



Universitetet  
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

## MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: <b>Master i Risikostyring / Offshore sikkerhet</b>	Vårsemesteret, 2010  Åpen
Forfatter: <b>Børge Solvær</b>	..... (signatur forfatter)
Fagansvarlig: <b>Eirik BJORHEIM ABRAHAMSEN (Universitetet i Stavanger)</b>	
Veiledere: <b>Eirik BJORHEIM ABRAHAMSEN (Universitetet i Stavanger)</b> <b>Øyvind Økland (Aibel)</b>	
Tittel på masteroppgaven:  <b>Håndtering av usikkerhet i eksplosjonsanalyser</b>	
Studiepoeng: 30sp	
Emneord: Usikkerhet Eksplosjonsanalyse Eksplosjonsberegning Risikoakseptkriterier (RAK) Risikoanalyse NORSOK Z-013	Sidetall: <b>77 sider</b>  + vedlegg/annet:  Stavanger, 15. juni 2010

## Sammendrag

Hovedformålet med oppgaven var å belyse hvordan usikkerhet håndteres i en risikoanalyse som inkluderer eksplosjonsberegninger, deretter se om det fantes forbedringspotensial og til sist komme med forslag til forbedringer.

Ekspløsjoner er kompliserte fenomener som påvirkes av mange faktorer og i eksplosjonsberegninger må en ta hensyn til disse. Verdiene som benyttes for faktorene er basert på ulike kilder (f.eks. historiske data, antagelser og ekspertvurderinger) og har ulik grad av usikkerhet knyttet til seg.

Faktorer som påvirker eksplosjoner er blitt identifisert, og det er blitt gjennomført en enkel eksplosjonsberegning ved bruk av noen av disse faktorene. En sensitivitetsanalyse ble utført og den viste at små endringer i en eller flere faktorer kan gi betydelig utslag i resultatene.

En metode for eksplosjonsberegning har blitt gjennomgått, og det har blitt sett på metodens håndtering av usikkerhet. I tillegg har usikkerhetsmomenter i metoden blitt diskutert.

Generelle betraktninger om usikkerhet/usikkerhetsmomenter fra det prediktive perspektivet for risiko og risikoanalyse har blitt presentert. Der fokus har vært på å få fram momenter som har betydning for risikoanalyser som inkluderer eksplosjonsberegninger. Bruk av risikoakseptkriterier har også blitt diskutert.

Av anbefalinger og forslag til forbedringer har oppgaven blant annet kommet fram til det som presenteres nedenfor.

Forenklinger, antagelser og usikkerhet må eksplisitt uttrykkes gjennom hele risikoanalyseprosessen. Da vil det være mulig å vurdere disse sammen med foreløpige resultater, samme hvilket steg i prosessen en befinner seg.

En sensitivitetsanalyse burde gjennomføres for faktorene som benyttes i eksplosjonsberegningene. Ved å kombinere resultatene fra denne med en analyse av kilder til usikkerhet for faktorene, kan en sørge for at hver faktor i eksplosjonsberegningene blir tildelt rett detaljnivå.

Beslutninger om valg av løsninger burde fattes på høyt ledernivå og på bakgrunn av en fullstendig vurdering av tilgjengelige alternativer. Arbeidet med risikoreduksjon skal følge ALARP-prinsippet, og i den forbindelse burde en være klar over at bruk av risikoakseptkriterier kan komme i konflikt med ALARP-prinsippet. Dersom dette er tilfellet burde en bruke en alternativ løsning til risikoakseptkriterier, som for eksempel overordnede mål.

# Innholdsfortegnelse

Sammendrag.....	1
Innholdsfortegnelse .....	2
Forord .....	5
Forkortelser .....	6
Figurliste.....	7
Tabelloversikt .....	8
1. Innledning.....	9
1.1 Bakgrunn og formål .....	9
1.2 Innhold.....	11
2. Om risikoanalyse, eksplosjon og eksplosjonsberegning .....	12
2.1 Kort om eksplosjonsberegning som en del av risikoanalyse, fra NORSOK .....	12
2.1.1 Kvantitativ risikoanalyse.....	12
2.1.2 Prosedyre for simulering av sannsynlige eksplosjoner .....	16
2.2 Eksplosjon .....	19
3. Inndata .....	21
3.1 Hydrokarboner .....	21
3.1.1 Type hydrokarbon .....	21
3.1.2 Gasskonsentrasjon .....	22
3.2 Geometri.....	23
3.2.1 Forbrenning og strømning.....	23
3.2.2 Geometriske forhold.....	24
3.3 Lekkasje .....	29
3.3.1 Lekkaspunkter.....	29
3.3.1 Lekkasjefrekvens for lekkaspunkter .....	29
3.3.2 Lekkasjerate, varighet og mengde .....	29
3.4 Vind og ventilasjon.....	30
3.4.1 Vindretning og styrke .....	30
3.4.2 Ventilasjon .....	30

