R$  ved endring i  $x_{i,0}$ .

$$S_i = \frac{\partial R(x_0)}{\partial x_{i,0}} \quad (14)$$

Den partiellderiverte risikoindeksen  $R$  med hensyn på  $x_{i,0}$  forstås som hvor fort  $R$  forandres ved forandring i  $x_{i,0}$ . Denne metoden tilsvarer sensitivitetsmålet fra uttrykk 11.

Legg merke til at begge disse metodene baserer seg på OAT. De tar følgelig ikke hensyn til vekselvirkning mellom antagelsene[11].

### **Et annet aspekt ved sensitivitetsanalyse i QRA**

Sensitivitet i antagelser kan ikke bare avgjøres ut i fra de kvantitative målene i forrige avsnitt. Man må også se sensitiviteten i antagelsene i sammenheng med konklusjonene i analysen. Dette understrekes av Aven[3] i forbindelse med hensikten med sensitivitetsanalyse :

*"The risk picture is not complete unless we have carried out sensitivity and robustness analyses. These analyses show to what extent the results are dependent on important conditions and assumptions, and what it takes for the conclusions to be changed"* Aven[3: side 48]

Sensiviteten i antagelsene må med andre ord også ses på i sammenheng med hva risikoanalysens konklusjoner er, og følgelig ikke bare i de numeriske forskjellene i  $R$  avvik i antagelsene kan forårsake. Begrepet sensitivitet i forbindelse med antagelser kan derfor ha to tolkninger. Denne tolkningsforskjellen, og følgene for metoden foreslått i oppgaven, vil bli videre utypet i kapittel 3.2.

### **Gradering av sensitivitet i antagelser**

Som presentert i avsnitt 2.3 må sensitiviteten i antagelsene graderes for å kunne gi en kritikalitetsvurdering av antagelsene. Flage & Aven [10] presenterer graderingskriterier for sensitivitet. Disse lyder som følger:

*"Significant sensitivity: Relatively small changes in base case values result in altered conclusions (e.g. exceeded risk acceptance criterion).*

*Moderate sensitivity: Relatively large changes in base case values needed to bring about altered conclusions.*

*Minor sensitivity: Unrealistically large changes in base case values needed to bring about altered conclusions."*

Flage & Aven [10: side 14]

I disse kriteriene ses sensitiviteten ut i fra hvor store endringer i antagelsene som kan føre til at konklusjoner blir forandret. Legg merke til at ved disse kriteriene blir sensitiviteten gradert ut i fra effekten en relativ endring i en antagelse har på konklusjonene. Kriteriene er dog fremsatt på generelle basis, og som Tuft et al[14] påpeker, kan kriteriene variere fra analyse til analyse. For eksempel ved dimensjonering av ulykkeslast kan kriteriene defineres ut ifra hvor store endringer i antagelsene som forårsaker større dimensjoneringslast [14].

### **Sensitivitetsmål for videre analyse**

For den videre analysen i kapittel 3 vil et lokalt sensitivitetsmål tilsvarende uttrykk 12 bli brukt. Dette fordi når parameterne i en modell har ulike enheter er det hensiktsmessig og normaliserer sensitivitetskoeffisienten slik at størrelsene

kan sammenlignes [11]. Som vist i kapittel 2.2.2 opereres det både med frekvenser og betingede sannsynligheter i risikomodellen. Videre legger også sensitivitetskriteriene vekt på den relative endringen man gjør i parametere i modellen. Dette gjør også at det er hensiktsmessig og normalisere sensitivitetskoeffisienten. I tråd med [11] noteres den lokale, normaliserte sensitivitetskoeffisienten som:

$$\tilde{S}_{x_{i,0}} = \frac{x_{i,0}^0}{R^0} \cdot \frac{\partial R}{\partial x_{i,0}} \quad (15)$$

Sensitiviteten forstås da som forholdet mellom den umiddelbare prosentmessige endringen i  $R$  en endring i  $x_{i,0}$  fører til, og den prosentvise endringen i  $x_{i,0}$ . Legg merke til at dette er et lokalt sensitivitetsmål som måler sensitivitet med utgangspunkt i referanseverdiene  $R^0$  og  $x_{i,0}^0$ . Disse referanseverdiene vil tilsvare "base case" for analysen. Base case defineres ved at alle antagelsene i analysen er på sitt opprinnelige nivå, uten avvik.

Sensivitetskriteriene fra Flage & Aven[10] vil det også bli referert til senere i oppgaven.

## 2.5 Avhengighet mellom antagelser

Basisen for å vurdere sensitivitet i antagelser er nå presentert. I dette kapittelet vil det kort bli gitt to konkrete eksempler på hvordan endring i en antagelse kan føre til endret sensitivitet i en annen antagelse. Dette for å illustrere problemstillingen med avhengige antagelser i en praktisk sammenheng. Disse to eksemplene vil begrense seg til en kvalitativ beskrivelse av tilfeller hvor antagelser får endret sensitivitet som følger av endring i en annen antagelse.

### 2.5.1 Eksempel 1

I det første eksempelet blir det presentert et scenario hvor endring i en antagelse gir større konsekvens av en viss hendelse. Dette fører til at antagelser som angår hyppigheten av hendelsen vil bli mer sensitive da en økning i disse nå vil bidra til mer risiko enn tidligere.

Risikoen i forbindelse med brønnutblåsning vurderes. Det er antatt at en person vil dø umiddelbart ved en brønnutblåsning. Denne antagelsen baserer seg hovedsakelig på antagelsen om gjennomsnittlig personellfordeling på dekk. Endres antagelsen om personellfordeling slik at to dør umiddelbart ved brønnutblåsning har alle antagelsene som påvirker frekvens av utblåsninger fått høyere sensitivitet. Dette fordi konsekvensen av en utblåsning nå er vurdert som større. Økning i lekkasjefrekvens vil derfor nå være forbundet med høyere risikoøkning. Dette viser at endring i antagelsen om personellfordeling på

dekk påvirker sensitiviteten i for eksempel antagelsen vedrørende antall brønnoperasjoner.

### 2.5.2 Eksempel 2

I det neste eksempelet fører en antagelse til at en viss hendelse har så lav sannsynlighet at den er neglisjert i risikoanalysen. Ved en endring i antagelsen kan den neglisjerte hendelsen bli betydelig mer sannsynlig. Dermed blir antagelsene vedrørende konsekvensen av hendelsen mer sensitive. Endringer i disse påvirker nå risikoen i stor grad, i motsetning til tidligere.

Skipskollisjon med plattform med energi høyere enn 10 MJ som følge av "drive off" (feil i posisjoneringssystemet) er vurdert som en neglisjerbar hendelse i en risikoanalyse. Antagelsen som ligger til grunn for å neglisjere denne hendelsen er at farten fartøyet kan få mot plattformen før operatøren får reagert på feilen er lav. Det er antatt 5 sekunders reaksjonstid for operatøren. Hvis denne antagelsen derimot endres, slik at fartøyet kan få betydelig fart mot plattformen ved drive off, vil antagelser i vedrørende plattformens tåleevne mot sammenstøt og frekvens av drive off bli mer sensitive. Sensiviteten i disse antagelsene er derfor avhengig av antagelsen om operatørens reaksjonstid ved drive off.

## 2.6 Premisskart

Til slutt i kapittel 2 vil et "premisskart" basert på Tuft et al[14] bli presentert. Premisskartet vil bli benyttet i metoden for å behandle avhengige antagelser.

### 2.6.1 Innledning

En QRA kan basere seg på svært mange antagelser[14]. At resultatene i risikoanalysen må ses i perspektiv med disse antagelsene har blitt understreket i kapittel 2.3. Dette impliserer at antagelsene må bli presentert så tydelig og tilgjengelig som mulig for beslutningstagere og andre berørte. Etter en gjennomgang av ulike ulykker som ikke ble forutsett på grunn av manglende kritisk vurdering av antagelsene i risikoanalysen konkluderer Beard[15]:

*"As a general principle, in making any risk assessment, it is necessary to be as open and explicit as possible about the assumptions made. This is so that others can see what has been done; not only scientists and engineers who are engaged in risk assessment but also those affected by the decision. Further, any data, information or background material should be readily available. It is not acceptable to refer to reports which are, effectively, not available to a reader."*

Beard [15: side 26]

Beard[15] understreker med dette at antagelsene må fremkomme så tydelig som mulig slik at alle som blir påvirket av en beslutning kan forstå grunnlaget beslutningen er basert på.



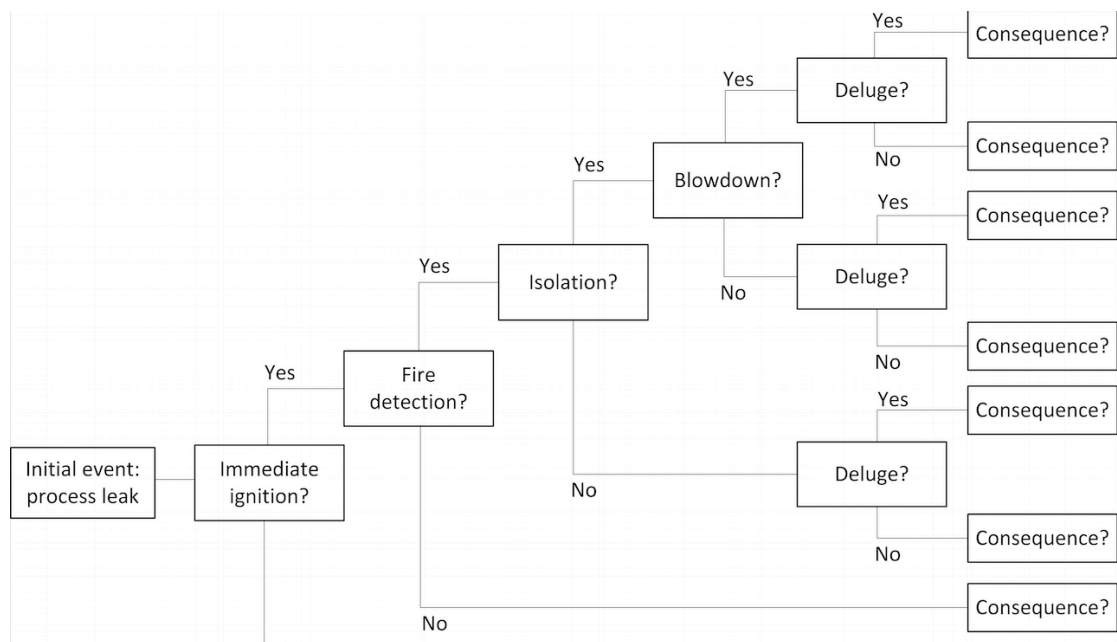
Som presentert i kapittel 2.3 blir allerede antagelsene listet og kritikalitetsvurdert i risikoanalysen. Som en videreutvikling i å presentere antagelsene så tilgjengelig som mulig har det videre blitt foreslått et "premisskart" i tillegg til den allerede eksisterende måten å presentere antagelsene[14]. Resten av dette kapittelet vil gi en presentasjon av dette premisskartet basert på Tuft et al[14].

### 2.6.2 Bruksområde

Premisskartet er tett knyttet til hendelsestreene implementert i en QRA. Kartet er en grafisk fremstilling av hvor i hendelsestreet de forskjellige antagelsene brukes. Kunnskapsstyrken og sensitiviteten i antagelsene inngår også i denne grafiske fremstillingen. Siden premisskartet tar utgangspunkt i hendelsestreene kan ikke ulike hendelsesgrupper fremstilles i samme kart. Dette fordi forskjellige initierende hendelser modelleres med ulike hendelsestre. Kartet er videre laget for å belyse en spesifikk beslutning, ikke installasjonens totale risiko. For eksempel vises et premisskart i forbindelse med dimisjonering av ulykkeslast av Tuft et al[14]. Nærmere bestemt viser kartet antagelsene som er brukt forbindelse med utregning av frekvens av forskjellige brannvarigheter ved prosessbranner. Premisskartet viser også hvor i hendelsestreet antagelsene er brukt, kunnskapsstyrken bak antagelsene og sensitiviteten i antagelsene i forbindelse med dimisjoneringslasten. Dette premisskartet vil bli kort gjengitt her for å illustrere bruken av et slikt premisskartet.

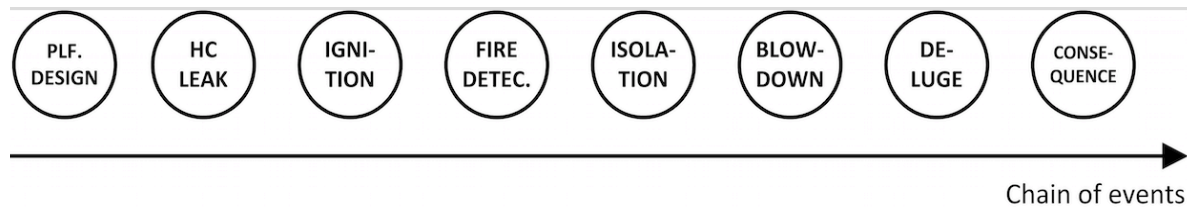
### 2.6.3 Eksempel på premisskart

Som utgangspunkt for kartet brukes hendelsestreet for prosesslekkasjer. For enkelhets skyld tas det kun utgangspunkt i grenen med umiddelbar tenning i eksempelet, ikke forsinket tenning. Dette hendelsestreet ser slik ut [14: side 2]:



Figur 3: Hendelsestre for prosesslekkasjer [14: s 2]

Ut i fra hendelsestreet får vi en hendelsessekvens for prosesslekkasjer. Antagelsene kan nå grupperes med hensyn på hvor i hendelsestreet de inngår. Legg også merke til at en ekstra node "Plf. Design" (Platform design) er lagt til. Her settes antagelser som angår installasjonens design og som ikke inngår i andre noder[14: side 3]:



Figur 4: Hendelsessekvens for prosesslekkasjer[14: s 3]

### Gruppering av antagelser i henhold til noder

Videre grupperes antagelsene etter hvilken node de inngår i. Tabell 1 er et eksempel på hvordan en slik gruppering kan se ut [14: side 3]:

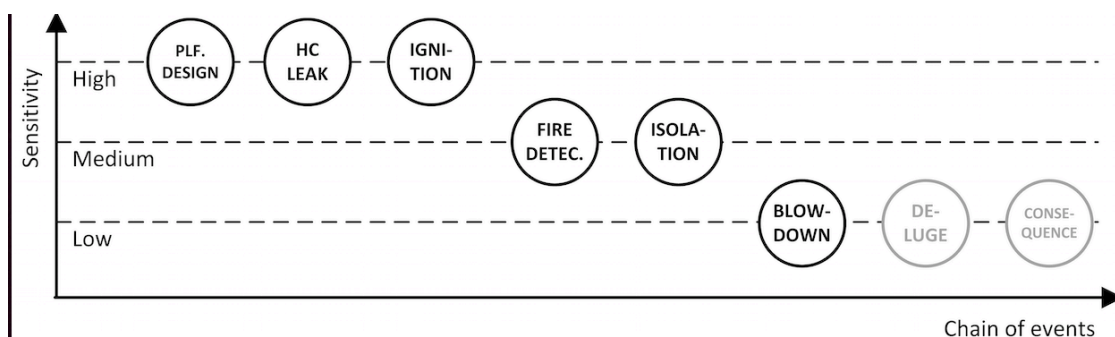
Table 1. List of premises related to each node. Premise #	Node	Premise name
P1	Plf. design	Location of bunding or grating
P2	Plf. design	Sectioning of process equipment
P3	HC leak	Condition of hydrocarbon segment (corrosion etc.)
P4	HC leak	Amount and type of equipment in area, including sectioning of process equipment
P5	HC leak	Probability of leak per type of equipment
P6	HC leak	Operation conditions (pressure, temperature) of process equipment
P7	HC leak	Probability of blowout or well re-lease per well or operation
P8	HC leak	Blowout rate
P9	HC leak	Number of wells and well operations
P10	HC leak	Categorization of leaks according to leak rate
P11	HC leak	Blowout rate
P12	HC leak	Riser placement and resistance against collision
P13	Ignition	Probability of immediate ignition
P14	Fire detection	Reliability

P15	Fire detection	Response time of detectors
P16	Fire detection	Vulnerability
P17	Isolation	Reliability
P18	Isolation	Vulnerability
P19	Isolation	Time to close valves
P20	Blowdown	Reliability
P21	Blowdown	Capacity
P22	Blowdown	Vulnerability
P23	Blowdown	Time to open valves
P24	Deluge	Reliability
P25	Deluge	Vulnerability
P26	Deluge	Capacity
P27	Consequence	Resistance of equipment against fire
P28	Consequence	Criteria for death of personnel
P29	Consequence	Criteria for loss of MSF

Tabell 1: Grupperte antagelser i noder[14: s 3]:

### Sensitivitet i antagelsene

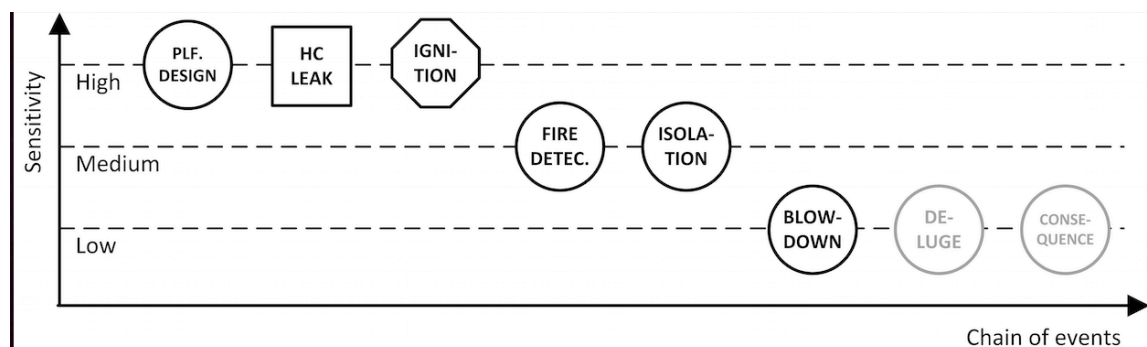
Videre blir sensitiviteten i hver av antagelsene avgjort. Dette kan gjøres på ulike måter, for eksempel med kriteriene presentert i kapittel 2.4.3. Merk at sensitiviteten i antagelsene vurderes i sammenheng med den spesifikke beslutningen som vurderes, ikke den generelle risikoen. Det betyr at siden det er dimisjoneringslast som vurderes i denne sammenhengen er sensitiviteten knyttet opp til hvilke antagelser som påvirker denne lasten mest. I premisskartet illustreres sensitiviteten i antagelsene ved hjelp av nodene. Noden får høy sensitivitet hvis en eller flere antagelsene i noden har høy sensitivitet. Noden får medium sensitivitet hvis en eller flere av antagelsene har medium sensitivitet. Noden får lav sensitivitet hvis alle antagelsene i noden har lav sensitivitet, eller at noden ikke er relevant for beslutningen. I eksempelet er ikke "deluge" og "consequence" relevant for dimisjoneringslast. Følgelig blir Figur 4 modifisert til [14: side 4]:



Figur 5: Hendelsessekvens med sensitiviteter[14: s 4]

## Kunnskapsstyrke i antagelsene

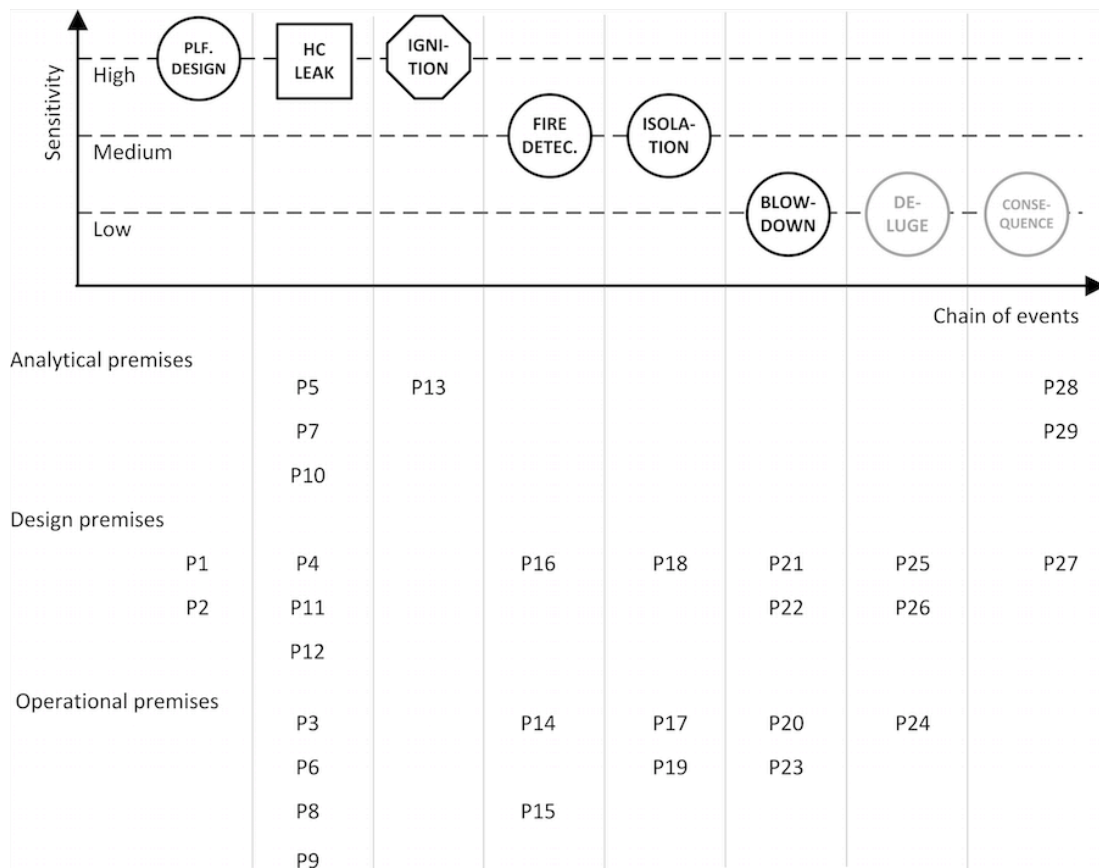
På samme måte som ved sensitivitet blir kunnskapsstyrken i antagelsen avgjort og illustrert. Kunnskapsstyrken i hver av antagelsene kan avgjøres med kriteriene for vurdering av kunnskapsstyrke presentert i kapittel 2.3. Kunnskapstyrken i antagelsene blir også illustrert ved hjelp av nodene. Har en eller flere av antagelsene i en node fått lav kunnskapsstyrke er noden firkantet. Hvis en eller flere antagelser har fått medium kunnskapsstyrke er noden oktagonal. Har alle antagelsene høy kunnskapsstyrke er noden sirkulær. Følgelig bli Figur 5 modifisert til [14: side 5]:



Figur 6: Hendelsessekvens med sensitivitet og kunnskapsstyrke. Sirkel=høy, oktagonal= medium og firkant=svak [14: s 5]

## Presentasjon

Til slutt settes Figur 6 sammen med en tabell av antagelsene og vi får det ferdige premisskartet. I denne tabellen er i tillegg antagelsene gruppert i analytiske premiss, designpremiss og operasjonelle premiss [14: side 5]:



Figur 7: Premissskart for dimisjonering av brannlast. [14: s 5]:

Kartet i Figur 7 gir en grafisk fremstilling av hvor antagelsene brukes, sensitiviteten og kunnskapsstyrken i antagelsene. Et slikt kart vil det bli referert til i metoden for behandling av avhengighet i antagelser.

## 3 Basis for metodikk

### 3.1 Innledning

Den teoretiske konteksten for oppgaven er nå klargjort i kapittel 2. Dette kapittelet vil videre beskrive basisen for metoden som presenteres i kapittel 4. Dette innebærer å belyse elementer som ligger til grunn for at metoden er utarbeidet som den er og en kvantitativ analyse av hvordan antagelser kan påvirke sensitiviteten til hverandre.

### 3.2 To tolkninger av sensitivitet

En utfordring når man ser på hvorvidt et avvik i en antagelse kan føre til forandret sensitivitet i en annen antagelse er at sensitivitet kan tolkes på to måter i QRA. Som det ble understreket i kapittel 2.4.3 kan man både se på sensitivitet med kvantitative sensitivitetsmål hvor sensitiviteten avgjøres ut i fra effekten i output en endring i en antagelse gir, eller man kan se på hvilke antagelser som har stor betydning for konklusjonene i risikoanalysen. I denne oppgaven refereres det til disse tolkningene som henholdsvis resultatsensitive og konklusjonssensitive antagelser. Denne distinksjonen av sensitive antagelser er viktig for å definere hva som menes med at en antagelse øker i sensitivitet, og for utarbeidelsen av metoden for identifisere avhengige antagelser i QRA.

#### 3.2.1 Resultatsensitive antagelser

For å identifisere resultatsensitive antagelser i en QRA kan de kvantitative viktighetsmålene for sensitivitetsanalyse i kapittel 2.4.3 brukes. Man ser dermed på effekten en endring i en antagelse har på output fra risikomodellen. Dette kan brukes til å rangere antagelsene med hensyn på sensitivitet. Sensitive antagelser i denne sammenhengen kan for eksempel bety:

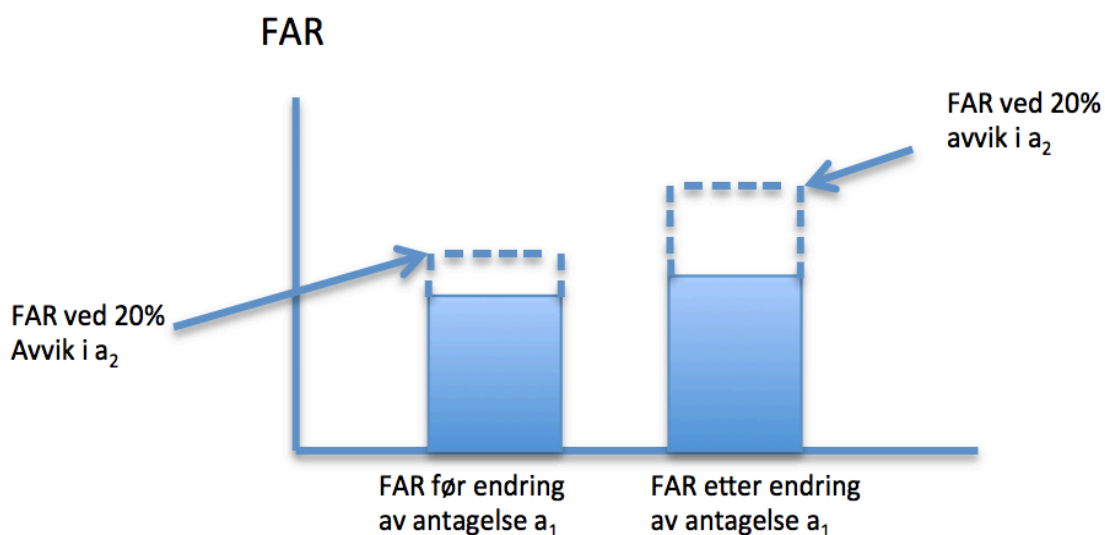
- 10% økning i lekkasjefrekvens fra et prosessområde fører til 10% økning i verdien  $FAR_{\text{prosessområde}}$ . Følgelig vil antagelsen om at historisk data vedrørende lekkasjefrekvenser er representativt for fremtiden på installasjonen bli ansett som sensitiv.
- 20 % økning i tennsannsynlighet i prosessområde gir 15% høyere frekvens for tap av HSF rømning. Følgelig blir antagelsene om at tennsannsynlighetsmodellen gir riktig sannsynlighet bli ansett som sensitiv.

#### **Forandret resultatsensitivitet som følger av avhengighet i antagelser**

Når man vurderer forandret sensitivitet som følger av avhengighet i antagelser med denne tolkningen av sensitivitet, vil det si at en antagelse får forandret påvirkning på resultatet som følger av endring i en annen antagelse. Et eksempel på dette er:

- Etter en endring i antagelsen  $a_1$  går en 10% endring i antagelse  $a_2$  fra å påvirke frekvens for tap av HSF rømning med 5% til 10%.

Figur 8 illustrer hvordan avhengighet mellom to antagelser fører til økt resultatsensitivitet for den ene antagelsen ved endring av den andre. Legg merke en 20% endring i  $a_2$  har større innvirkning på FAR-verdien etter endring av  $a_1$ .



Figur 8: Endret resultatsensitivitet i  $a_2$  pga avhengighet med  $a_1$

### Når kan økt resultatsensitivitet oppstå

Legg merke til at eksemplene gitt i kapittel 2.5 er situasjoner hvor resultatsensitiviteten i en antagelse øker på grunn av endring i en annen antagelse. Dette kan skje siden antagelsene inngår i samme hendelsessekvens i hendelsestreet. For å illustrere dette husk fra uttrykk 3 at det ble vist hvordan risiko grunnleggende sett blir kvantifisert ved:

$$R = \sum_i p_i \cdot c_i$$

Hvor:

$p_i$  = sannsynligheten for hendelsessekvens  $i$

$c_i$  = konsekvensen av hendelsessekvens  $i$

Både  $p_i$  og  $c_i$  kan være basert på en rekke antagelser. Fra uttrykket ser vi at to antagelser som inngår i hver sin hendelsessekvens 1 og 2 ikke kan påvirke hverandre på en slik måte som illustrert i Figur 8. Dette er fordi avvik i antagelsen i sekvens 1 ikke har betydning for risikobidraget fra sekvens 2. Følgelig vil et gitt avvik i antagelsen i sekvens 2 være forbundet med samme økning i  $R$ , uavhengig av om det er avvik i den andre antagelsen i sekvens 1. Vi kan dermed konkludere med to antagelser må bli brukt i samme

hendelsessekvens for at en endring i den ene antagelsen skal gjøre at et gitt avvik i den andre antagelsen "plutselig" gir et større risikobidrag en tidligere.

### 3.2.2 Konklusjonssensitive antagelser

En antagelse kan anses som konklusjonssensitiv hvis en forandring i antagelsen fører til forandring i en konklusjon. Konklusjon i denne sammenhengen kan referere til konklusjoner vedrørende om risikoen er innenfor en toleransegrense. En slik konklusjon handler først og fremst om den kvantitative risikobeskrivelsen, men kan også handle om kunnskapsstyrken hvis krav til denne er del av toleransegrensen. En sensitiv antagelse i denne sammenhengen vil være en antagelse hvor en relativt liten endring i antagelsen vil føre til endring i en konklusjon. Eksempler på dette kan være:

- 5% økning i lekkasjefrekvens fra et prosessområde fører at akseptkriteriet for tap av HSF rømning ikke er innfridd
- 7% høyere tennsannsynlighet i et område gjør at dette område overskrider akseptkriteriet for  $FAR_{\text{område}}$

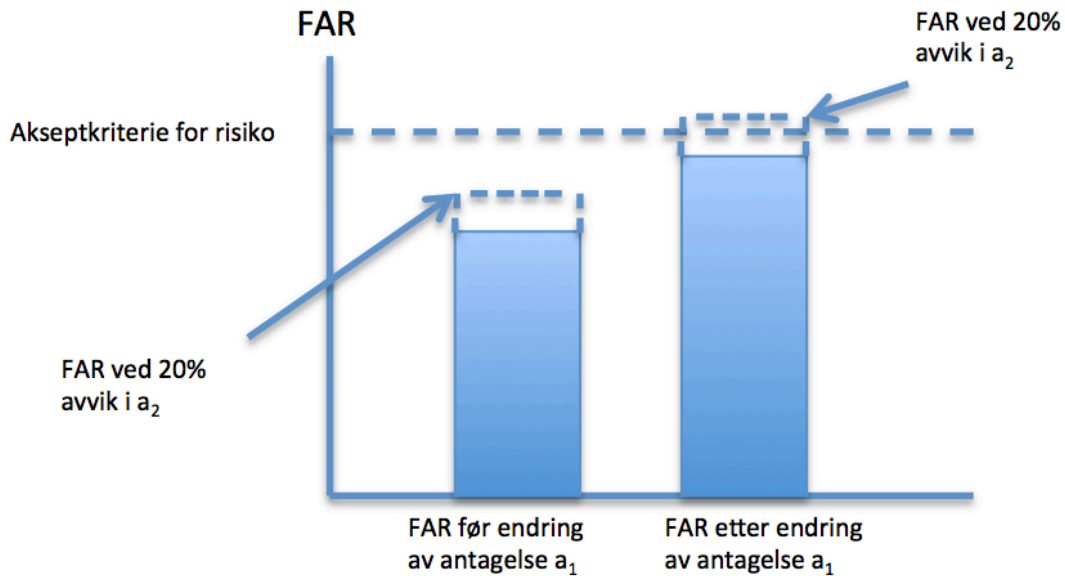
### Forandret konklusjonssensitivitet som følger av avhengighet i antagelser

Når man vurderer forandret sensitivitet som følger av avhengighet i antagelser med denne tolkningen av sensitivitet vil det si at en antagelse får forandret påvirkning på konklusjonen som følger av endring i en annen antagelse. Eksempler på dette er:

- Etter en endring i antagelse  $a_1$  går en 20% økning i antagelse  $a_2$  fra å ikke påvirke om akseptkriteriet for tap av HSF rømning holdes til å gjøre at akseptkriteriet ikke holdes.
- Etter en endring i antagelse  $a_1$  går en 30% økning i antagelse  $a_2$  fra å ikke påvirke om kriteriet for  $FAR_{\text{område}}$  holdes til å gjøre at akseptkriteriet ikke holdes.

Figur 9 illustrer hvordan avhengighet mellom to antagelser kan føre til økt konklusjonssensitivitet for den ene antagelsen ved endring av den andre. Legg merke til at avviket i  $a_2$  fører til den samme numeriske forskjellen i FAR etter endring i  $a_1$ .





Figur 9: Endret konklusjonssensitivitet i  $a_2$  pga avhengighet med  $a_1$

### Når kan økt konklusjonssensitivitet oppstå

Med denne tolkningen av sensitivitet kan i prinsippet alle antagelser få økt sensitivitet etter en endring i en annen antagelse. Dette er i motsetning til ved resultatsensitivitet, hvor antagelsene måtte inngå i samme hendessesekvens for å påvirke hverandres sensitivitet. For eksempel hvis endring i en antagelse fører til at et resultat er "nær" et akseptkriteriet, kan potensielt alle antagelser som inngår i dette resultatet ha blitt konklusjonssensitive, uavhengig om de inngår i de samme hendessesekvensene. Dette vil si at alle antagelser i en QRA i prinsippet kan få en signifikant endring i sensitivitet på grunn av avhengighet mellom antagelsene.

#### 3.2.3 Følge for behandling av avhengige antagelser

Fra avsnitt 3.2 fremkommer det at alle antagelser i en QRA i prinsippet kan påvirke hverandres konklusjonssensitivitet, uavhengig av om de brukes i de samme hendessesekvensene i hendestreet. Det er nok at endring i en antagelse fører et resultat "nær" en toleransegrense for risiko. Alle andre antagelser som inngår i dette spesifikke resultatet vil dermed ha blitt mer sensitive. Dette kan for eksempel være resultat som frekvens for tap av HSF rømning,  $FAR_{område}$  etc. Dette er i motsetning til ved resultatsensitivitet, da antagelsene må påvirke samme hendessesekvens for å kunne gi hverandre sensitivitetsøkning. Fra dette ser vi at ved endring av en antagelse kan en annen antagelse bli konklusjonssensitiv, uten å ha blitt resultatsensitiv. Motsatt kan også være tilfelle, en endring i en antagelse kan føre til at en annen antagelse øker i resultatsensitivitet, men på grunn av fortsatt god margin til akseptkriteriet regnes antagelsen ikke som konklusjonssensitiv. At de to sensitivitetene kan variere uavhengig av hverandre betyr dog ikke at de alltid vil være uavhengige. Det kan for eksempel tenkes at en antagelse som har fått økt resultatsensitivitet kan ha blitt konklusjonssensitiv også.

Siden de to typene sensitivitet kan variere uavhengig av hverandre i mange tilfeller må metoden for behandling av avhengige antagelser ta hensyn til dette. For eksempel kan man i prinsippet finne alle antagelser som potensielt kan bli konklusjonssensitive i en QRA, men dette trenger ikke å bety at man har funnet alle antagelser som potensielt kan bli resultatsensitive. Følgelig trengs forskjellige metoder for å identifisere de to tilfellene. I denne oppgaven vil det bli foreslått en metode for å avdekke antagelser som kan få en relativt stor økning i resultatsensitivitet. Disse identifiserte antagelsene vil videre bli undersøkt i hvilken grad de har blitt konklusjonssensitive. Med andre ord vil ikke metoden i denne oppgaven ta sikte på å avdekke antagelser som kan få betydelig økning i konklusjonssensitivitet, men begrenset økning i resultatsensitivitet. Siden metoden ikke tar hensyn til disse tilfellene vil det nå bli sett på hvilken informasjonsverdi og beslutningstøtte avdekking av henholdsvis potensielt konklusjonssensitive og resultatsensitive antagelser gir.

#### 3.2.4 Informasjon til beslutninger

Ved å kartlegge antagelser som potensielt kan bli konklusjonssensitive får man informasjon om hvordan en konklusjon kan bli forandret. Med andre ord brukes denne informasjonen i forbindelse med vurdering av risiko opp mot forskjellige risikokriterier. For eksempel kan det fremkomme at en forandring i en antagelse fører til at tre andre antagelser blir svært sensitive for hvorvidt risikonivået regnes akseptabelt. De tre antagelsene har ingen økt påvirkning på det numeriske resultatet, men siden resultatet nå er "nærmere" grensen for akseptabel risiko, blir de vurdert som mer sensitive. Dette ble illustrert i Figur 9. Informasjonen sier med andre ord kun noe om antagelsers viktighet i forhold til en satt grense (en konklusjon). De tre antagelsene har ikke økt i viktighet for det generelle sikkerhetsnivået på installasjonen. En forandring i en av dem vil fortsatt være forbundet med den samme økningen i risiko, forskjellen er at denne økningen nå er det som får toleransegrensen til å brytes.

Kartlegging av antagelser som potensielt kan få en relativt stor endring i resultatsensitivitet er på sin side relatert til informasjon om hvilke antagelser som kan bli betraktelig viktigere for risikonivået på installasjonen, uavhengig av satte akseptkriterier. Med andre ord kan slik informasjon fortelle at antagelser, som er blitt vurdert som mindre viktige for sikkerheten på installasjonen, blir viktige om visse andre antagelser har avvik. Denne informasjonen gir videre innsikt i hva som er viktige antagelser for å holde risikonivået så lavt som praktisk mulig. Dette kan videre gi input til eksempelvis hvilke risikoreducerende tiltak som vil være mest effektive å implementere for å redusere risiko.