3.5 Spredning .....	30
3.6 Antenneing .....	31
3.6.1 Tennkildens styrke .....	32
3.6.2 Eksempler på tennkilder .....	34
3.6.3 Tennkildens plassering .....	35
3.6.4 Tid til antenneing .....	36
3.7 Barrierer .....	36
4. Case for illustrasjon av sensitivitet i inndata.....	38
4.1 Referanseoppsett .....	39
4.1.1 Utregning av eksplosjonstrykk for referanseoppsett .....	39
4.2 Scenarier med endring av en faktor .....	47
4.2.1 Scenario 1: Endring av diameter hull (+/-)20 %.....	48
4.2.2 Scenario 2: Endring av tid (+/-)20 % .....	49
4.2.3 Scenario 3: Endring av andel svært hindret område (+/-)20 %.....	50
4.2.4 Resultater for scenarier med endring av en faktor.....	51
4.3 Overtrykk ved endring av to faktorer .....	52
4.3.1 Kombinasjon av scenario 1 og 2 .....	52
4.3.2 Kombinasjon av scenario 1 og 3 .....	53
4.3.3 Kombinasjon av scenario 2 og 3 .....	53
4.3.4 Samspill .....	54
4.4 Samlet resultat.....	55
4.6 Diskusjon om resultater og sensitivitet.....	56
5 Eksplosjonsvedlegg.....	58
5.1 Beskrivelse av fremgangsmåte.....	60
5.1.1 Definere antall scenarier .....	60
5.1.2 Scenario .....	61
5.1.3 Størrelse på brennbar gassky i fyllingsgradintervall .....	61
5.1.4 Støkiometriske gasskyer .....	62
5.1.5 Velge støkiometrisk gasskystørrelse .....	62
5.1.6 Lokasjon av støkiometrisk gassky.....	62
5.1.7 Antenningspunkter .....	63
5.1.8 Eksplosjonstrykk .....	63
5.1.9 Konsekvensvurdering .....	63
5.1.10 Etablere sannsynligheter for eksplosjonslast > DAL for hver partisjon .....	63

5.1.11	Tilbakeføring av eksplosjonssannsynlighet i fyllingsgradintervall.....	63
5.1.12	Eksplosjonsfrekvens og risikovurdering .....	63
5.2	Håndtering av usikkerhet i eksplosjonsvedlegget.....	64
5.2.1	Definere antall scenarier .....	64
5.2.2	Scenario .....	65
5.2.3	Størrelse på brennbar gassky i fyllingsgradintervall .....	65
5.2.4	Støkiometriske gasskyer .....	65
5.2.5	Velge støkiometrisk gasskystørrelse .....	65
5.2.6	Lokasjon av støkiometrisk gassky .....	65
5.2.7	Antenningspunkter .....	65
5.2.8	Eksplosjonstrykk .....	65
5.2.9 – 5.2.12	.....	65
6	Om usikkerhet og bruk av RAK .....	66
6.1	Generelle betraktninger om usikkerhet .....	66
6.1.1	Kilder til usikkerhet.....	66
6.1.2	Utdyping av kilder til usikkerhet.....	66
6.2	Diskusjon om usikkerhet .....	68
6.2.1	Usikkerhet i inndata vurdert mot sensitivitet .....	68
6.2.2	Usikkerhetsmomenter i metoden.....	69
6.3	Bruk av RAK.....	71
7	Forslag til forbedringer og konklusjon .....	73
7.1	Forslag til forbedringer .....	73
7.1.1	Opplæring/bevisstgjøring om fallgruver og problemer .....	73
7.1.2	Historiske data .....	73
7.1.3	Sensitivitetsanalyse .....	73
7.1.4	Synliggjøring av usikkerhet og begrensinger.....	74
7.1.5	Bruk av RAK .....	74
7.1.6	Beslutningsprosessen.....	75
7.2	Konklusjon.....	76

## Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved Universitetet i Stavanger (UiS) og er en del av et toårig masterprogram i risikostyring. Oppgaven markerer avslutningen av masterprogrammet og går over et helt semester (30 studiepoeng).