En mer omfattende drøfting av valget om å fokusere på å avdekke antagelser som potensielt kan få relativt stor økning i resultatsensitivitet følger i kapittel 5.1.

### 3.3 Antagelse og parameter

Et annet skille som vil bli gjort i forbindelse med metodeforslaget er i forbindelse med antagelser og parametere. Husk fra kapittel 2.2 at nodene i et typisk hendelsestre for hydrokarbonhendelser er relatert til:

- Deteksjon av lekkasje
- Antenning av lekkasje
- Forsinket antenning av lekkasje
- Feil i ESD system
- Feil i avblødningsventiler
- Feil i Isoleringsventiler
- Feil i branndeteksjon
- Feil i røykdeteksjon
- Feil i sprinklersystem
- Eskalering

Det ble også sagt at for hver node blir hver gren i hendelsestreet til to. Her blir to betingede sannsynlighetsverdier tildelt, en for ja og en for nei. Hver av disse betingede sannsynlighetene i hendelsestreet vil bli referert til som parameter i den videre analysen. Videre vil også frekvens av initierende hendelse og forventet konsekvens av slutthendelse bli referert til som parameter. Det vil si at en parameterendring refererer til en endring i en størrelse direkte i hendelsestreet. Merk også at ved endring av en betinget sannsynlighetsparameter endres en annen parameter indirekte. For eksempel hvis man øker sannsynligheten for feil i gassdeteksjon med 0,01, senker man sannsynligheten for gassdeteksjon med 0,01. Følgelig endres en parameter indirekte ved endring av den første parameteren.

Videre kan det ligge flere antagelser til grunn for en parameterverdi. Noen eksempler ble gitt på dette i kapittel 2. Dette kunne være:

- Plattformens bærende struktur tåler kollisjonsenergi på opp til 9 MJ. Denne antagelsen brukes for å angi forventet konsekvens av slutthendelse
- Ved brønnutblåsning er den potensielle raten 80 kg/s. Denne antagelsen vil også brukes for å angi forventet konsekvens av slutthendelse.
- Gasskonsentrasjonen synker med 50% for hver åttende meter fra lekkasjepunktet. Antagelse om at en gassspredningsmodell gir riktige resultater. Denne antagelsen kan brukes for eksempel for å angi sannsynligheten for tenning gitt en gasslekkasje.

Dette er eksempler på at man ved bruk av ulike modeller tildeler verdier til parameterne i hendelsestreet. Antagelsene er relatert til observerbare størrelser i disse modellene. For å gjøre sensitivitetsanalyse på antagelser i praktisk sammenheng må man ofte finne ut hvilken forandring en endring i en antagelse

vil gi den relaterte parameteren, for så å gjøre en sensitivitetsanalyse på antagelsen indirekte ved å gjøre endring i parameteren.

Dette skillet mellom antagelser og parametere kan ses på i sammenheng med Borgonovo & Apostolakis[16]. Her oppgis risikoindeks R som:

$$R = h(f_{ie}, p(BE_j)) \quad (16)$$

Hvor :

$f_{ie}$  = frekvens av initierende hendelse  $i$ ,  $i = 1, \dots, z$ , hvor  $z$  er det totale antallet initierende hendelser i analysen

$p(BE_j)$  = sannsynligheten for "basishendelse"  $j$ ,  $j = 1 \dots n$ , hvor  $n$  er totalt antall basishendelser i analysen.

Basishendelse refererer til feilmoduser som omfatter tilfeldige feil, vanlige feil og menneskelige feil [16]. På lignende måte kan vi betrakte parameterne i hendelsestreet som basishendelser som omfatter forskjellige feilmoduser og forhold. For eksempel kan feil i gassdeteksjon ha ulike årsaker som svikt i vedlikehold, signalfeil, sensorfeil, feil plassering etc. Parameterne i hendelsestreet kan derfor ses på som  $p(BE_j)$  eller  $p(\overline{BE}_j)$

Videre viser Borgonovo & Apostolakis[16] at  $p(BE_j)$  ofte kan være funksjon av en modell. Dette eksemplifiseres hvis  $p(BE_j)$  var sannsynlighet for feiling av en komponent:

$$p(BE_j) = \frac{\lambda_j \tau}{2} \quad (17)$$

Hvor

$\lambda$  = feilrate

$\tau$  = tidsenheter til fornying

Antagelsene vil i dette tilfellet være relatert til størrelsen på  $\lambda$  og  $\tau$ . Dette skillet mellom antagelse og parameter er viktig for den videre analysen da sensitivitetsanalyse på antagelser vil bli gjort indirekte gjennom endring av parametere i hendelsestreet. Dette vil også si at ved å identifisere parametere som kan få økt sensitivitet, identifiserer vi også antagelser som kan få økt sensitivitet. Parameterne i et hendelsestre vil videre bli referert til med symbolet  $\rho$  slik at:

$$\rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n)$$

Dermed representerer  $\rho$  alle parameterne i et hendelsestre.

### 3.4 Sensitivitetsanalyse for en parameter i hendelsestre

Dette delkapittelet vil det bli demonstrert en sensitivitetsanalyse på en antagelse  $X_i = x_{i,0}$ . Dette vil gjøres indirekte ved å undersøke sensitiviteten i en parameter  $\rho_i$ . Denne sensitivitetsanalysen vil være basert på avsnitt 2.4. Videre i denne delen vil det bli vist at for en parameter i et generelt hendelsestre kan sensitiviteten  $\tilde{S}_{\rho_i}$ , fra uttrykk 15, skrives om på grunn av lineært forhold mellom  $\rho$  og  $R$ . Utrykk 15 kan dermed omskrives til:

$$\tilde{S}_{\rho_i} = \frac{\rho_i^0}{R^0} \cdot \frac{\partial R}{\partial \rho_i} = \frac{\rho_i^0}{R^0} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta \rho_i} \quad (18)$$

Hvor:

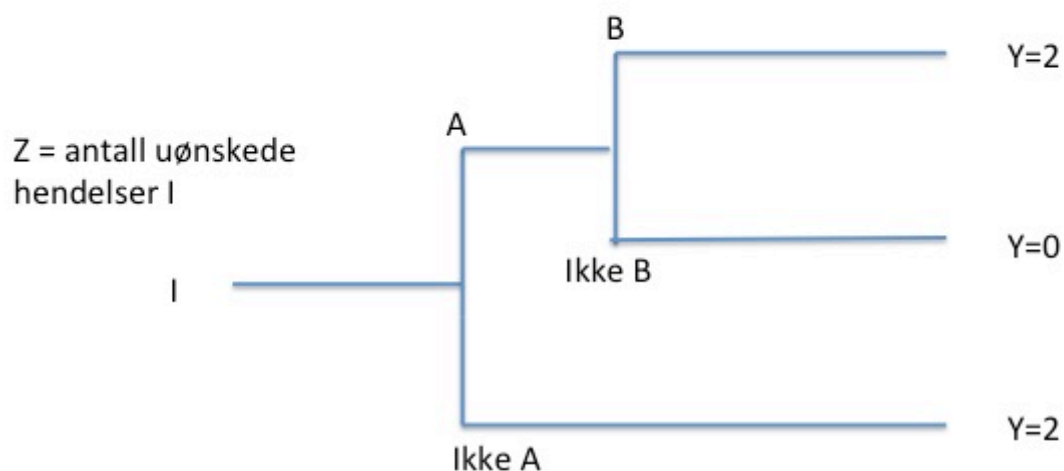
$\Delta \rho_i$  = endring i  $\rho_i$

$\Delta R$  = endring i  $R$  som følger av endring i  $\rho_i$

Ved å uttrykke  $\tilde{S}_{\rho_i}$  med hensyn på  $\Delta R$  og  $\Delta \rho_i$ , i stedet for  $\partial R$  og  $\partial \rho_i$ , kan  $\tilde{S}_{\rho_i}$  brukes som et generelt sensitivitetsmål som sier at en  $t\%$  endring i  $\rho_i$ , fører til en  $\tilde{S}_{\rho_i} \cdot t\%$  endring i  $R$ . Dette vil gjelde ved referanseverdiene  $R^0$  og  $\rho_i^0$ . Dette generelle sensitivitetsmålet vil videre bli brukt til å undersøke sensitivitetsendringer som kan oppstå i andre parametere i hendelsestreeet ved endring av  $\rho_i$ . Når vi vet hvilke sensitivitetsendringer som kan skje i hendelsestreeet kan vi også si noe om hvor store sensitivitetsendringer som kan oppstå i antagelsene.

#### Hendelsestre for eksempel

Gjennom denne delen vil det bli referert til hendelsestreeet i Figur 10:



Figur 10: Eksempel på hendelsestre

Hendelsestreet i Figur 10 viser forskjellige hendelsessekvenser av den uønskede hendelsen  $I$ .  $Y$  representerer antall døde for de forskjellige sekvensene, mens  $Z$  er det årlige antallet uønskede hendelser  $I$ .

For videre analyse la  $R = PLL$ .  $PLL$  tolkes som den årlige forventningsverdien for tap av liv. Dette gjøres ved å tildele verdien  $E(Z)$  og tildele sannsynlighetene  $P(A)$  og  $P(B|A)$ . Med disse parameterne kan man videre kalkulere sannsynligheten for de ulike hendelsessekvensene. Til slutt kan man multipliserer denne sannsynligheten med antall døde om sekvensen skulle inntreffe. Følgelig får man resultatene:

$$PLL_1 = f \cdot p_1 \cdot p_2 \cdot 2$$

$$PLL_2 = f \cdot (1 - p_1) \cdot (1 - p_2) \cdot 0$$

$$PLL_3 = f \cdot (1 - p_1) \cdot 2$$

Hvor:

$$f = E(Z)$$

$$p_1 = P(A)$$

$$p_2 = P(B|A)$$

$PLL_n$  representerer følgelig forventet årlig antall døde som følger av en spesifikk hendelsessekvens. For å finne årlig antall forventede døde som følger av den initierende hendelsen  $I$  adderes alle  $PLL_n$ .

$$PLL = \sum PLL_n \quad (19)$$

Videre vil vi se på hvordan sensitiviteten i parameterne  $f$ ,  $p_1$  og  $p_2$  i risikomodellen avgjøres.

### Sensitivitetsanalyse

Med referanse til kapittel 2.4.3, vil vi nå undersøke sensitiviteten i parameter  $\rho_i$ . Det vil først bli brukt metoden hvor det kartlegges hvordan risikoindeks  $PLL$  varierer med hensyn på  $\rho_i$ . En sensitivitetsanalyse på en av parameterne i hendelsestreet i eksemplet vårt kunne vært gjort på følgende måte:

La

$$\rho_i = p_2$$

Man ønsker å vise hvordan  $PLL$  varierer i forhold til endringer i  $p_2$ . Dette vil bli gjort ved å kartlegge forskjellige endringer i  $PLL$ , som følger av forskjellige endringer i  $p_2$ . Legg merke til at dette er en lokal sensitivitetsanalyse som tar

utgangspunkt i referanseverdiene  $p_2^0$  og  $PLL^0$ . Disse verdiene representerer basecase i analysen.

La referanseverdiene være:

$$p_2^0 = 0,01$$

$$PLL^0 = 0,006$$

Resultatene av å endre  $p_2$  med forskjellige verdier, og forholdet mellom endringene er vist i Tabell 2.

Endring i $p_2$ ( $\Delta p_2$ )	Endring i $PLL$ som følger av endring i $p_2$ ( $\Delta PLL$ )	$\frac{\Delta PLL}{\Delta p_2}$
0,002	0,0006	0,3
0,004	0,0012	0,3
0,01	0,003	0,3

Tabell 2: Sensitivitetsanalyse for  $p_2$

Fra tabellen ser man at  $PLL$  varierer som en lineær funksjon med hensyn på  $p_2$  med stigning 0,3. Dette tallet betyr at en endring  $\Delta p_2$  i  $p_2$  vil føre til en  $(\Delta p_2 \cdot 0,3)$  endring i  $PLL$ .

Siden forholdet mellom  $\Delta PLL$  og  $\Delta p_2$  er konstant 0,3, uavhengig av størrelsen på  $\Delta p_2$ , kan vi sette :

$$\frac{\Delta PLL}{\Delta p_2} = \frac{\partial PLL}{\partial p_2} = 0,3$$

Nå kan også sensitiviteten fra uttrykk 15 regnes ut:

$$\tilde{s}_{p_2} = \frac{p_2^0}{PLL^0} \cdot \frac{\partial PLL}{\partial p_2} = \frac{p_2^0}{PLL^0} \cdot \frac{\Delta PLL}{\Delta p_2} = \frac{0,01}{0,006} \cdot 0,3 = 0,5$$

Følgelig viser sensitivitetsanalysen at en  $t\%$  endring i  $p_2$  gir en  $0,5 \cdot t\%$  endring i  $PLL$ . Dette gjelder for referanseverdiene  $p_2^0$  og  $PLL^0$ .

Til slutt i sensitivitetsanalysen kan det bli undersøkt hvordan endringer i antagelsen  $X_i = x_{i,0}$  påvirker  $p_2$ . Dette vil variere fra modell til modell og vil derfor ikke bli drøftet mer i detalj i dette eksempelet.

Det er nå vist hvordan en sensitivitetsanalyse på en antagelse gjøres gjennom å se på sensitiviteten i en hendelsestrep parameter. Dette vil også være måten og analysere sensitiviteten i antagelser på videre.

Ved å nå vise at det generelt er lineær sammenheng mellom  $\rho_i$  og  $R$  i et hendelsestre, vises det at dette uttrykket holder:

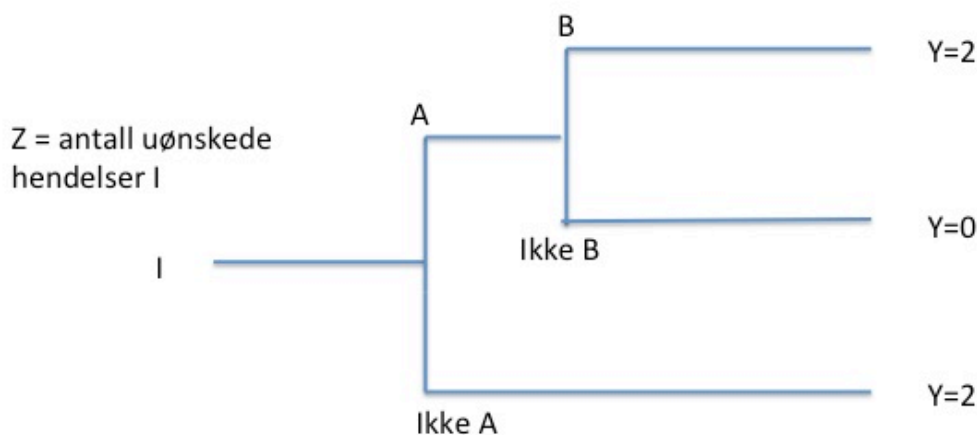
$$\frac{\partial R}{\partial \rho_i} = \frac{\Delta R}{\Delta \rho_i}$$

Som nevnt i innledningen til dette delkapittelet gjør denne sammenhengen at vi kan omskrive uttrykk 15 til å ikke gjelde kun for den umiddelbare endringen i  $R$ , men endringen i  $R$  for alle endringer av  $\rho_i$ :

$$\tilde{S}_{\rho_i} = \frac{\rho_i^0}{R^0} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta \rho_i}$$

Dette er et svært anvendelig sensitivitetsmål for å studere sensitivitetsendringer i en parameter, som følger av endring i en annen parameter. Dette fordi sensitiviteten kan uttrykkes med et enkelt tall  $\tilde{S}_{\rho_i}$ . Dette tallet sier at en  $t\%$  endring i  $\rho_i$  vil gi en  $\tilde{S}_{\rho_i} \cdot t\%$  endring i  $R$ .

For å vise at det er lineær sammenheng mellom  $\rho_i$  og  $R$  må vi se på hendelsestreet i Figur 10 igjen:



Figur 11: Eksempel på hendelsestre

Husk at hendelsessekvensene som fra hendelsestreet er:

$$PLL_1 = f \cdot p_1 \cdot p_2 \cdot 2$$

$$PLL_2 = f \cdot (1 - p_1) \cdot (1 - p_2) \cdot 0$$

$$PLL_3 = f \cdot (1 - p_1) \cdot 2$$



Siden alle parameter som inngår i en spesifikk hendelsessekvens multipliseres med hverandre for å finne  $PLL_n$ , vil en prosentvis økning i en parameter føre til samme prosentvise økning i  $PLL_n$  som den inngår. Dette ses ut i fra for eksempel første sekvens i eksempelet. Vi vil nå gi  $p_2$  en endring på fraksjon  $t$ .

$$PLL_1 = f \cdot p_1 \cdot p_2 \cdot 2 \Rightarrow$$

$$t \cdot PLL_1 = f \cdot p_1 \cdot p_2 \cdot t \cdot 2$$

Når  $p_2$  endres med faktor  $t$  fører dette til en fraksjon  $t$  endring i  $PLL_1$  også. Ingen endring skjer i  $PLL_2$  da konsekvensen for slutthendelsen i den grenen er 0.

Videre er:

$$PLL = \sum_{i=1}^n PLL_n$$

Siden kun  $PLL_1$  endres som følger av parameterendringen får vi nå følgende uttrykk for total  $PLL$ :

$$(t \cdot PLL_1) + PLL_2 + PLL_3 = PLL$$

Man ser at forandringen  $t$  som vi gav  $p_2$  danner en lineær funksjon med  $PLL$  på formen  $ax + b = y$ . Følgelig er det lineært forhold mellom  $\Delta PLL$  og  $\Delta p_2$ .

La oss også undersøke om forholdet mellom økningen i en parameter  $\rho_i$  og  $PLL$  også er lineært hvis  $\rho_i$  er en sannsynlighetsparameter, og  $(1 - \rho_i)$  også inngår i en gren som fører til dødsfall. La oss nå si at antall døde for sekvens 2 er 1 i stedet for 0. Da får man sekvensene:

$$PLL_1 = f \cdot p_1 \cdot p_2 \cdot 2$$

$$PLL_2 = f \cdot p_1 \cdot (1 - p_2) \cdot 1$$

$$PLL_3 = f \cdot (1 - p_1) \cdot 2$$

La også nå:

$$\rho_i = p_2$$

Nå vil vi gi  $p_2$  en økning for å undersøke sensitiviteten i  $p_2$ . Som vist vil en prosentmessig forandring i  $p_2$  føre til samme prosentmessige forandring i  $PLL_1$ . Følgelig kan vi skrive  $\Delta PLL_1$  som:

$$\Delta PLL_1 = \frac{\Delta p_2}{p_2^0} \cdot PLL_1^0$$

Hvor

$PLL_1^0$  = verdien av  $PLL_1$ , før endring av  $p_2$ .

Endringen i  $PLL_2$  kan også skrives med hensyn på  $\Delta p_2$ , men denne endringen vil ha motsatt fortegn. Vi kan vi skrive  $\Delta PLL_2$  som:

$$\Delta PLL_2 = -\frac{\Delta p_2}{1 - p_2^0} \cdot PLL_2^0$$

Hvor

$PLL_2^0$  = verdien av  $PLL_2$ , før endring av  $p_2$ .

Den nye verdien av  $PLL$ , etter endring av  $p_2$ , fås nå ved å sette inn  $\Delta PLL_1$  og  $\Delta PLL_2$  i uttrykket for  $PLL$ . Vi vil nå se at forholdet mellom  $\Delta p_2$  og  $\Delta PLL$  er lineært. Merk at  $\Delta p_2$  er variabelen mens  $p_2^0$  den faste referanseverdien:

$$PLL = \sum_{i=1}^n PLL_n = (PLL_1^0 + \Delta PLL_1) + (PLL_2^0 + \Delta PLL_2) + PLL_3 =$$

$$(PLL_1^0 + \left(\frac{\Delta p_2}{p_2^0} \cdot PLL_1^0\right)) + (PLL_2^0 - \left(\frac{\Delta p_2}{1 - p_2^0} \cdot PLL_2^0\right)) + PLL_3 =$$

$$\Delta p_2 \left(\frac{PLL_1^0}{p_2^0} - \frac{PLL_2^0}{(1 - p_2^0)}\right) + PLL_1^0 + PLL_2^0 + PLL_3$$

Igjen har vi fått en rett linje på formen  $ax + b = y$  hvor  $\Delta p_2 = x$ , og  $PLL = y$ .

Basert på dette avsnittet kan vi konkludere at endringen i en parameter  $\rho_i$  vil være lineær i forhold til endringen i  $PLL$  som dette medfører. Dette gjør at forholdet mellom  $\Delta \rho_i$  og  $\Delta PLL$  er konstant. Derfor kan vi skrive:

$$\frac{\Delta PLL}{\Delta \rho_i} = \frac{\partial PLL}{\partial \rho_i}$$

Som sett i kapittel 2.2.2 får man både *FAR* og *AIR* ved å multiplisere *PLL* med en konstant *c*. Følgelig kan uttrykket bli generalisert for risikoindeksene *FAR*, *AIR* og *PLL*

$$\frac{\Delta R}{\Delta \rho_i} = \frac{\partial R}{\partial \rho_i}$$

Det er derfor blitt vist at for  $\rho_i$  kan sensitiviteten  $\tilde{S}_{\rho_i}$  med hensyn på *R* uttrykkes som i uttrykk 18:

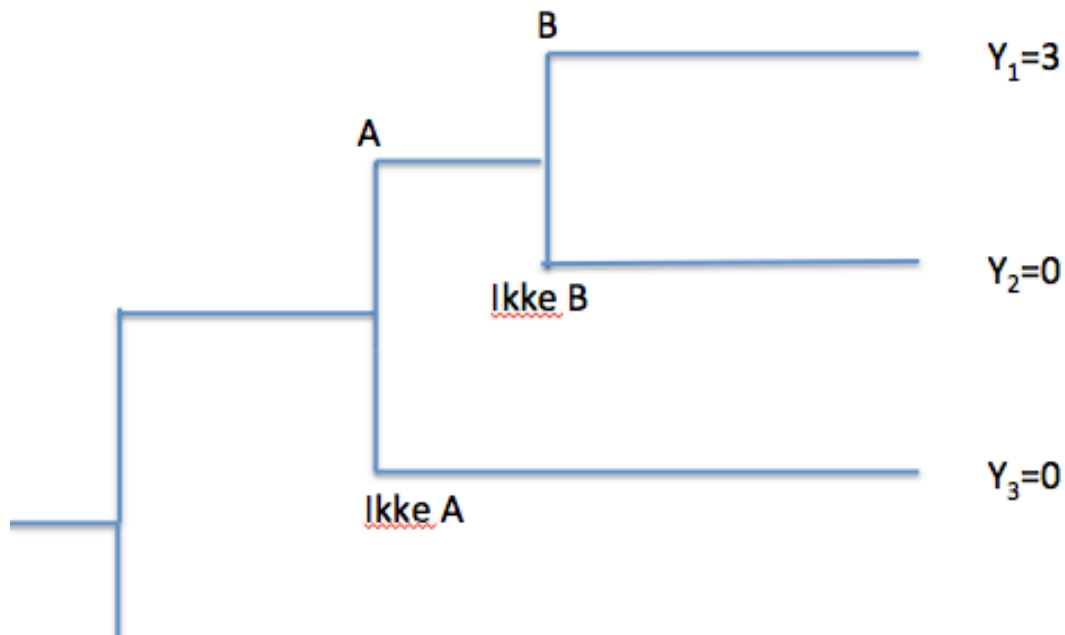
$$\tilde{S}_{\rho_i} = \frac{\rho_i^0}{R^0} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta \rho_i}$$

Siden dette nå er vist kan uttrykk 18 brukes som et generelt sensitivitetsmål for en parameter  $\rho_i$  i et hendelsestre.  $\tilde{S}_{\rho_i}$  forteller at en *t*% endring i  $\rho_i$ , fører til en  $\tilde{S}_{\rho_i} \cdot t\%$  endring i *R*, ved referanseverdiene  $R^0$  og  $\rho_i^0$ .

$\tilde{S}_{\rho_i}$  vil nå bli brukt for å vise hvilke sensitivitetsendringer som kan oppstå i en parameter på grunn av en endring i en annen parameter i hendelsestreet. Dette kan videre bli brukt til å si noe om hvilke sensitivitetsendringer som oppstå i en antagelse som følger av endring i en annen antagelse.

### 3.5 Sensitivitetsendringer i hendelsestre

Det vil nå bli undersøkt hvilken effekt en økning i en parameter  $\rho_i$  kan ha for sensitiviteten til en annen hendelsestreparameter  $\rho_j$ . Som basis for dette vil et utdrag fra et tenkt hendelsestre brukes. Legg merke til at dette kun er et utdrag og derfor at det er flere grener av hendelser som ikke viser i illustrasjonen, men som inngår i hendelsestreet.



Figur 11: Utdrag av hendelsestre

Fra dette hendelsestreet vil siste del av grenene i illustrasjonen bli:

$$\dots\dots p_1 \cdot p_2 \cdot 3 = PLL_1$$

$$\dots\dots p_1 \cdot (1 - p_2) \cdot 0 = 0$$

$$\dots\dots (1 - p_1) \cdot 0 = 0$$

Hvor:

$$\rho_i = p_1 = P(A)$$

$$\rho_j = p_2 = P(B|A)$$

Alle delresultat  $PLL_n$  fra grenene i hendelsestreet bidrar til  $PLL$ :

$$PLL = \sum PLL_n$$

Eksempelet i Figur 11 er valgt fordi det i denne sammenhengen vil bli forsøkt å demonstrere hvor store endringer i sensitivitet som kan oppstå i  $\rho_j$  ved endring av  $\rho_i$ . Derfor brukes et hendelsestre hvor parameter  $p_1$  og  $p_2$  utelukkende inngår

i samme gren. Dette regnes som et tilfelle hvor parametere påvirker hverandre i størst mulig grad og det dermed kan oppstå størst sensitivtetsendring.

### Metode for å avgjør sensitivtetsendring

Måten for å avgjøre sensitivtetsforskjell i  $p_2$ , før og etter endring i  $p_1$ , vil være ved å først avgjøre den lokale sensitiviteten i  $p_2$  ved basecase. Det vil si før endring i  $p_1$ . Dette får vi fra uttrykk 18:

$$\tilde{S}_{p_2} = \frac{p_2^0}{PLL^0} \cdot \frac{\Delta PLL}{\Delta p_2}$$

Hvor:

$PLL^0$  = referanseverdien til  $PLL$  (basecase)

$p_2^0$  = referanseverdien av  $p_2$  (basecase)

$\Delta p_2$  = endring i  $p_2$

$\Delta PLL$  = endring i  $PLL$  som følger av endring i  $p_2$

Etter dette vil  $p_1$  bli gitt en økning. Sensitiviteten vil nå på nytt bli målt i  $p_2$ . Denne gangen med ny referanseverdi av  $PLL$  da endringen i  $p_1$  påvirker referanseverdien. Da får vi uttrykk for sensitiviteten etter endring i  $p_1$  som:

$$\tilde{S}_{p_2,ny} = \frac{p_2^0}{PLL^{0,ny}} \cdot \frac{\Delta PLL}{\Delta p_2} \quad (20)$$

Hvor:

$\tilde{S}_{p_2,ny}$  = sensitivitet i  $p_2$  etter endring av  $p_1$

$PLL^{0,ny}$  = ny referanseverdi av  $PLL$  på grunn av endring i  $p_1$

$p_2^0$  = referanseverdi av  $p_2$  (samme som ved basecase)

Med uttrykkene for sensitiviteten til  $p_2$ , før og etter endring i  $p_1$ , kan vi uttrykke den relative sensitivtetsendringen i  $p_2$  som følger av endring i  $p_1$ :

$$\tilde{S}_{r,p_2} = \frac{\tilde{S}_{p_2,ny}}{\tilde{S}_{p_2}} \quad (21)$$

Hvor:

$\tilde{S}_{r,p_2}$  = relativ sensitivtetsendring i  $p_2$  etter endring i  $p_1$

Den relative sensitivtetsendringen  $\tilde{S}_{r,p_2}$  kan forstås som faktoren sensitiviteten til en parameter øker med. Er den relative økningen 5, parameteren fått 5 ganger

så høy sensitivitet. Med andre ord sier dette noe om i hvor stor grad parameteren har blitt mer viktigere.

For å illustrere dette videre kan vi tenke oss at sensitiviteten til  $p_2$  ved basecase er 0,1. Dette vil si at en 10% økning i  $p_2$  gir en  $0,1 \cdot 10\% = 1\%$  økning i  $PLL$ . Etter en endring i  $p_1$  får  $p_2$  en relativ sensitivitetsendring på 5. Den nye sensitiviteten til  $p_2$  er da  $0,1 \cdot 5 = 0,5$ . En 10% økning i  $p_2$  vil nå gi en  $0,5 \cdot 10\% = 5\%$  endring i  $PLL$ . Størrelsen på  $p_2$  har dermed blitt betraktelig viktigere for størrelsen av  $PLL$ .

### Omskrivning av uttrykk

Utrykkene 18, 20 og 21 forrige avsnitt vil være utgangspunktet for å analysere sensitivitetsendring i  $p_2$  på grunn av endring i  $p_1$ . Målet med dette avsnittet er å skrive om disse uttrykkene slik at vi kan uttrykke sensitiviteten i  $p_2$  som funksjon av den prosentmessige endringen vi gir  $p_1$  og andelen av  $PLL^0$  delresultatet  $PLL_1^0$  utgjør.

Husk at sensitiviteten i  $p_2$  før endring i  $p_1$  kan uttrykkes med uttrykk 18:

$$\tilde{S}_{p_2} = \frac{p_2^0}{PLL^0} \cdot \frac{\Delta PLL}{\Delta p_2}$$

Hvor:

$PLL^0$  = referanseverdien til  $PLL$  (basecase)

$p_2^0$  = referanseverdien av  $p_2$  (basecase)

$\Delta p_2$  = endring i  $p_2$

$\Delta PLL$  = endring i  $PLL$  som følger av endring i  $p_2$

Som tidligere vist vil en også en prosentmessig endring i en parameter føre til samme prosentvise endring i delresultatet  $PLL_n$  som den inngår. Dette gir oss uttrykket:

$$\frac{\Delta p_2}{p_2^0} = \frac{\Delta PLL_1}{PLL_1^0}$$

Dette resultatet kan settes inn i uttrykket for  $\tilde{S}_{p_2}$ :

$$\tilde{S}_{p_2} = \frac{p_2^0}{PLL} \cdot \frac{\Delta PLL}{\Delta p_2} = \frac{PLL_1^0}{PLL^0} \cdot \frac{\Delta PLL}{\Delta PLL_1}$$

Siden det er kun  $PLL_1$  som økes hvis vi øker  $p_2$  følger det at

$$\Delta PLL_1 = \Delta PLL \Rightarrow \frac{\Delta PLL}{\Delta PLL_1} = 1$$

Settes dette resultatet inn i uttrykket for  $\tilde{S}_{p_2}$  får vi:

$$\tilde{S}_{p_2} = \frac{PLL_1^0}{PLL^0} \cdot \frac{\Delta PLL}{\Delta PLL_1} = \frac{PLL_1^0}{PLL^0} \cdot 1 = \frac{PLL_1^0}{PLL^0} \quad (22)$$

Sensitiviteten til  $p_2$ , før økning i  $p_1$ , er altså kun gitt av forholdet mellom  $PLL_1^0$  og  $PLL^0$ .

At sensitiviteten i  $p_2$  er gitt av forholdet mellom  $PLL_1^0$  og  $PLL^0$  kan utnyttes for å uttrykke sensitiviteten i  $p_2$  også etter at det er gjort en endring i  $p_1$ . Ved å utnytte dette kan sensitiviteten i  $p_2$ , etter endring i  $p_1$ , uttrykkes:

$$\tilde{S}_{p_2,ny} = \frac{PLL_1^0 + \Delta PLL_1}{PLL^0 + \Delta PLL_1} \quad (23)$$

Hvor

$\Delta PLL_1$  = endringen i  $PLL_1$  som følger av økning i  $p_1$

$PLL_1^0$  =  $PLL_1$  før økning av  $p_1$

$PLL^0$  =  $PLL$  før økning av  $p_1$

For å nå finne ut den nye sensitiviteten i  $p_2$  med hensyn på økningen i  $p_1$  må vi uttrykke  $\Delta PLL_1$  med hensyn på  $\Delta p_1$  i uttrykk 23.

Husk at en prosentvis endring i  $p_1$  vil føre til samme prosentvise endring i  $PLL_1$ :

$$\frac{\Delta p_1}{p_1^0} = \frac{\Delta PLL_1}{PLL_1^0}$$

Fra dette kan vi få et uttrykk for  $\Delta PLL_1$  med hensyn på  $p_1$ :

$$\Delta PLL_1 = \frac{\Delta p_1}{p_1^0} \cdot PLL_1^0$$

Dette kan settes inn i uttrykk 23:

$$\tilde{S}_{p_2,ny} = \frac{PLL_1^0 + \left(\frac{\Delta p_1}{p_1^0} \cdot PLL_1^0\right)}{PLL^0 + \left(\frac{\Delta p_1}{p_1^0} \cdot PLL_1^0\right)} \quad (24)$$

Hvor:

$PLL_1^0 = PLL_1$  før økning av  $p_1$  (basecase)

$PLL^0 = PLL$  før økning av  $p_1$  (basecase)

$p_1^0 =$  referanseverdi av  $p_1$  (basecase)

$\Delta p_1 =$  endring som gjøres i  $p_1$

Følgelig er uttrykk 22 et uttrykk for sensitiviteten til  $p_2$  før endring i  $p_1$ , og uttrykk 24 et uttrykk for sensitiviteten i  $p_2$  etter endring i  $p_1$ . Begge uttrykkene med hensyn på den prosentmessige endringen vi gir  $p_1$  og andelen  $PLL_1^0$  utgjør av  $PLL^0$ . Legg merke til at disse to uttrykkene sammenfaller om  $\Delta p_1$  settes til 0.

Til slutt kan vi også sette inn resultatene i uttrykk 21, relativ sensitivitetsendring, å få uttrykk 25:

$$\tilde{S}_{r,p_2} = \frac{\tilde{S}_{p_2,ny}}{\tilde{S}_{p_2}} = \frac{PLL_1^0 + \left(\frac{\Delta p_1}{p_1^0} \cdot PLL_1^0\right)}{PLL^0 + \left(\frac{\Delta p_1}{p_1^0} \cdot PLL_1^0\right)} \cdot \left(\frac{PLL^0}{PLL_1^0}\right) \quad (25)$$

Til slutt understrekes det at disse uttrykkene for sensitivitetsendring skal representerer situasjoner hvor to parameter  $\rho_i$  og  $\rho_j$  påvirker hverandre i sterkest mulig grad. Dette er situasjoner hvor parameterne inngår i utelukkende alle de samme delresultatene  $PLL_n$ . Følgelig vil sensitivitetsendringene som regnes fra formlene være i øvre sjikt av hva som kan forventes i en reel situasjon.

I neste del vil det bli undersøkt hvilke sensitivitetsendringer som kan oppstå i  $p_2$  ved endring i  $p_1$  med hensyn på forskjellige økninger i  $p_1$  og med hensyn på hvor stor andel  $PLL_1^0$  utgjør av  $PLL^0$ .



### Plott av sensitivtetsendring

Husk for den videre analysen at sensitiviteten  $\tilde{S}_{p_2}$  uttrykker at en  $t\%$  endring i  $p_2$  gir en  $\tilde{S}_{p_2} \cdot t\%$  endring i  $PLL$ . Er for eksempel sensitiviteten 1 vil en 10% økning i  $p_2$  gi en 10% økning i  $PLL$ . Er sensitiviteten 0,5 vil en 10% økning i  $p_2$  gi en 5% økning i  $PLL$ .

Husk også at vi så på et utdrag av et hendelsestre i Figur 11 hvor slutten av grenene utgjorde sekvensene:

$$\begin{aligned} & \dots\dots p_1 \cdot p_2 \cdot 3 = PLL_1 \\ & \dots\dots p_1 \cdot (1 - p_2) \cdot 0 = 0 \\ & \dots\dots (1 - p_1) \cdot 0 = 0 \end{aligned}$$

Dette vil si at hendelsestreet består av flere grener som ikke vises og at parameterne  $p_1$  og  $p_2$  ikke inngår i disse andre grenene.