Arbeidet med oppgaven har vært både lærerikt og utfordrene.

Jeg vil takke min veileder på UiS, Eirik Bjorheim Abrahamsen for god veiledning og rask tilbakemelding.

Jeg vil også takke Øyvind Økland og Mahmoud Dalir Rakhsh ved Aibel avd. Stavanger for innspill og gode råd underveis i oppgaven.

Stavanger, 15.juni 2010

Børge Solvær

## Forkortelser

AIT	Auto ignition temperature
ALARP	Så lavt som praktisk mulig
ALS	Accident collapse limit state
BAT	Best available technology
CFD	Strømningsdynamisk beregningskode
DAL	Design accident load
DUL	Dimensjonerende ulykkeslast
ESDV	Nødavstengingsventil
FAR	Dødsfrekvens (antall omkomne per 100 mill eksponerte timer)
LEL	Nedre eksplosjonsgrense (samme som LFL)
LFL	Nedre brennbarhetsgrense
MIE	Minimum ignition energy
P-I	Pressure impulse
PLL	Potensielt tap av liv
RAK	Risikoakseptkriterier
TRA	Total risikoanalyse
UEL	Øvre eksplosjonsgrense (samme som UFL)
UFL	Øvre brennbarhetsgrense
UH	Ulykkeshendelse

## Figurliste

Figur 2.1 - Risikoanslag, -analyse og -vurdering .....	13
Figur 2.2 - Skjematisk framstilling av prosedyre for beregning av eksplosjonsrisiko .....	17
Figur 3.1 - Økt flammehastighet grunnet turbulens.....	24
Figur 3.2 - Forbrenning med konstant volum eller trykk.....	25
Figur 3.3 - Åpning i kortside .....	26
Figur 3.4 - Åpning i langside.....	26
Figur 3.5 - Plassering av hindringer.....	27
Figur 4.1 - Kompresjonsfaktor.....	40
Figur 4.2 - Lekkasje for referanseoppsett .....	43
Figur 4.3 - Samlet lekkasje over tid for referanseoppsett .....	44
Figur 4.4 - Overtrykk (side-on peak pressure) versus skalert avstand .....	46
Figur 4.5 - Trykkrefleksjon på bygning .....	47
Figur 4.6 - Lekkasje for scenario 1 .....	48
Figur 4.7 - Samlet lekkasje for scenario 1 .....	49
Figur 4.8 - Samlet lekkasje for scenario 2 .....	50
Figur 4.9 - Samlede resultater for scenario 1-3.....	51
Figur 4.10 - Kombinasjon scenario 1 og 2.....	52
Figur 4.11 - Kombinasjon scenario 1 og 3.....	53
Figur 4.12 - Kombinasjon scenario 2 og 3.....	53
Figur 4.13 - Samspill ved endring av to faktorer .....	54
Figur 4.14 - Samlet resultat fra scenarioer og kombinasjon av scenarioer .....	56
Figur 5.1 - Oversikt .....	60
Figur 5.2 - Akkumulert frekvens for antenning (fra eksempelverdier gitt i tabell 5.2) .....	62

## Tabelloversikt

Tabell 2.1 - Skader fra overtrykk .....	20
Tabell 3.1 - Eksempel på MIE og AIT .....	31
Tabell 3.2 - Antennelsestemperatur i luft ved 1 atm .....	33
Tabell 4.1 - Referanseoppsett .....	39
Tabell 4.2 - Verdier til utregning av initiell lekkasjerate .....	42
Tabell 4.3 - Volum gassky og volum gassky i svært hindret område .....	44
Tabell 4.4 - Scenario 1 .....	48
Tabell 4.5 - Scenario 2 .....	49
Tabell 4.6 - Scenario 3 .....	50
Tabell 4.7 - Samlet resultat fra scenarioer og kombinasjon av scenarioer .....	55
Tabell 5.1 - Totalt antall scenarioer .....	60
Tabell 5.2 - Eksempel på antenningsfrekvenser for fyllingsgradintervaller .....	61
Tabell 5.3 - Eksempel: Sannsynlighet for eksplosjonslast > DAL .....	64