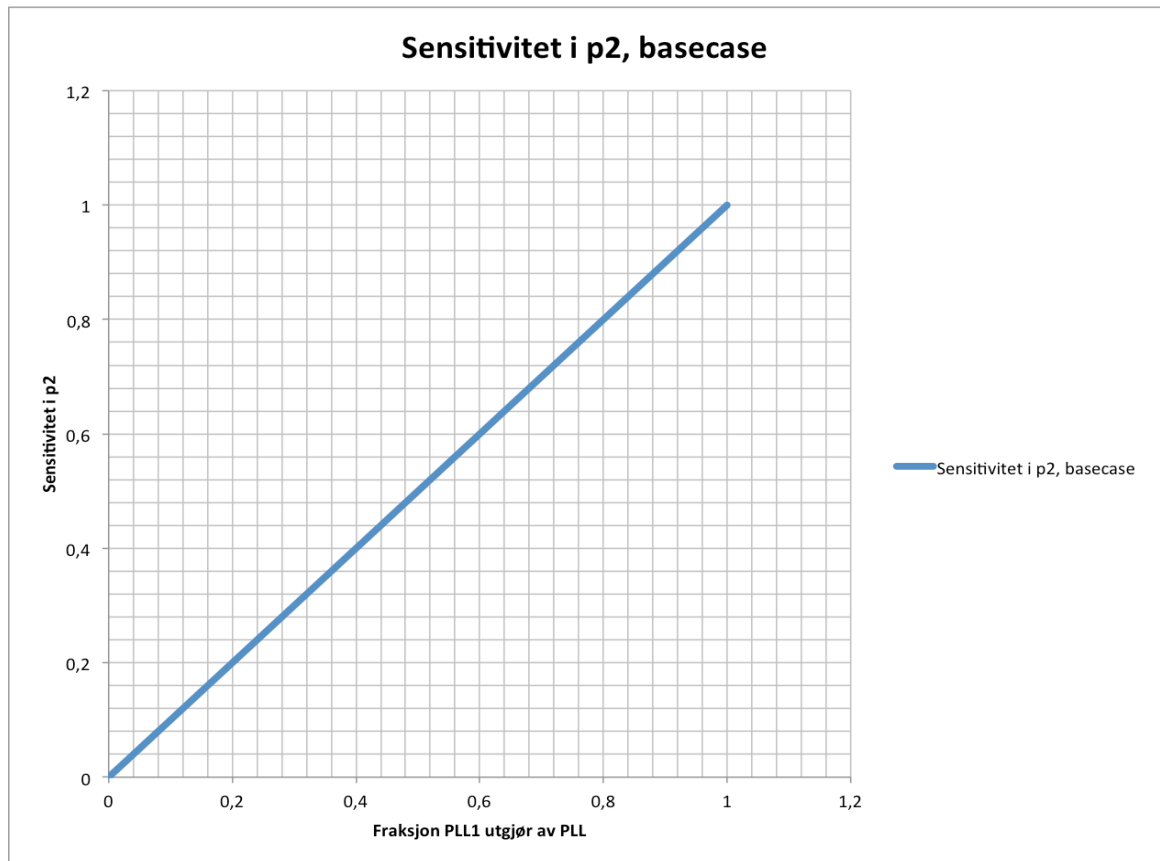
Alle delresultat  $PLL_n$  fra grenene i hendelsestreet bidrar til  $PLL$ :

$$PLL = \sum PLL_n$$

Fra uttrykk 22 fikk vi at sensitiviteten i  $p_2$  ved basecase (før endring av  $p_1$ ) var gitt av:

$$\tilde{S}_{p_2} = \frac{PLL_1^0}{PLL^0}$$

$\tilde{S}_{p_2}$  er en funksjon av kun forholdet mellom  $PLL_1^0$  og  $PLL^0$ . Figur 12 illustrerer dermed sammenhengen:

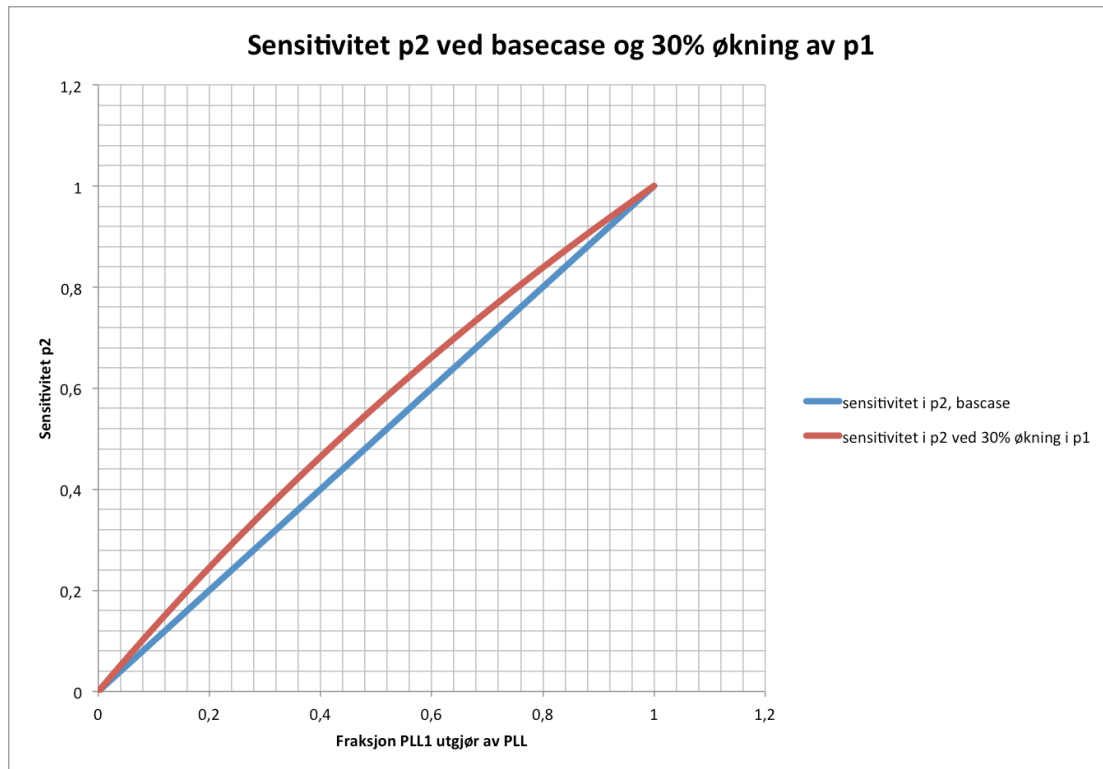


Figur 12: Sensitivitet i  $p_2$  i forhold til hvor stor andel av  $PLL_1$  utgjør av  $PLL$

Fra Figur 12 ser vi at sensitiviteten i  $p_2$  fås direkte fra forholdet mellom  $PLL_1^0$  og  $PLL^0$ . For eksempel hvis forholdet mellom  $PLL_1^0$  og  $PLL^0$  er 0,4, er også sensitiviteten i  $p_2$  0,4.

Videre vil vi se på hva som skjer med sensitiviteten til  $p_2$  hvis vi gir  $p_1$  en økning. Merk at tallene på x-aksen også videre vil representere forholdet mellom referanseverdiene  $PLL_1^0$  og  $PLL^0$ , altså forholdet mellom disse før endringen i  $p_1$ . Sensitiviteten som leses av på y-aksen er den nye sensitiviteten til  $p_2$  etter en økning i  $p_1$ .

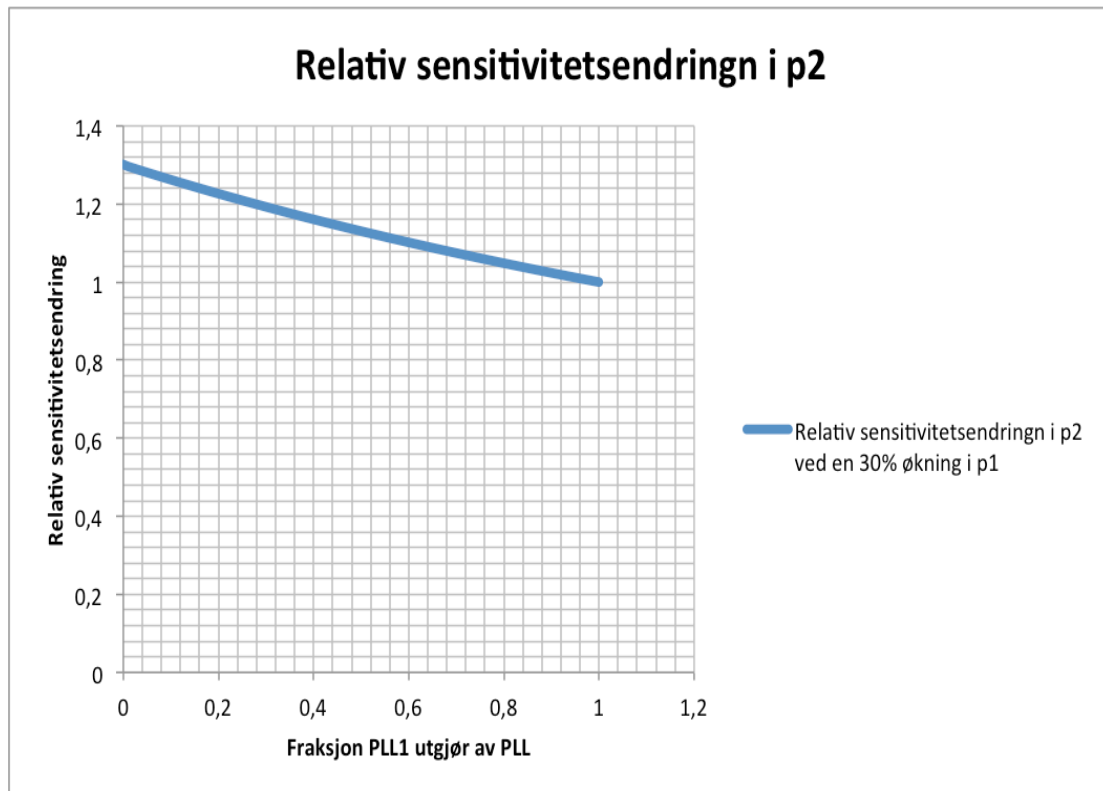
La oss nå se hva som skjer i sensitivitetskurven til  $p_2$  om vi gir  $p_1$  en 30% økning. Figur 13 viser hvordan sensitiviteten til  $p_2$  endres i forhold til basecase. Den røde grafen representerer den nye sensitiviteten i  $p_2$  gitt en 30% økning i  $p_1$ .



Figur 13: Sensitivitet i  $p_2$  ved basecase og ved en 30% økning i  $p_1$

Dette plottet kan nå leses av ved å ta utgangspunkt i en verdi på x-aksen. Denne verdien er forholdet mellom størrelsene  $PLL_1^0$  og  $PLL^0$ , altså forholdet mellom  $PLL_1$  og  $PLL$  før økning i  $p_1$ . La oss for eksempel ta si dette forholdet er 0,4. Ved å gå vertikalt opp til vi treffer den blå kuven, for så å lese av y-aksen, finner vi sensitiviteten til  $p_2$  under disse forholdene. Denne er også 0,4. Går vi nå videre vertikalt opp til vi treffer den røde kurven, kan vi lese av på y-aksen den nye sensitiviteten til  $p_2$  om vi hadde gitt  $p_1$  en 30% økning. Denne sier i vårt tilfelle cirka 0,46.

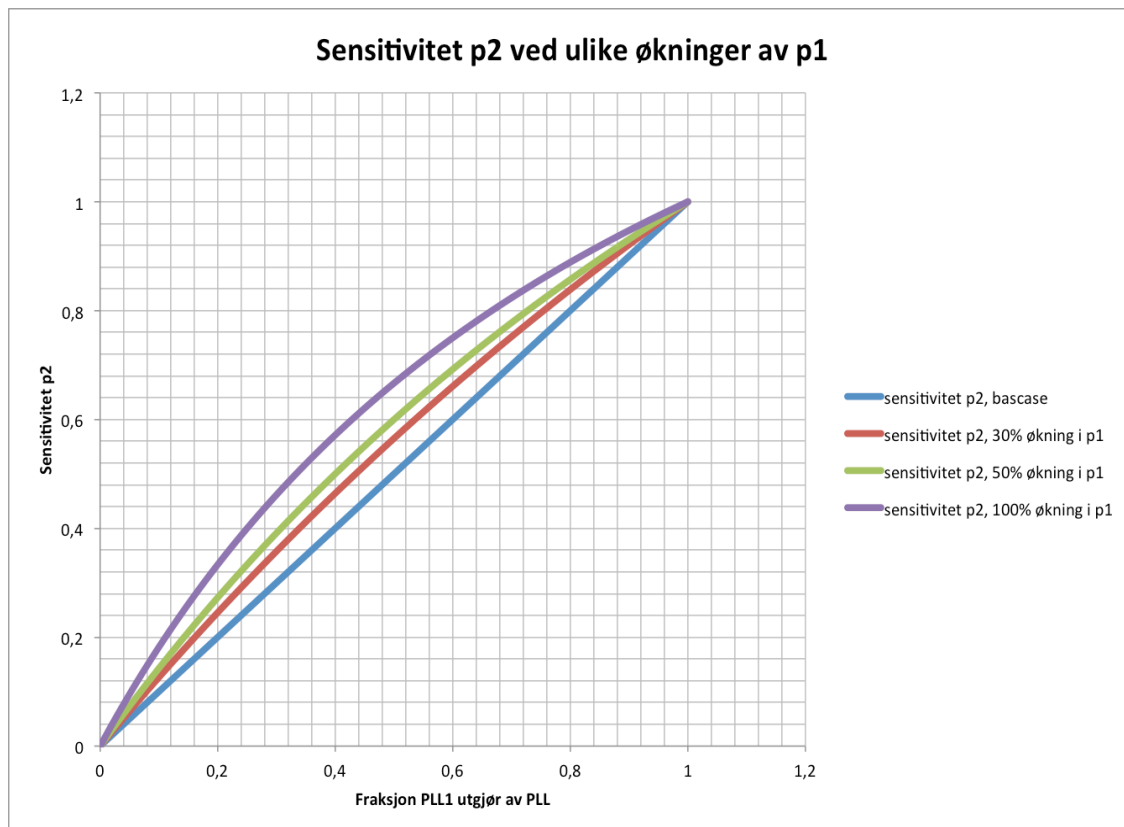
Som man ser er sensitivitetsøkningen i  $p_2$  beskjeden ved en 30% økning i  $p_1$ . Den største økningen i sensitivitet ser man i tilfeller hvor  $PLL_1^0$  utgjør halvparten av  $PLL^0$ . Det er dog den relative sensitivitetsendringen som er vesentlig i denne oppgaven da fokuset er å avdekke antagelser som går fra å være mindre viktige til viktige for risikonivået. Følgelig kan det være hensiktsmessig også å se på den relative sensitivitetsendringen i  $p_2$  ved 30% endring i  $p_1$ . Også nå vil sensitiviteten i  $p_2$  bli plottet over forholdet mellom referanseverdiene  $PLL_1^0$  og  $PLL^0$ . Det minnes om at relativ sensitivitet finnes ved å dividere sensitiviteten i  $p_2$  etter endring i  $p_1$  med sensitiviteten i  $p_2$  før endringen (basecase).



Figur 14: Relativ sensitivitetsendring i  $p_2$  ved en 30% økning i  $p_1$

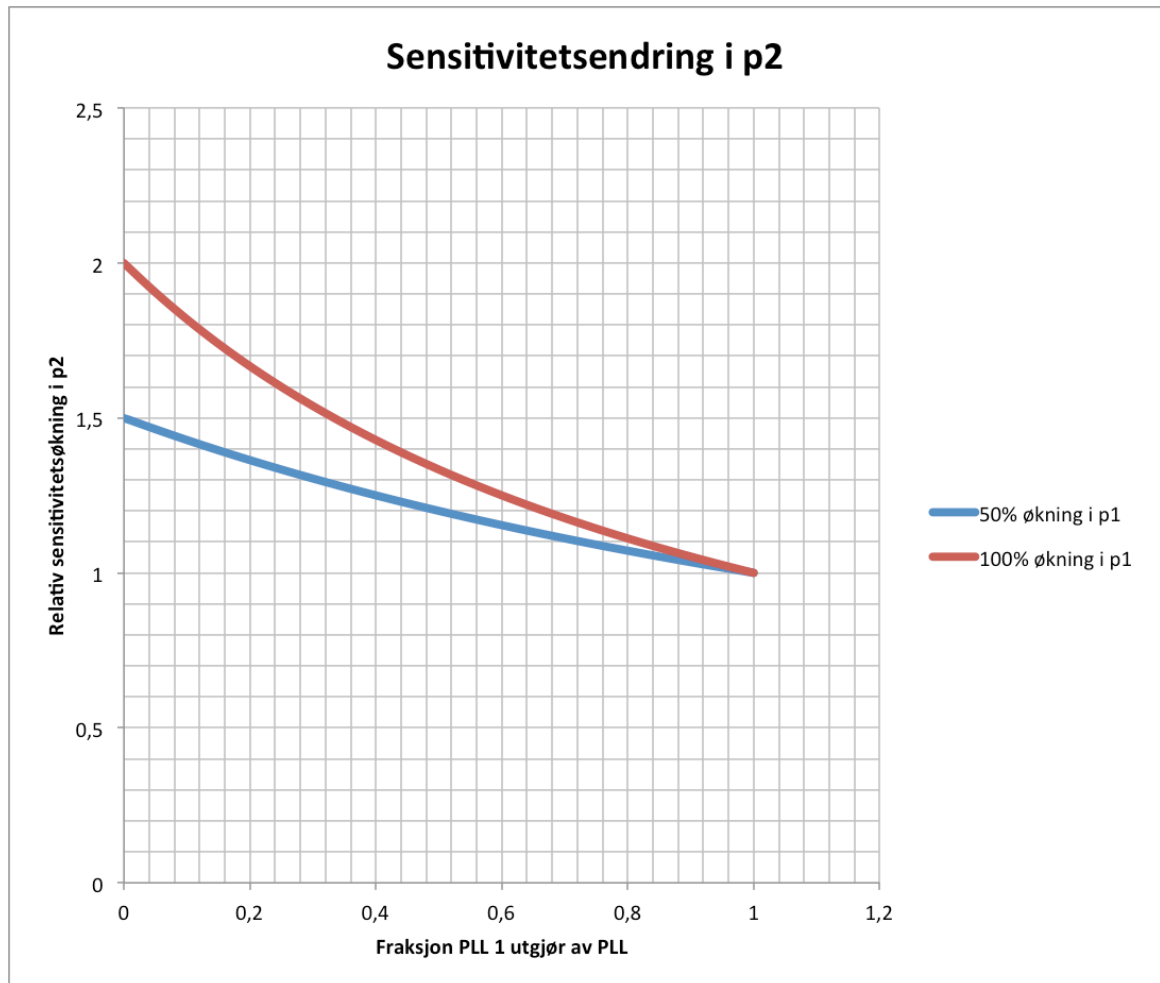
Også dette plottet kan leses ved å først ta utgangspunkt i en verdi på x-aksen. Også nå er denne verdien forholdet mellom størrelsene  $PLL_1^0$  og  $PLL^0$ , altså forholdet mellom  $PLL_1$  og  $PLL$  før økning i  $p_1$ . La oss for eksempel ta utgangspunkt i 0,2 på x-aksen. Går vi nå vertikalt oppover til kurven og leser av på y-aksen finner vi fraksjonen sensitiviteten til  $p_2$  vil øke med hvis  $p_1$  blir gitt en 30% økning. I vårt tilfelle er det 1,22. Det vil si at sensitiviteten til  $p_2$  har økt med 22% etter en 30% økning i  $p_1$  i dette tilfellet.

La oss nå se hva som skjer i sensitivitetskurven til  $p_2$  om vi gir  $p_1$  en 50 og 100% økning. Dette plottet tilsvarer plottet i Figur 13, men nå også med grafer som viser sensitiviteten i  $p_2$  hvis man endrer  $p_1$  med 50 og 100%:



Figur 15: Sensitivitet i  $p_2$  ved basecase og ved 30, 50 og 100% økning i  $p_1$

Ved en 100% økning i  $p_1$  ser vi at sensitiviteten i  $p_2$  avviker betydelig fra sensitiviteten ved basecase. For eksempel ser vi at hvis sensitiviteten ved basecase er 0,2 i  $p_2$ , vil den være cirka 0,32 etter en 100% økning i  $p_1$ . La oss videre også se på den relative sensitivitetsøkningen i  $p_2$  ved 50 og 100% økning i  $p_1$ .



Figur 16: Relativ sensitivitetsendring i  $p_2$  ved en 50 og 100% økning i  $p_1$

Figur 16 viser at sensitiviteten i  $p_2$  på det meste kan doble seg ved en 100% endring i  $p_1$ . Ved en 50% økning i  $p_1$  kan sensitiviteten i  $p_2$  øke med opptil 50%.

Plottene i dette kapittelet viser at det må store relative forandringer til i en parameter i hendelsestreet, for at andre parameter i hendelsestreet skal få stor sensitivitetsøkning. For eksempel gir en 30% økning i  $p_1$  en beskjeden sensitivitetsøkning i  $p_2$ , uavhengig av hvor stor del  $PLL_1^0$  utgjør av  $PLL$ . Det må også tas i betraktning at dette vil være i øvre sjikt da parametere ofte ikke inngår i alle de samme hendessekvensene. Av plottene ser man også at jo større relativ endring  $p_1$  fikk, jo større kunne den relative sensitivitetsøkningen til  $p_2$  være. Husk at det er parametere som får høy relativ sensitivitetsendring som kan gå fra å være mindre viktige for risikonivået, til viktige. På grunnlag av dette vil fokuset for metoden være å identifisere hvor i hendelsestreet man anser det realistisk at store relative parameteravvik kan forekomme som følger av avvik i antagelser. Så vil det bli sett på hvilke parametere som får endret sensitivitet hvis et slikt avvik i en parameter skulle oppstå. Til slutt vil man undersøke sensitiviteten i antagelsene som inngår i disse påvirkede parametere.