# 1. Innledning

## 1.1 Bakgrunn og formål

Innen olje- og gassnæringen, og da spesielt innen offshorevirksomhet, er det et sterkt fokus på sikkerhet. Dette henger sammen med det potensialet som finnes for at ulykker med alvorlige konsekvenser kan inntreffe. Potensielle konsekvenser av store ulykker offshore er ofte alvorlige, både i form av tapte menneskeliv og verdier, samt skader på miljøet. Derfor ligger det store forventninger fra både myndigheter og fra allmennheten om at selskapene som opererer offshore ivaretar sikkerheten på best mulig måte.

Norske myndigheter stiller strenge krav til hvordan selskaper som opererer på norsk sokkel skal ivareta sikkerheten. Forskrift om helse, miljø og sikkerhet i petroleumsvirksomheten (Rammeforskriften) sier blant annet følgende: Petroleumsvirksomhet skal være forsvarlig både ut fra en enkeltvis og samlet vurdering av alle faktorer som har betydning for planlegging og gjennomføring av petroleumsvirksomhet når det gjelder helse, miljø og sikkerhet [1]. Angående prinsipper for risikoreduksjon sier Rammeforskriften blant annet følgende: Ved reduksjon av risiko skal den ansvarlige velge de tekniske, operasjonelle eller organisatoriske løsningene som etter en enkeltvis og samlet vurdering av skadepotensialet og nåværende og fremtidig bruk gir de beste resultater, så sant kostnadene ikke står i et vesentlig missforhold til den risikoreduksjonen som oppnås [1]. Dette prinsippet for risikoreduksjon baserer seg på ALARP-prinsippet (As Low As Reasonably Practicable). ALARP innebærer at risikoen skal reduseres så langt praktisk mulig, der "praktisk mulig" ses i forhold til alle de andre fordelene (godene) og ulempene ved alternativet [2].

Som en del av arbeidet med å ivareta sikkerheten offshore, gjennomføres det risikoanalyser. Risikoanalysene er med på å danne beslutningsgrunnlag for avgjørelser som må tas angående sikkerheten forbundet til de aktivitetene som skal utføres offshore. Risikoanalyser utføres for hele livssyklusen til offshoreaktiviteten, fra planleggingen starter og til installasjonen skal fjernes når driften er avsluttet.

For offshoreinstallasjoner er en av de største farene ukontrollerte utslipp av brennbar gass. Under de rette omstendighetene kan ukontrollerte utslipp av brennbar gass lede til brann og/eller eksplosjon. Det brukes store resurser på å redusere risikoen for at ukontrollerte utslipp skal skje, og for at konsekvensene dersom det skjer skal være lavest mulig. Som en del av risikoanalysene gjennomføres det beregninger for brann og eksplosjon på installasjonene, denne oppgaven skal se nærmere på det som omhandler eksplosjonsberegninger.

Eksplodingsberegningene baserer seg i hovedsak på informasjon om fysiske forhold på installasjonen, samt gassens fysiske og kjemiske egenskaper. Denne informasjonen kan deles opp i mange faktorer som alle spiller inn ved en eksplosjon og disse må det tas hensyn til i eksplodingsberegningene. Grunnlaget som brukes for å bestemme hvilken verdi som skal benyttes for en faktor kan variere (for eksempel historiske data, antagelser, ekspertvurderinger) og dermed kan det være usikkerhet av varierende grad knyttet til faktorene. Også i metoden som benyttes for eksplodingsberegning kan det være usikkerhetsmomenter.

I forhold til metoden som benyttes for eksplodingsberegning er det interessant å vite hvordan den håndterer usikkerhet. Dette gjelder både for den usikkerheten som finnes i faktorene, og eventuell usikkerhetsmomenter i metoden selv. Uansett hvordan usikkerheten håndteres vil den ha innvirkning på resultatet, enten ved at den direkte påvirker det endelige resultatet (ved at det er tatt høyde for de underliggende usikkerhetene i det endelige resultatet) eller ved at det blir usikkerhet knyttet til det endelige resultatet.