Dette impliserer at det må gjøres en vurdering på hva som er "stor" relativ parameterendring i denne sammenhengen. På den ene siden ønsker man å gi informasjon om hvilke antagelser som potensielt kan bli viktigere for å holde

risikonivået lavt. Samtidig vil et hvert avvik i en antagelse føre til endret sensitivitet i alle andre antagelser da de er knyttet sammen i hendelsestreet. Dette betyr at i prinsippet kunne man rapportert en ny sensitivitet for alle antagelser som påvirker hendelsestreet om bare en endring i treet gjøres. Dette ville dog bli uhåndterbare mengder informasjon og flere ubetydelig sensitivitetsendringer ville bli rapportert. Man må derfor gjøre en avveining på hvor stor relativ parameterendring i hendelsestreet som kan føre til betydelig sensitivitetsendring. Fra Figur 16 så man at ved en 100% endring i hendelsestreet kunne en annen parameter få opp til doblet sensitivitet. Følgelig kan noen av antagelsene som påvirker denne parameteren også ha fått doblet sensitivitet. 100% vil her bli foreslått som en grense for parameterendring. Det vil si at om det er ansett som realistisk at avvik i en eller flere antagelser kan føre til en parameterendring på 100% eller høyere, undersøkes det hva denne parameterendringen har å si for sensitiviteten i andre parametere med tilhørende antagelser. Informasjon om sensitivitetsendringer som følger av mindre parameterendringer enn 100% siles dermed ut. Dette fordi sensitivitetsendringene som oppstår i slike tilfeller vil være så små at det er tvilsomt om informasjon om disse vil gi videre innsikt i hvilke antagelser som er viktige for risikonivået.

### 3.6 Sammendrag av basis for metodikk

Funnene i kapittel 3 vil i dette avsnittet bli kort oppsummert. Denne oppsummeringen vil danne det videre grunnlaget for metoden presentert i kapittel 4.

- Et skille mellom resultatsensitivitet og konklusjonssensitivitet ble innført. Resultatsensitive antagelser har stor påvirkning på de numeriske resultatene i analysen, mens konklusjonssensitive antagelser har stor påvirkning på konklusjonene i analysen (typisk konklusjoner vedrørende akseptabel risiko). Dette skille var spesielt viktig for å vite hva "endret sensitivitet i en antagelse" refererer til.
- Med utgangspunkt i informasjon til beslutninger ble det sagt at identifisering av antagelser som kan få en relativt stor endring i resultatsensitivitet vil være målet med metoden. Dette fordi denne informasjonen gir videre innsikt i hvilke antagelser som er viktige for å holde risikonivået på installasjonen så lavt som mulig.
- Et skille mellom parameter og antagelse ble gjort. Parametere ble definert som alle betingede sannsynlighetene, frekvensene og de forventede konsekvensene som inngår i et hendelsestre. Størrelsen på disse parameterne er basert på ulike modeller hvor antagelser inngår. Utgangspunktet for å indentifisere mulige sensitivitetsendringer i antagelser vil være å indentifiserer mulige sensitivitetsendringer i parameterne. Økt sensitivitet i en parameter impliserer økt sensitivitet i antagelsene som brukes i denne parameteren.

- Det ble også vist at for en parameter  $\rho_i$  i et hendelsestre kan sensitiviteten uttrykkes:

$$\tilde{S}_{\rho_i} = \frac{\rho_i^0}{R^0} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta \rho_i}$$

Hvor:

$\Delta \rho_i$  = endring i  $\rho_i$ .

$\Delta R$  = endring i  $R$  som følger av endring i  $\rho_i$ .

$\rho_i^0$  =referanseverdi av  $\rho_i$  (basecase)

$R^0$  =referanseverdi av  $R$  (basecase)

Dette sensitivitetsmålet sier at en  $t\%$  endring i  $\rho_i$  gir en  $\tilde{S}_{\rho_i} \cdot t\%$  endring i  $R$ . Denne måten å måle sensitivitet ble brukt da den kan vise sensitiviteten i en parameter med et enkelt tall. Dette var viktig for å vise hvilke sensitivitetsendringer som kan oppstå i parametere i et hendelsestre ved endring av en annen parameter.

- På bakgrunn av en analyse av sensitivitetsendring med to avhengige parametere ble det sagt at metoden vil basere seg på å identifisere parametere hvor det blir vurdert som realistisk at en 100%, eller større, endring kan skje. Dette kan være som følger av avvik i en eller flere antagelser som påvirker parameteren. Videre vil det bli undersøkt hvilken effekt en slik endring har på sensitiviteten i andre parametere og antagelser. Sensitivitetsendringer som oppstår i parametere og antagelser som følger av mindre enn 100% parameterendringer i hendelsestreet er antatt å være så små at informasjon om slike endringer vil være til mindre nytte for beslutningstagere.



## 4 Metodeforslag for å identifisere avhengighet mellom antagelser

I dette kapitlet følger metodeforslaget for å identifisere hvilke antagelser i en QRA som potensielt kan få en relativ stor sensitivitetsøkning ved avvik i andre antagelser. Metoden er todelt hvor den første delen bruker neglisjerte hendelser som utgangspunkt, mens den andre delen bruker premisskartet som utgangspunkt. Et kortfattet sammendrag av hovedmomentene i metoden er presentert i kapittel 4.3.

### 4.1 Identifisering av avhengige antagelser gjennom neglisjerte hendelser

Som forslag til forbedring av usikkerhetsrepresentasjon i QRA er det foreslått av Aven [2] å legge ved en liste over hendelser som er neglisjert i risikoanalysen. For hver av disse hendelsene på listen er sannsynlighet, konsekvens og kunnskapsstyrke adressert. I utgangspunktet er denne listen foreslått som en måte å behandle potensielle overraskelser. I sammenheng med denne oppgaven er dog en slik liste nyttig for å avdekke antagelser som potensielt kan få en stor relativ økning i sensitivitet. Siden hensikten med listen er en annen i denne sammenhengen vil noen av elementene ved listen foreslått av Aven[2] bli utelatt.

Grunnen til at listen over neglisjerte hendelser brukes i denne sammenhengen er at det kan oppstå svært store relative parameterendringer i hendelsestreet i forbindelse med hendelser som er neglisjert på grunn av lav sannsynlighet. For at en neglisjert hendelse skal bidra nevneverdig til risiko kreves det ofte at en eller flere sannsynlighetsparameter i hendelsessekvensen går fra en svært liten verdi til en større verdi. Dette vil i mange tilfeller tilsvare en svært stor relativ økning for parameteren.

Denne delen av metoden vil nå bli beskrevet steg for steg. Stegene vil bli illustrert med eksempler underveis. Disse eksemplene er til en viss grad forenklet i forhold til en reel situasjon da målet med dem er å illustrere metoden på en enkel og kortfattet måte.

#### 1. Liste over neglisjerte hendelser

En liste over hendelser som er neglisjerte gjennom risikoanalysen må først foreligge. For vurdering av avhengige antagelser er det hendelser som er neglisjert på grunn av lav sannsynlighet som hovedsakelig er relevante. Hendelser som er neglisjert på grunn av lav konsekvens kan også være relevante, hvis det er en realistisk mulighet for at konsekvensen av hendelsen kan bli betydelig større. Listen bør føres kontinuerlig gjennom arbeidet med risikoanalysen. Antagelsen eller antagelsene som ligger til grunn for å neglisjere hendelsene og den tilhørende kunnskapsstyrken må også føres på listen. Disse antagelsene vil videre bli referert til som neglisjeringsantagelsene. Videre tar man også stilling til hvilke slutthendelser og konsekvenser som kan være mulig om hendelsen skulle oppstå. Listen kan følgelig se slik ut:

Hendelse	Neglisjeringsantagelse	Kunnskapsstyrke i neglisjeringsantagelse	Mulig slutthendelse og konsekvens
1. Sterk eksplosjon i pumpehus. (eksplosjon som kan ødelegge områdeskiller)	Antagelse angående ventilasjonsforholdene i pumpehuset (tilstrekkelig stor og konsentrert gassky vil ikke oppstå ved lekkasje)	Sterk	Sterk eksplosjon og eskalert brann. 1-10 døde
2. Skipskollisjon på over 20 MJ som følger av feil i fartøyets posisjoneringssystem	Styrermanns reaksjonstid ved feil i posisjoneringssystem (fartøyet oppnår liten fart ved feil i posisjoneringssystem)	Medium	Kraftig kollisjon som medfører tap av bærende struktur. Hele mannskap døde
3. Antent lekkasje fra stigerør med eksportolje	Antagelse om lavt gassinhold i eksportolje (lav tennsannsynlighet)	Svak	Tap av bærende struktur pga langvarig branneksplosjon. Hele mannskap døde

Tabell 3: Liste over neglisjerte hendelser

## 2. Evaluering av grunnlag for å neglisjere hendelsen

Neste steg er å identifisere hvilke av de neglisjerte hendelsene som skal evalueres videre. Det er ikke ansett som hensiktsmessig å bruke mye tidsressurs på en hendelse hvis basisen for neglisjering anses som tilstrekkelig solid. Det vil her bli foreslått to kriterier for å videre evaluere en hendelse.

- En eller flere av neglisjeringsantagelsene har lav eller medium kunnskapsstyrke
- Premisset som antas i en av neglisjeringsantagelsene kan endres over tid hvis det ikke blir fokusert på å opprettholde det.

De resterende hendelsene regnes som å ha tilstrekkelig solid basis for neglisjering slik at de ikke blir vurdert videre.

## 3. Identifisering av berørte antagelser

Ved å ta for seg hendelse for hendelse på listen identifiseres det nå hvilke antagelser som vil få endret sensitivitet om neglisjeringsantagelsen endres. Dette kan gjøres ved å ta utgangspunkt i den mulige slutthendelsen og konsekvensen

ført på listen, for så å identifisere den initierende hendelsen som kan lede til slutthendelsen. Videre identifiseres hendelsessekvensen som vil lede fra den initierende hendelsen til den mulige slutthendelsen. Til slutt listes alle antagelsene som brukes i denne hendelsessekvensen. I tillegg listes antagelsene som inngår i konsekvensvurderingen av slutthendelsen. Merk at hvis den neglisjerte hendelsen kan føre til ulike slutthendelser som bidrar til risiko må man se på alle disse hendelsessekvensene å liste alle aktuelle antagelser.

Dette steget vil nå bli eksemplifisert med hendelse 3 på listen i Tabell 3. For denne hendelsen identifiserer man hendelsessekvensen:

- lekkasje fra stigerør med eksportolje (initierende hendelse)
- Antennelse av lekkasje
- Konsekvens

For å forenkle eksempelet fokuseres det utelukkende på personellrisiko og forventet antall døde i denne sammenhengen. Da kan risikobidraget fra hendelsessekvensen regnes som:

$$PLL = f_{lekkasje} \cdot p_{tenning} \cdot E(døde|lekkasje \text{ og } tenning) \quad (26)$$

Ved å se på uttrykk 26 kan nå de berørte antagelsene identifiseres ved å liste antagelsene som brukes i de tre parameterne. Resultatet kan føres som vist i Tabell 4:

<b>Lekkasje frekvens</b>	<b>Antennelse, gitt lekkasje</b>	<b>Konsekvens (døde), gitt antent lekkasje</b>
Stigerøret plassering	Mengde gass i eksportolje (neglisjeringsantagelse)	Branntoleranse for bærende struktur (minutter)
Trykk i stigerør	Vinddata representerer fremtiden på installasjonen	Tilgjengelig brennbart volum
Stigerørets tilstand	Antall tenningskilder	

Tabell 4: Antagelser i hendelsessekvens

#### 4. Identifisering av antagelser som kan endre sensitivitetsgrad

Fra forrige punkt har man identifisert hvilke antagelser som er berørte hvis neglisjeringsantagelsen endres. Videre vil man identifisere hvilke av disse antagelsene som potensielt kan få forandret grad av sensitivitet. Dette vil være antagelsene av de berørte som er kategorisert med lav eller medium sensitivitet i fra før. Er det noen antagelser på listen som ikke tidligere har vært brukt i analysen, og dermed ikke sensitivitetsgradert, kan sensitivitetsgraden settes til lav.

Følgelig har man identifisert, gjennom de to siste punktene, antagelser hvor sensitiviteten vil øke og hvilke av disse som potensielt kan øke sensitivetsgrad hvis neglisjeringsantagelsen endres. Det er i hovedsak antagelsene som kan forandre sensitivetsgrad som kan få en relativt stor sensitivetsendring, det vil si gå fra å være mindre viktige til viktige for risikonivået. Antagelser med allerede stor sensitivitet vil ha en begrenset relativ sensitivetsøkning og beslutningstagere vil allerede være klar over viktigheten i disse antagelsene. Derfor vil antagelsene identifisert i steg 4 være prioritert i forhold til undersøkelse av potensiell sensitivetsøkning.

## **5. Vurdering av risikobidrag fra hendelse**

Man vil nå undersøke hvilken påvirkning det vil ha for risikoen på installasjonen om neglisjeringsantagelsen endres. Dette for å si noe om den mulige endrede sensitiviteten i de berørte antagelsene. Først må man vurdere hvor stort avvik i neglisjeringsantagelsen man anser realistisk kan oppstå. Dette kan for eksempel være basert på graden av kunnskapsstyrke antagelsen har fått. Man må allikevel vise hensyn her da grad av kunnskapsstyrke ikke nødvendigvis er ensbetydende med mulighet for stort avvik. Derfor kan man alternativt vurdere mulig avvik uavhengig av kunnskapsstyrke. Dette er i tråd med Berner & Flage [9] som opererer med grad av "tro på avvik fra antagelse". Om ønskelig kan man også undersøke flere avvik i antagelsen.

Videre kalkulerer man, eller gjør et anslag, av risikobidraget den neglisjerte hendelsen utgjør, gitt endringen man anså realistisk i neglisjeringsantagelsen og uten avvik i de berørte antagelsene. Praktisk sett kan det variere hvor nøyaktig man kan gjøre denne vurderingen.

For eksempel ble det vurdert for hendelse 3 at gassinnholdet realistisk kan øke slik at tennsannsynligheten blir til 0,005. Tennsannsynligheten var tidligere satt til  $10^{-4}$ . Dette tilsvarer en relativ parameterøkning i tennsannsynligheten på 4900%. Gitt en tennsannsynlighet på 0,005 kalkulerer man risikobidraget fra hendelsen "lekkasje fra stigerør med eksportolje" (uttrykk 26). Merk at alle de berørte antagelsene man fant i steg 3 holdes på sitt opprinnelige nivå under denne kalkuleringen.

## **6. Kategorisering av resultat**

Ut i fra vurderingen av risikobidrag fra hendelsen kategoriserer man hendelsen i en av de følgende kategoriene:

1. Gitt endringen i neglisjeringsantagelsen og gitt at de berørte antagelsene ikke har avvik vil en konklusjon bli endret.
2. Gitt endringen i neglisjeringsantagelsen og gitt at de berørte antagelsene ikke har avvik vil *ikke* en konklusjon bli endret.

## 7. Behandling basert på kategorisering

### **Kategori 1**

Er resultatet i kategori 1 har man en situasjon hvor man anser det realistisk at avvik i neglisjeringsantagelsen kan føre til endret konklusjon vedrørende akseptabel risiko. Dette kan bety at informasjon om hvilke antagelser som får økt sensitivitet ved et slikt avvik er mindre relevant da risikoen allerede er over akseptabelt nivå. Fokuset i et slikt tilfelle vil heller være å påse at antagelsen ikke har et slikt avvik. Er hendelsen i kategori 1 vurderer man derfor, på grunnlag av størrelsen på avviket i neglisjeringsantagelsen, om antagelsen bør bli gitt høyere sensitivitetsgrad. Etter dette gjentar man punkt 5, denne gangen med et mindre avvik i neglisjeringsantagelsen.

### **Kategori 2**

Er hendelsen i kategori 2 vurderer man den nye sensitiviteten i de berørte antagelsene, gitt endringen i neglisjeringsantagelsen.

Dette kan gjøres på ulike måter, men her vil det bli foreslått å først gjøre sensitivitsanalyse på parameterne i hendelsessekvensen, med og uten avviket fra steg 5 i neglisjeringsantagelsen. Dette for å identifisere hvilke av parameterne i hendelsessekvensen som har fått betydelig sensitivitetsøkning ved avviket i neglisjeringsantagelsen. Basert på dette kan man undersøke hvilke antagelser som har fått relativt stor sensitivitetsøkning ved å undersøke hvordan antagelsene påvirker parameterne som har fått sensitivitetsendring. Nok en gang understrekes det at antagelsene kan påvirke parameterne gjennom ulike modeller, og det vil derfor ikke bli redegjort i detalj her hvordan denne vurderingen gjøres. Et enkelt eksempel vil dog illustrere prinsippet:

I eksempelet vårt var hendelsessekvensen for hendelse 3:

$$PLL = f_{lekkasje} \cdot p_{tenning} \cdot E(døde|lekkasje \text{ og } tenning)$$

Her så man eksempelvis at konsekvensparameteren fikk en stor økning i sensitivitet etter at tennings sannsynligheten steg med 4900%. Dette forteller at antagelsene som påvirker denne parameteren også kan ha fått stor økning i sensitivitet. For å tildele størrelsen på konsekvensparameteren var det antatt at:

- Den bærende strukturen tåler 35 minutters branneksponeering
- Det tilgjengelige brennbare volumet vil gi en brannvarighet på 30 minutter.

Begge disse antagelsene har stor påvirkning på konsekvensparameteren. Ved 5 minutters avvik i en av dem, eller 2,5 minutters avvik i begge vil konsekvensparameteren få en stor økning. Man vurderer dermed at begge disse antagelsene har høy sensitivitetsgrad om antagelsen om gassinnhold endres fra  $10^{-4}$  til 0,005. Legg merke til at konsekvensmodellen i dette tilfellet er så simpel at man enkelt kan gjøre vurdering på hvordan antagelsene også påvirker hverandre innad i konsekvensmodellen.

Følgelig har man funnet ut at sensitiviteten i antagelsen om branntoleranse av bærende struktur og antagelsen om brannvarighet kan bli høy ved avvik fra antagelsen om gassinnholdet i eksportoljen.

## **8. Rapportering**

Rapporteringen gjøres i vedlegget hvor man presenterer og kritikalitetsgraderer antagelsene. Nærmere bestemt presenteres resultatene fra metoden i forbindelse med presentasjonen av neglisjeringsantagelsen. Her kan det vises hvilke antagelser som kan få økt sensitivitet om neglisjeringsantagelsen har avvik.

### **4.2 Identifisering av avhengighet mellom antagelser ved identifisering av store parameterendringer**

I første del av metoden brukte vi listen over neglisjerte hendelser for å identifisere hvor relativt store parameterendringer i hendelsestreet kunne oppstå, for så å se på sensitivitetsendringen i andre antagelser om en slik endring hadde oppstått. I denne delen av metoden vil det identifiseres hvor store parameterendringer i hendelsestreet kan oppstå ved bruk av premisskartet. I likhet med del 1 vil man videre vurdere effekten en slik endring kan ha på sensitiviteten til forskjellige antagelser.