Med bakgrunn i dette vil oppgaven forsøke å belyse hvordan usikkerheten håndteres i en risikoanalyse som inkluderer eksplodingsberegninger, og deretter se på om det er forbedringspotensial i forbindelse med håndtering av usikkerhet. Hovedfokus vil være rettet mot eksplodingsberegningene, men også relevante aspekter rundt risikoanalyseprosessen vil bli inkludert. Dette gjøres ved å se på usikkerheten knyttet til faktorene, håndtering av usikkerhet i en eksplodingsberegning metode og usikkerhetsmomenter i selve metoden. For å få til dette vil oppgaven først se på aktuelt regelverk for eksplodingsberegninger. Så identifisere de aktuelle faktorene som spiller inn ved en eksplosjon, og gjennomføre en enkel sensitivetsanalyse for noen av disse. Så gjennomgå en metode som benyttes for eksplodingsberegning. Deretter vil usikkerhetene nevnt ovenfor bli belyst. Så vil oppgaven forsøke å gi betraktninger angående håndteringen av usikkerhetene, og til sist forsøke å komme med forslag til forbedringer.

Formålet er med andre ord følgende:

- Se på gjeldene regelverk for eksplodingsberegninger for offshoreinstallasjoner
- Identifisere hvilke faktorer som har innvirkning på eksplosjoner
- Gjennomføre en sensitivetsanalyse for utvalgte faktorer
- Se på en metode som benyttes for eksplodingsberegning
- Se på hvordan metoden håndterer usikkerhet
- Identifisere kilder til usikkerhet i faktorer og metode
- Forslag til forbedringer

## **1.2 Innhold**

I kapittel 2 presenteres kort risikoanalyse slik det fremkommer i NORSOK Z-013, deretter presenteres den delen av risikoanalysen som omhandler eksplosjonsberegninger, og til sist en definisjon av eksplosjon. Hensikten med kapitlet er å vise hvor eksplosjonsberegningen hører hjemme i risikoanalyseprosessen og hvilke krav som stilles til den.

I kapittel 3 blir det sett på hvilke faktorer som har betydning ved en eksplosjon.

I kapittel 4 gjennomføres enkle eksplosjonsberegninger der hensikten er å se på bergningenes sensitivitet i forhold til faktorene.

I kapittel 5 blir det sett på en metode for eksplosjonsberegning, samt metodens håndtering av usikkerhet.

I kapittel 6 presenteres generelle betraktninger om usikkerhet og om bruk av RAK. Sensitivitet vurdert opp mot usikkerhet diskuteres og usikkerhetsmomenter i metoden fra kapittel 5 diskuteres.

I kapittel 7 presenteres anbefalinger og forslag til forbedringer, samt konklusjon.

## 2. Om risikoanalyse, eksplosjon og eksplosjonsberegning

### 2.1 Kort om eksplosjonsberegning som en del av risikoanalyse, fra NORSOK

Dette kapittelet beskriver risikoanalyse slik det er omtalt i NORSOK standard Z-013 Risiko- og beredskapsanalyse. Det som er relevant for å beskrive hvor eksplosjonsberegninger hører hjemme i risikoanalyseprosessen er tatt med, beredskapsanalyse vil ikke bli beskrevet. NORSOK standardene er utviklet av norsk petroleumsindustri for å sikre tilfredsstillende sikkerhet, verdiøkning og kostnadseffektivitet for eksisterende og framtidig utviklingsprosjekter i petroleumsindustrien [3].

NORSOK definerer risikoanalyse på følgende måte: Bruk av tilgjengelig informasjon for å identifisere ulykkeshendelser og estimere risiko. I en del tilfeller er det mest aktuelt å utføre kvantitative risikoanalyse, som innebærer en tallfesting av sannsynlighet for og konsekvens av ulykkeshendelser, på en slik måte at det tilrettelegges for sammenlikning med kvantitative akseptkriterier for risiko.

Kvantitativ risikoanalyse benyttes for offshoreoperasjoner og blir kort beskrevet i kapittel 2.1.1.

NORSOK Z-013 sier følgende: Hovedformålet med bruk av risiko- og beredskapsanalyser er å skape et beslutningsgrunnlag som kan bidra til å velge de sikkerhetsmessig optimale løsninger samt de risikoreducerende tiltakene som skal iverksettes, på et riktig faglig og organisatorisk underlag.