#### **1. Identifikasjon av fokusområde**

Siden denne delen av metoden bruker premisskartet for å identifisere hvor store parameterendringer i hendelsestreet kan oppstå, må det besluttes fokusområde. Dette kan være i forbindelse med en spesifikk beslutning. Som eksempel kan vi tenke oss at prosesslekkasjer er hendelsesgruppen vi vil vurdere i forbindelse med  $FAR_{\text{prosessområde}}$ .

#### **2. Antagelseskart**

Et antagelseskart som beskrevet i avsnitt 2.6 lages for den valgte hendelsesgruppen.

#### **3. Identifiser antagelser som kan gi store parameterendringer**

Etter å ha laget et antagelseskart for hendelsesgruppen vil det bli identifisert hvor i hendelsestreet for denne gruppen det potensielt kan oppstå relativt store

parameterendringer. Det vil si i hvilke spesifikke hendelsessekvenser i treet relativt store parameterendringer kan oppstå. Basert på kapittel 3.5 vil det her bli foreslått hvor en 100% eller større parameterendring anses som realistisk. Denne grensen kan dog settes der hvor brukerne av metoden finner det hensiktsmessig.

Ved å gå igjennom antagelse for antagelse i premisskartet vurderer man om antagelsen realistisk kan gi en eller flere parameter i hendelsestreet en 100% eller større økning. Merk at det er viktig og vurdere om det man antar indirekte også kan gi en 100% parameterendring. Ved å eksempelvis anta at sprinkler er operative ved 98% av alle branner, antar man indirekte at de ikke er operative for 2% av brannene. Her er det kanskje den indirekte antagelsen som realistisk kan gi en 100% parameterøkning. Dette ville for eksempel skje om man heller antok at sprinklene var operative for 96% av alle brannene. I dette punktet kan man også vurdere om en kombinasjon av endringer i antagelser kan gi en 100% eller større parameterendring i hendelsestreet. Dette vil i noen tilfeller kreve egne sensitivitetsanalyser av modellene som brukes til å bestemme størrelsen på parameterne i hendelsestreet. For eksempel kan tennsannsynlighetsmodellen være kompleks slik at en egen analyse må gjøres for å avgjør hvordan en kombinasjon av avvik i antagelsene som brukes i modellen kan gi en 100% endring i tennsannsynlighetsparameteren i hendelsestreet.

Fra eksempelet vårt kan det tenkes at upålitelighet i sprinkler ble vurdert som en antagelse som realistisk kan gi 150% økning i parameteren sannsynlighet for feiling i sprinkler gitt en stor, antent prosesslekkasje. Denne parameteren inngår i flere av hendelsessekvensene i hendelsestreet.

#### **4. Identifiser berørte antagelser**

Man har så langt et sett av antagelser hvor hver enkelt antagelse potensielt kan gi en stor parameterendring i hendelsestreet. Som nevnt kan man også i noen tilfeller ha en gruppe av antagelser som potensielt kan gi en stor parameterendring i hendelsestreet ved en kombinasjon av avvik. Antagelsene som potensielt kan føre til disse store endringene vil fra nå bli referert til som primærantagelser. Ved å ta for seg en og en av primærantagelsene må man nå finne ut hvilke antagelser som vil kunne få en relativt stor sensitivitetsendring på grunn av avvik i disse primærantagelsene. En måte å finne disse er å identifisere parameterne som inngår i samme hendelsessekvens som parameteren som kunne få 100% økning. Antagelser med lav eller medium sensitivtetsgrad som påvirker disse identifiserte parameterne vil følgelig være berørt av endringen. Disse berørte antagelsene refereres videre til som sekundærantagelser.

I eksempelet vårt inngår for eksempel parameteren sannsynlighet for eskalering gitt en stor, antent prosesslekkasje, og gitt feiling i sprinkler i samme hendelsessekvens som parameteren vi identifiserte i forrige punkt. Av antagelsene som påvirker denne identifiserte parameteren er for eksempel kriteriet for tap av områdeskille fra før gitt medium sensitivitet. Dette er dermed en sekundærantagelse.

## 5. Sensitivitetsanalyse på berørte antagelser

Til nå har man en liste over primærantagelser, som potensielt kan forandre en, eller flere parameter i hendelsestreet over 100%. Videre har man, for hver av disse primærantagelsene, identifisert sekundærantagelser, som kan få en relativt stor sensitivitetsøkning hvis en slik endring skjer i primærantagelsen.

I dette punktet utfører man en sensitivitetsanalyse for hver av primærantagelsene. Hver sensitivitetsanalyse utføres gitt avviket man anså som realistisk i primærantagelsen for så å undersøke sensitiviteten i en og en av sekundærantagelsene. På grunnlag av dette kan man vurdere om noen av sekundærantagelsene burde ha høyere sensitivetsgrad hvis endringen i primærantagelsen oppstår. Legg merke til at det regnes som tilstrekkelig å vurdere sensitiviteten i en og en sekundærantagelse. Dette følger samme prinsippet som ligger til grunn for metoden, mindre parameterendringer i hendelsestreet enn 100% fører til endringer i sensitivitet som er så små at informasjon vedrørende endringen er antatt av mindre nytte. Siden sekundærantagelsene ikke er ansett til realistisk å kunne gi en 100% parameterendring i hendelsestreet kan man vurdere sensitiviteten i en og en.

Det kan dog oppstå at man har to primærantagelser i samme hendelsessekvens. Det vil si at man vurderer det realistisk at to parametere i samme hendelsessekvens kan få 100% avvik. Hvis dette oppstår gjør man en ny sensitivitetsanalyse hvor man har avvik i begge disse primærantagelsene. Sensitiviteten i de tilhørende sekundærantagelsene vurderes så en og en.

## 6. Rapportering

All rapportering gjøres i vedlegget hvor man presenterer og kritikalitetsgraderer antagelsene. Nærmere bestemt presenteres resultatene i forbindelse med presentasjonen av primærantagelsene. Her kan det vises hvilke sekundærantagelser som kan få økt sensitivetsgrad om primærantagelsen har avvik.

### 4.3 Sammendrag av metode

En todelt metode er foreslått. I dette delkapittelet vil en kortfattet oversikt over fremgangsmåten bli presentert:

#### Del 1:

1. Lag en liste over neglisjerte hendelser i ananalysen. Denne listen inneholder neglisjeringsantagelsene med tilhørende kunnskapsstyrke og mulig sluttendelse og konsekvens relatert til hendelsen.



2. Antall hendelser å vurdere blir redusert ved å fjerne hendelsene som er neglisjert på sterkt grunnlag.
3. Antagelsene som kan få økt sensitivitet om neglisjeringsantagelsen endres identifiserer.
4. Antagelsene i punkt 3 som kan få en relativt stor sensitivitetsøkning identifiseres. Dette er hovedsakelig antagelsene som er gitt lav og medium sensitivitetsgrad fra før.
5. Gitt et, hva man anser realistisk, avvik i neglisjeringsantagelsen vurderes risikobidraget fra den neglisjerte hendelsen. Alle andre antagelser holdes på sitt opprinnelige nivå i denne vurderingen.
6. På grunnlag av punkt 5 vurderer om risikobidraget i forrige punkt er så høyt at risikonivået ikke lenger er akseptabelt, eller om endringen i neglisjeringsantagelsen ikke påvirker konklusjonen om akseptabel risiko.
7. Er ikke lenger risikonivået akseptabelt vurderes det om neglisjeringsantagelsen skal bli gitt høyere sensitivitetsgrad. Deretter går man tilbake til punkt 5 og vurderer risikobidraget for et mindre avvik i neglisjeringsantagelsen. Påvirker derimot ikke endringen i neglisjeringsantagelsen konklusjonen om akseptabel risiko, undersøkes det om noen av de berørte antagelsene får høyere sensitivitetsgrad gitt endringen i neglisjeringsantagelsen.
8. Rapporter funnene i vedlegget hvor antagelsene presenteres og kritikalitetsvurderes.

## **Del 2:**

1. Identifiser fokusområde. Dette kan være ulike hendelsesgrupper som prosesslekkasjer, skipskollisjoner, brønnutblåsning etc.
2. Lag et premisskart for fokusområdet.
3. Identifiser antagelser i premisskartet som det er ansett realistisk kan gi en parameter i hendelsestreet for hendelsesgruppen en 100% eller større økning. Vurder også om en kombinasjon av avvik i antagelser realistisk kan gi en slik parameterendring i hendelsestreet. Antagelsene som kan gi en slik parameterendring refereres til som primærantagelser.
4. Identifiser hvilke antagelser som kan få en relativt stor sensitivitetsendring om en primærantagelse endres. Disse kalles sekundærantagelser

5. Gjør en sensitivitetsanalyse på sekundærantagelsene for hver primærantagelse. Analysen utføres med avviket i primærantagelsen som ble ansett realistisk i punkt 3, for så å undersøke sensitiviteten i sekundærantagelsene en og en.
6. Rapportert funnene i vedlegget hvor antagelsene presenteres og kritikalitetsvurderes.

## 5 Diskusjon

En todelt systematisk metode for å identifisere avhengige antagelser i QRA har blitt foreslått. Videre vil dette metodeforslaget som helhet bli diskutert med hensyn på basisen den baserer seg på, begrensninger og praktiske aspekter. Videre vil det bli diskutert hvordan en slik metode kan gi input til beslutninger og hvordan veien videre for problemstillingen rundt avhengige antagelser ser ut.

### 5.1 Metode

#### 5.1.1 Basis for metode

##### **Prioritering av økt resultatsensitivitet**

Basisen for metoden ble presentert i kapittel 3. Det første som ble etablert var at metoden ville fokusere på å avdekke antagelser som potensielt kan få en relativt stor økning i resultatsensitivitet ved forandring av andre antagelser. Dette betyr at metoden vil gi informasjon om hvilke antagelser som kan gå fra å være mindre viktige for et lavt risikonivå, til å bli viktige. Det ble også sagt at dette fokuset gjør metoden ute av stand til å avdekke antagelser som potensielt kan ble meget sensitive med hensyn på konklusjoner, uten å ha blitt betraktelig mer resultatsensitive.

At dette fokuset er valgt kan ses i sammenheng med Aven & Vinnem[17]. De trekker frem to vesentlige problemer med introdusering av predefinerte risikokriterier. De skriver:

*“First come the criteria then the analysis to see if these criteria are met, and according to the assessment results, the need for risk reducing measures are determined. Such a thinking is intuitively appealing, but a closer look reveals several problems, of which the following two are the most important;*

*1.The introduction of pre-determined criteria may give the wrong focus—meeting these criteria rather than obtaining overall good and cost/effective solutions and measures.*

*2.The risk analyses—the tools used to check whether the criteria are met-do not in general have a sufficient precision level for such a mechanical use of criteria.”*

Aven & Vinnem [17: s 15]

Disse to problemene med predefinerte akseptkriterier for risiko underbygger valget å fokusere på antagelser som potensielt kan få stor økning i resultatsensitivitet. Fokus på å avdekke antagelser som kan bli mer konklusjonssensitive, uten å bli mer resultatsensitive, kan i sammenheng med det første problemet virke som galt fokus. Fokuset i et slikt tilfelle er på hvilke antagelser som potensielt kan bli viktige for å kunne konkludere med akseptabel risiko. Dette gir dog lite videre innsikt i hvilke premisser som er viktige for det generelle risikonivået på installasjonen og hvilke risikoreducerende tiltak som vil være mest effektive. Dette fordi informasjonen kun vil si noe om den økte

sensitiviteten i forhold til en konklusjon eller toleransegrense. På den andre siden vil vurdering av hvilke antagelser som potensielt kan øke relativt mye i resultatsensitivitet gi innsikt i hvilke antagelser som er viktige for å holde et så lavt risikonivå som praktisk mulig. Denne informasjonen kan også gi input til vurdering av hvilke risikoreduserende tiltak som er mest effektive.

Også det andre problemet belyser hvorfor fokuset i metoden er på økt resultatsensitivitet. Hvis informasjon om antagelser som utelukkende kan få økt konklusjonssensitivitet skal være til nytte, forutsetter det at resultatene i risikoanalysen har en viss presisjon. Har ikke resultatene denne presisjonen kan vurdering omkring hvilke antagelser som potensielt kan bli utelukkende konklusjonssensitive til slutt virke som en poengløs øvelse da en slik mekanisk bruk av akseptkriteriene ikke er rettferdiggjort. Som Aven & Vinnem[17] sier har ikke risikoanalyser generelt denne nødvendige presisjonen.

Et annet moment er at i noen tilfeller kan risikoresultatet fra en QRA ha svært god margin i forhold til akseptkriteriet for akseptabel risiko. Dette trenger ikke være fordi sikkerheten på installasjonen er svært god, men heller fordi selskapet har satt en høy grense for akseptabel risiko. I et slikt tilfelle kan en analyse av antagelser som kan bli konklusjonssensitive være meningsløs da det er lite realistisk at noen antagelser vil bli konklusjonssensitive. Analyse av antagelser som kan bli resultatsensitive vil derimot gi innsikt i hvilke antagelser som er viktigst for å holde risikoen så lav som mulig selv om toleransegrensen er svært høy.

Valget om å fokusere på endring i resultatsensitivitet, i stedet for konklusjonssensitivitet, er begrunnet i de foregående avsnittene. Et siste moment som må adresseres er at det også ble sagt at metoden ville fokusere på antagelser som kan få en relativ stor endring i resultatsensitivitet. Dette impliserer at metoden vil være laget for å identifisere antagelser som i utgangspunktet er vurdert som mindre resultatsensitive, men som kan bli resultatsensitive. Det er i denne oppgaven blitt vurdert som det viktigste å gi beslutningstagere videre innsikt i hvilke antagelser som er viktige for et lavt risikonivå. Det er blitt vurdert at informasjon om antagelser som allerede er resultatsensitive, og som potensielt kan bli enda mer resultatsensitive gir begrenset videre innsikt i hvilke antagelser som er viktige for et lavt risikonivå. Beslutningstagere er allerede klar over at disse antagelsene er viktige for et lavt risikonivå. Dette er dog ikke å foreslå at slik informasjon er helt uten verdi.

Behandling av avhengige antagelser i QRA i en offshorekontekst er i startgropen. Bidraget i denne oppgaven må ses på som et forslag til et første steg i prosessen. Antagelser som kan gå fra og påvirke risikoen i mindre grad til og påvirke risikoen i betydelig større grad, har blitt vurdert som det mest vesentlige å avdekke i dette første steget. Basert på diskusjonen vil det bli anbefalt for videre arbeid med behandling av avhengige antagelser i QRA å fokusere på å identifisere antagelser som kan få endring i resultatsensitivitet, og dermed fokusere mindre på endring i konklusjonssensitivitet.

### **Strategi for metode**

Strategien som metoden baserer seg på er å først identifisere hvilke parametere i et hendelsestre som potensielt kan få en stor relativ økning på grunn av avvik i antagelser. Deretter undersøkes det hvilke andre parametere som kan få en betydelig sensitivitetsøkning om en slik stor parameterendring skulle oppstå. Til slutt undersøkes det i hvilken grad antagelsene som påvirker disse parameterne som har fått høyere sensitivitet bør bli gitt høyere grad av sensitivitet.

En svakhet med denne strategien er at metoden ikke omhandler konkret hvordan avhengighet mellom antagelser som påvirker samme parameter i hendelsestreet, gjennom en modell, behandles. Dette kan eksempelvis være antagelser som inngår i en kompleks modell som brukes for å angi tennsannsynlighet. Ved bruk av denne metoden må slik avhengighet mellom antagelsers sensitivitet analyseres spesifikt modell for modell. Har man ikke oversikt over hvordan antagelsene kan påvirke hverandres sensitivitet innad i modellene kan en utfordring med bruk av den presenterte metoden oppstå. Denne er relatert til at parametere i hendelsestreet som potensielt kan få en relativt stor økning, som følger av en kombinasjon av avvik i antagelser, kan bli oversett. Dette er spesielt aktuelt i forbindelse med punkt 3 i del 2 av metoden. Her vil man identifisere hvilke parametere som det er ansett realistisk kan få en 100% eller høyere økning. Hvis endring i en antagelse i modellen fører at en annen antagelse i modellen blir svært sensitiv kan en 100% parameterendring "plutselig" være realistisk. Eksempelvis hvis man har vurdert at en 100% økning i parameteren for tennsannsynlighet for en stor gasslekkasje ikke er realistisk. Kanskje har man oversett at endring i en antagelse i modellen fører til at en annen antagelse i modellen blir svært sensitiv for tennsannsynligheten. Dermed hvis et avvik i begge antagelsene skjer kan parameteren for tennsannsynlighet øke med over 100%. Dermed er en svakhet ved bruk av denne metoden at potensielle store parameterendringer i hendelsestreet kan bli oversett da man ikke har tilstrekkelig oversikt over hvordan antagelsene påvirker hverandres sensitivitet innad i modellene.

### **Realistiske endringer og avvik**

Flere steder i metodebeskrivelsen refereres det til realistiske avvik i antagelser og parametere. Man må vurdere hvor stort avvik i neglisjeringsantagelsen som er realistisk i del 1, punkt 5, for å vurdere mulig risikobidrag fra den neglisjerte hendelsen. I del 2, punkt 3, må det vurderes hvor man anser det realistisk at avvik i antagelser kan gi en 100% eller større parameterendring i hendelsestreet.

Skal man vurdere hvilke antagelser i en risikoanalyse som potensielt kan få høyere sensitivitet er dette tett knyttet opp til hvilke antagelser man tror kan ha avvik, og hvor store disse avvikene kan være. "Realistisk avvik" sier noe om hvor stort avvik man tror kan oppstå, og dermed indirekte, hvor stor sensitivitetsøkning man tror andre antagelser kan få. Dette blir dermed en subjektiv vurdering fra risikoanalytikerne til beslutningstagere om hvilke antagelser man anser kan bli mer sensitive og hvor sensitive de kan bli. På denne måten presenteres kun de sensitivitetsøkningene som risikoanalytikerne anser

som mest sannsynlige, så blir det opp til beslutningstagerne i etterkant og vurdere i hvilken grad de vil inkludere informasjonen i beslutningene. Dette anses som det beste alternativet per dags dato, men ved videre utvikling av behandling av avhengige antagelser kan det tenkes at man kan presentere hvordan eventuelt alle antagelsene kan få relativt stor økning i sensitivitet, sammen med en vurdering av hvor sannsynlig man vurderer dette.

Et annet moment angående bruken av ordet "realistisk" er at det i enkelte sammenhenger kan blandes inn i sensitivitetsvurderingen. For eksempel i del 1 av metoden, punkt 6, så man på om et realistisk avvik i neglisjeringsantagelsen kunne gi forandret konklusjoner. Legg merke til at selv om man vurderer at et realistisk avvik i antagelsen kan endre konklusjoner sier dette mindre om sensitiviteten i antagelsen. Anser man dette som realistisk må man fortsatt se på størrelsen av det realistiske avviket for å si om neglisjeringsantagelsen bør bli gitt høyere sensitivetsgrad. Dette fordi realistisk ikke sier noe om avviket er relativt lite eller stort, men sier heller noe om hvor usikre man er på at antagelsen er riktig. Man kan for eksempel i et tilfelle vurdere det som realistisk at antagelsen kan avvike med mer enn 200%, altså en relativt stor endring. I et annet tilfelle vurderer man det som urealistisk at en antagelse avviker med mer enn 10%, altså en relativ liten endring. Sensitiviteten til antagelsen er relatert til størrelsen på den relative endringen som skal til for å endre konklusjonen, ikke hvor realistisk dette avviket er. Hvor realistisk avviket er må man heller se i sammenheng med for eksempel grad av kunnskap antagelsen har, eller grad av "tro på avvik fra antagelse" som Berner & Flage [9] opererer med. Ser man på sensitivitetskriteriene fra Flage & Aven [10] kan beslutningstagere og interessenter blande vurderingen av realistisk avvik og relativ størrelse på avviket:

*"Significant sensitivity: Relatively small changes in base case values result in altered conclusions (e.g. exceeded risk acceptance criterion).*

*Moderate sensitivity: Relatively large changes in base case values needed to bring about altered conclusions.*

*Minor sensitivity: Unrealistically large changes in base case values needed to bring about altered conclusions."*

Flage & Aven [10, s14]

Spesielt for lav sensitivitet kan det her lett blandes inn en vurdering av "tro på avvik fra antagelse" i sensitivitetsvurderingen. For å gjøre det enda tydeligere for beslutningstagere hva sensitivitet er i forbindelse med antagelser kunne en bedre løsning være å definere eksakte verdier i disse kriteriene for en gitt analyse. Et eksempel kunne være at en antagelse får høy sensitivitet hvis en 20% endring fører til endring av en konklusjon, eller fører til en minst 15% endring i R. Det må allikevel legges til at det ikke er meningsfullt å snakke om en 20% endring for alle antagelser. Et eksempel på dette er antagelsen vedrørende at områdeinndelingen lagt til grunn for analysen er riktig. For disse antagelsene må i så fall egne kriterier bli lagt til grunn.

### Sensitivitetsmål for parameterendringer

Et av hovedpoengene i kapittel 3 er at store relative parameterendringer i hendelsestreet må til for å få betydelige sensitivitetsendringer i andre parametere i hendelsestreet. Som sett fra Figur 13 gav for eksempel en 30% parameterendring svært begrenset relativ økning i sensitivitet til en annen parameter i samme gren. Sensitivitetsøkningen var begrenset, uavhengig av hvor stor andel av risikoen denne grenen på forhånd utgjorde.

Dette resultatet må allikevel ses i sammenheng med sensitivitetsmålet og metoden som ble brukt i analysen. Metoden var å først måle den lokale sensitiviteten i en parameter, deretter endre en annen parameter i samme gren og deretter måle ny lokal sensitivitet i den første parameteren igjen. Sensitivitetsmålet var normalisert, det vil si at det målte relativ endring i  $R$  i forhold til relativ endring i parameteren i hendelsestreet. Som vi husker ble sensitiviteten uttrykket:

$$\tilde{S}_{\rho_i} = \frac{\rho_i^0}{R^0} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta \rho_i}$$

Siden det ble gjort to lokale sensitivitetmålinger for  $p_2$ , en før og en etter endring i  $p_1$ , ser vi at ved den andre sensitivitetsanalysen har vi en ny referanseverdi  $R^0$ . Dette er fordi endringen i  $p_2$  gir en økning i  $R$ . Hadde vi derimot brukt et sensitivitetsmål som heller målte endringen i  $R$  (ikke den relative endringen) i forhold til den relative parameterendringen hadde uttrykket blitt:

$$\tilde{S}_{\rho_i} = \rho_i^0 \cdot \frac{\Delta R}{\Delta \rho_i}$$

Hadde man brukt dette andre uttrykket ville ikke økningen i  $R$  som kom fra parameterendringen i  $p_1$ , bidra til å måle lavere sensitivitet i  $p_2$ . Det positive med å ha brukt en slik metode i analysen ville derfor vært at man ville sett nøyaktig hvor mye en gitt prosentvis endring i  $p_2$  hadde gitt i  $PLL$  før og etter endring i  $p_1$ . I mange tilfeller kan dette gi et godt bilde av den økte sensitiviteten da det kun fokuseres på mengde  $PLL$  en endring i en parameter gir før og etter endring av en annen parameter. Et normalisert sensitivitetsmål ble til tross for dette valgt. Dette er hovedsakelig fordi de aktuelle sensitivitetsendringene i en parameter blir lettere å formidle siden de da blir generelle. Sensitivitetsendringene er ikke knyttet opp mot en spesifikk størrelse av  $PLL$ . Dette gjør analysen generell og lettere og relatere til andre tilfeller. I tillegg er også et slikt normalisert sensitivitetsmål ofte brukt i QRA-sammenheng. Men det nevnes allikevel at sensitivitetsendringen i  $p_2$  ville blitt oppfattet noe høyere hvis man hadde brukt dette alternative sensitivitetsmålet presentert i dette avsnittet.

Et siste moment angående dette er at ved å bruke det normaliserte sensitivitetsmålet kan antagelser som inngår i ulike hendelsessekvenser i prinsippet påvirke hverandres resultatsensitivitet. Dette er i motsetning til hva

som ble sagt i forbindelse med Figur 8 i kapittel 3.2.1. Her ble det sagt at to antagelser må påvirke parametere som inngår i samme hendelsessekvens for at avvik i en antagelse skal påvirke resultatsensitiviteten i den andre antagelsen. Dette kan dog oppstå ved det normaliserte sensitivetsmålet fordi en endring i antagelse i en hendelsessekvens kan eksempelvis føre til en stor reduksjon i  $R$ . Dermed hvis man måler sensitiviteten i en antagelse i en annen hendelsessekvens blir denne nå målt større. Dette er dog ikke fordi endringen i antagelsen nå gir et større risikobidrag, men fordi  $R$  ble redusert av endringen i den første antagelsen. Disse tilfellene er ikke adressert i oppgaven da fokuset er å identifisere antagelser hvor et avvik gir et større risikobidrag etter endring av en annen antagelse.

### **Grense for parameterendring**

Det siste momentet vedrørende basisen for metoden som vil bli diskutert er at det ble satt en grense for parameterendringer. Fra kapittel 3.6 fremkom det at:

*”På bakgrunn av en analyse av sensitivetsendring med to avhengige parametere ble det sagt at metoden vil basere seg på å identifisere parametere hvor det blir vurdert som realistisk at en 100%, eller større, endring kan skje. Dette kan være som følger av avvik i en eller flere antagelser som påvirker parameteren. Videre vil det bli undersøkt hvilken effekt en slik endring har på sensitiviteten i andre parametere og antagelser.”*

For den første delen av metoden er ikke dette et kritisk punkt da man bruker listen med neglisjerte hendelser for å identifisere steder i et hendelsestre hvor store relative parameterendringer kan skje. Her ble det antatt at for alle neglisjerte hendelser må relativt store parameterendringer skje i hendelsessekvensen for at hendelsene skal betraktes som ikke neglisjerbare. Grensen på 100% ble derfor ikke aktivt brukt i del 1 av metoden.

I del 2 av metoden blir denne grensen brukt aktivt ved at man identifiserer hvor i et hendelsestre man anser det som realistisk at en 100% parameterendring kan oppstå for å identifisere andre parametere og antagelser som realistisk kan øke i sensitivitet. Denne grensen ble satt på grunnlag av analysen i kapittel 3.5. Her ble det identifisert at en annen parameter kan potensielt doble sin sensitivitet om en 100% parameterendring skjer i hendelsestreet. Hvordan denne grensen vil fungere i praktisk sammenheng er det dog knyttet noe usikkerhet til. I analysen i kapittel 3.5 var parametere som ble undersøkt i utelukkende samme gren i hendelsestreet. Dette vil ofte ikke være tilfelle, og derfor vil sensitivetsendringene som oppstår på grunn av en 100% endring i hendelsestreet være mindre enn hva som oppsto i analysen. Det kan vise seg ved bruk av metoden at grensen er for lav. Det vil si at sensitivetsendringene som registreres ved 100% parameterendring generelt er mindre relevante for beslutningstagere. Det som er klart er at ved bruk av del 2 av metoden må en grense settes. Akkurat hvor denne grensen bør settes for å avdekke relevante sensitivetsendringer, og samtidig begrense tidsbruket metoden krever bør videre vurderes ved bruk av metoden.



### 5.1.2 Praktiske aspekter

De praktiske aspektene ved metoden må også adresseres. Dette vil bli diskutert i forhold til hvilke deler av metoden som kan være utfordrende i en praktisk sammenheng. Denne diskusjonen vil bli delt inn i to deler, en for del 1 og en for del 2 av metoden.

#### Del 1

Flere av stegene i del 1 av metoden kan la seg gjennomføre uten store krav til tidsbruk eller verktøy. Spesielt gjelder dette stegene 1-4. I steg 5 må man legge til grunn en realistisk endring i neglisjeringsantagelsen for så å vurdere risikobidraget fra hendelsen gitt denne endringen. Dette kan vise seg å være et kritisk steg da det er knyttet noen praktiske utfordringer ved det. For å si noe om risikobidraget må man vite noe om konsekvensene skulle hendelsen oppstå. Det er ikke sikkert at man alltid har god kunnskap om hva konsekvensen av hendelsen er da hendelsen var neglisjert i risikoanalysen og denne vurderingen dermed ikke er gjort. I tillegg kan det være utfordrende å kartlegge risikobidraget fra hendelsen da hendelsen heller ikke er lagt inn i risikomodellen. Man kan dermed ikke gå direkte inn i modellen å manipulere parameteren neglisjeringsantagelsen påvirker, for så å observere hva som skjer i resultatet. At hendelsen ikke er lagt inn i risikomodellen kan også føre til at punkt 7 blir noe utfordrende. Dette fordi man ikke kan gå direkte inn i risikomodellen og hendelsestreet og undersøke sensitiviteten i de berørte parameterne og antagelsene.

Disse elementene er ansett som de største praktiske utfordringene med del 1 av metoden og kan føre til at metoden i noen sammenhenger kan være noe tidkrevende.

#### Del 2

I del 2 er steg 3 det kritiske steget i en praktisk sammenheng. Metodens effektivitet avhenger i stor grad av hvordan dette steget fungerer. I punkt 3 skal man, ved hjelp av et premisskart, vurdere hvilke parametere i det aktuelle hendelsestreet som kan få en 100% eller større økning som følger av avvik en eller flere antagelser. Dette krever god kjennskap til hvordan antagelsene påvirker parameterne i hendelsestreet. For eksempel påvirker antagelsene parametere i hendelsestreet på forskjellig måte. En realistisk endring i en antagelse kan for eksempel føre til en 100% endring for en parameter men ikke for en annen. Et eksempel på dette kunne vært at antagelsen om gassinhold i oljen i et segment kunne føre til 100% økning i parameteren tennsannsynlighet for store lekkasjer fra segmentet, men ikke i tennsannsynlighetsparameteren for små lekkasjer. Steg 3 identifiseres derfor som et kritisk steg for del 2 av metoden i en praktisk sammenheng.

## 5.2 Input til beslutningstagere

Informasjonsverdien av og avdekke antagelser som kan bli resultatsensitive ved endring av andre antagelser har tidligere i oppgaven blitt presentert. En kort betraktning angående hvordan resultatene fra metoden konkret kan være nyttig for beslutningstagere vil allikevel nå bli presentert.

Når Apostolakis[18] svarer på en vanlig kritikk mot QRA som sier at analytikerne kun er opptatt av å produsere tall sier han:

*"I know of no QRA analysts who act this way (and I know a lot of them). The uncertainties about the results and the dominant scenarios are the results that experienced analysts look for. The lower the probabilities that are reported, the more suspicious these analysts become.*

*QRAs are performed to understand how the system can fail and to prioritize the failure modes, not to produce a set of numbers. The only QRA results that have any chance of influencing risk management are those that provide engineering insights."*

Apostolakis [18: side 518-519]

Målet for metoden presentert i denne oppgaven er å identifisere om noen antagelser som i analysen har blitt vurdert som mindre sensitive kan bli betydelig mer sensitive om antatte forhold endres. Dette kan ses på som en indirekte måte å lete etter usikkerhet i analysen, slik som Apostolakis[18] fremhever. Viser det seg for eksempel at en antagelse kan bli betydelig mer sensitiv enn hva man vurderte i utgangspunktet, kan usikkerheten som er knyttet til denne antagelsen bli mer vesentlig å ta hensyn til for beslutningstagere. Dette gjør beslutningstagere mer informerte om risiko og usikkerhet knyttet til installasjonen. Som Apostolakis[18] også nevner må resultater gi innsikt i aspekter av ingeniørarbeidet for at de skal ha påvirkning på beslutningene. Informasjon om at en antagelse  $a_1$  kan bli mer sensitiv om en annen antagelse  $a_2$  har avvik kan tenkes å ha svært praktiske implikasjoner. Det kan for eksempel fortelle at man bør redusere usikkerheten i en av, eller begge antagelsene, at man bør gjøre tiltak for at sensitivitetsøkningen i  $a_1$  ikke bli like stor skulle avviket i  $a_2$  skje eller at man bør gjøre tiltak for at avviket i  $a_2$  blir mindre sannsynlig. På denne måten er det tenkelig at resultatene fra metoden kan påvirke og være nyttige i beslutningsprosesser.

## 5.3 Veien videre

Som sagt i forrige avsnitt kan informasjon vedrørende avhengighet mellom antagelser være nyttig for beslutningstagere. Effektiv vurdering av slik avhengighet bør derfor være tema for videre arbeid. Metoden presentert i denne oppgaven er et forslag til hvordan denne behandlingen kan gjøres. Det er dog noe usikkerhet knyttet til hvor godt den vil fungere i en reel situasjon per dags dato på grunn av visse praktiske utfordringer. En test av metoden i en reel situasjon kan derfor være nyttig for å identifisere punkter hvor metoden kan modifiseres for å være mer praktisk anvendelig.

Uavhengig av om metoden presentert i denne oppgave blir brukt for videre arbeid med avhengige antagelser, vil det bli anbefalt at det videre arbeidet fokuseres på antagelser som kan få endret resultatsensitivitet og mindre på økt konklusjonssensitivitet. Denne oppgaven har heller ikke tatt for seg hvordan man systematisk kan vurdere hvordan antagelser som inngår i komplekse modeller påvirker hverandre, for eksempel i antenningsmodeller, brannmodeller, eksplosjonsmodeller, etc . Dette vil også være et viktig område for utforskning for å kunne presentere for beslutningstagere hvilke antagelser som påvirker hverandres sensitivitet.

## 6 Konklusjon

En systematisk metode for å avdekke antagelser i QRA som potensielt kan gå fra å være mindre sensitive til og bli mer sensitive er presentert. Som basis for metoden ble det argumentert for at fokus på økning i sensitivitet med hensyn på det numeriske resultatet, ikke konklusjonene, i analysen er det mest hensiktsmessige. Dette fordi det er denne informasjonen som kan gi videre innsikt til beslutningstagere vedrørende hvilke antagelser som er viktige for å holde risikonivået på installasjonen så lavt som mulig. Som basis for metoden ble det også vist at en stor relativ parameterendring må skje i et hendelsestre for at andre parametere i hendelsestreet skal få betydelige sensitivitetsendring. Strategien som metoden baserer seg på er derfor å identifisere hvilke antagelser som ved avvik potensielt kan gi store relative parameterendringer i hendelsestreet, for så å identifisere hvilke parametere og antagelser som får en betydelig sensitivitetsendring som følger av dette avviket.

Metoden presentert er todelt hvor den ene delen tar utgangspunkt i en liste over neglisjerte hendelser og den andre tar utgangspunkt i et premisskart. Visse praktiske utfordringer ved metoden ble identifisert og det konkluderes med at metoden bør utprøves i en reel situasjon for å identifisere hvordan den kan modifiseres for å være så praktisk anvendelig og tidseffektiv som mulig. Det konkluderes også med at informasjon vedrørende avhengighet mellom antagelser kan være nyttig i beslutningsprosesser og bør være tema for videre undersøkelse. Det blir anbefalt at slik videre undersøkelse fokuserer på økt sensitivitet med hensyn på numerisk resultat, ikke konklusjon. Systematisk kartlegging av hvordan antagelser, som inngår i komplekse modeller som brann- og eksplosjonsmodeller, påvirker hverandres sensitivitet kan være et aktuelt område for videre utforskning og et supplement til metoden presentert i denne oppgaven.

## 7 Referanser

---

- <sup>1</sup> Aven T. A risk concept applicable for both probabilistic and non-probabilistic perspectives. *Safety Science*. 2011;49(8-9):1080-1086. DOI:
- <sup>2</sup> Aven T. Practical implications of the new risk perspectives. *Reliability Engineering & System Safety*. 2013;115:136-145. DOI: [10.1016/j.ress.2013.02.020](https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.02.020)
- <sup>3</sup> Aven T. *Risk analysis: assessing uncertainties beyond expected values and probabilities*. Hoboken, NJ, USA: Wiley; 2008.
- <sup>4</sup> Aven T. How to define and interpret a probability in a risk and safety setting. *Safety Science*. 2013;51(1):223-231. DOI: [10.1016/j.ssci.2012.06.005](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.06.005)
- <sup>5</sup> Apostolakis GE. The Concept of Probability in Safety Assessments of Technological Systems. *Science*. 1990;250(4986):1359-1364.
- <sup>6</sup> Aven T, Pedersen LM. On how to understand and present the uncertainties in production assurance analyses, with a case study related to a subsea production system. *Reliability Engineering and System Safety*. 2014;124:165-170. DOI: [10.1016/j.ress.2013.12.003](https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.12.003)
- <sup>7</sup> Vinnem JE. *Offshore Risk Assessment Vol 1*. 3.utg. London: Springer;2014
- <sup>8</sup> Vinnem JE. *Offshore Risk Assessment Vol 2*. 3.utg. London: Springer;2014
- <sup>9</sup> Berner C, Flage R. Quantitative vs. qualitative treatment of uncertain assumptions in risk assessment. ESREL; 2014.09.18; Wrocław
- <sup>10</sup> Flage R, Aven T, Expressing and communicating uncertainty in relation to quantitative risk analysis. *R&RATA*. 2009;2(13):9-18
- <sup>11</sup> Saltelli A, Chan K, Scott EM. *Sensitivity Analysis*. Chichester: Wiley;2000
- <sup>12</sup> Kuo W, Xiaoyan Z. *Importance Measures in Reliability, Risk, and Optimization: Principles and Applications*. Hoboken: Wiley; 2012
- <sup>13</sup> Aven T. *Foundations of Risk Analysis*. Chichester: Wiley; 2003
- <sup>14</sup> Tuft VL, Wagnild BR, Pedersen LM, Sandøy M, Aven T. Uncertainty and strength of knowledge in QRAs. ESREL; 2015.09.07; Zürich.
- <sup>15</sup> Beard AN. Risk assessment assumptions. *Civil Engineering and Environmental Systems*. 2004;21(1):19-31
- <sup>16</sup> Borgonovo E, Apostolakis GE. A new importance measure for risk-informed decision making. *Reliability Engineering and System Safety*. 2001;72(2):193-212.

---

<sup>17</sup> Aven T, Vinnem JE. On the use of risk acceptance criteria in the offshore oil and gas industry. *Reliability Engineering and System Safety*. 2005;90(1):15-24. DOI: [10.1016/j.ress.2004.10.009](https://doi.org/10.1016/j.ress.2004.10.009)

<sup>18</sup> Apostolakis GE. How useful is quantitative risk assessment?. *Risk analysis*. 2004;24(3):512-520. DOI: [10.1111/j.0272-4332.2004.00455.x](https://doi.org/10.1111/j.0272-4332.2004.00455.x)