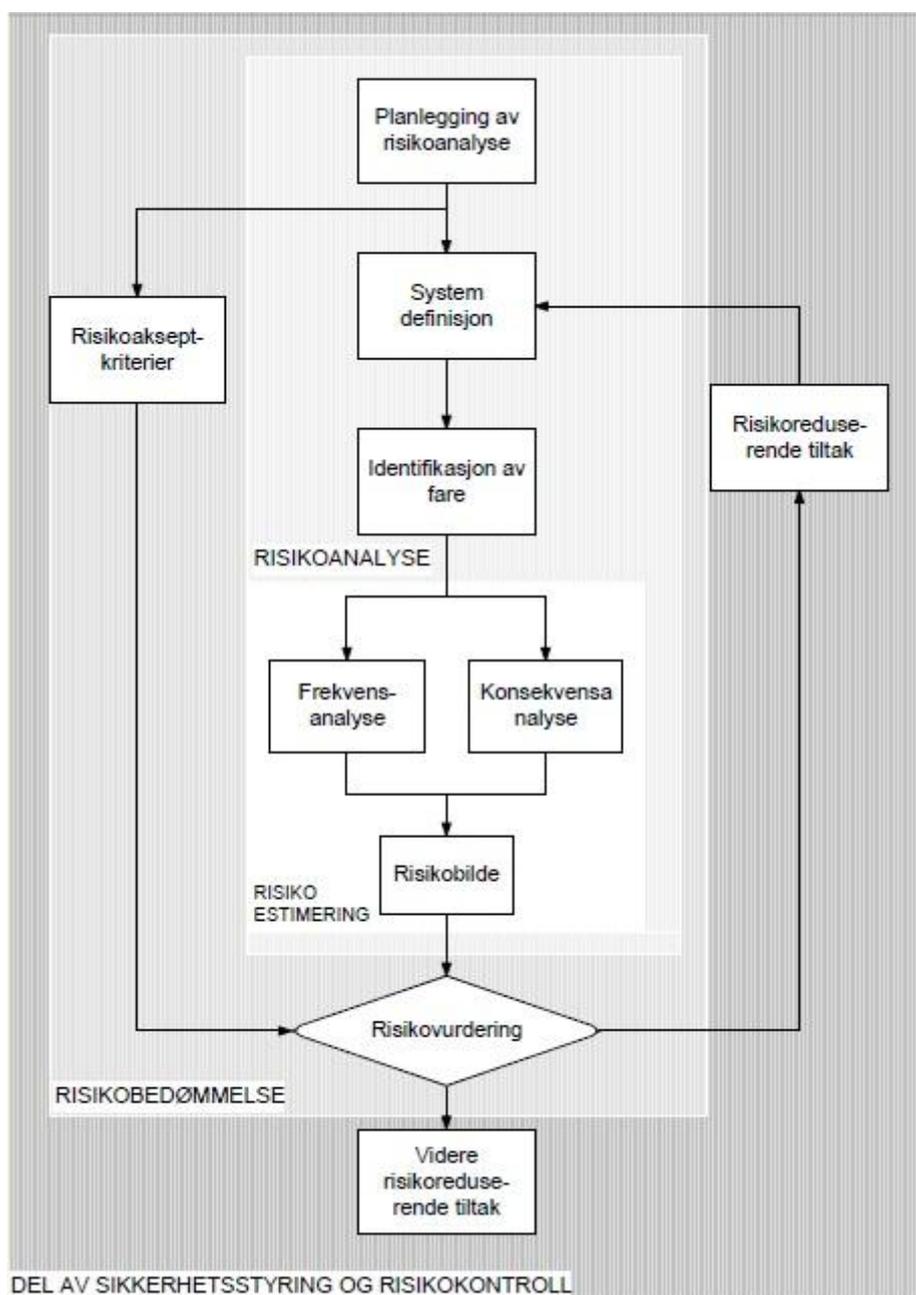
#### 2.1.1 Kvantitativ risikoanalyse

I tillegg til å beskrive risiko- og beredskapsanalyse, inneholder NORSOK Z-013 et eget kapittel med særlige krav til kvantitativ risikoanalyse. Beskrivelsen av kvantitativ risikoanalyse er hentet fra nevnt standard.

Kvantitativ risikoanalyse består av fire nivåer:

- Innerste nivå: Risikoberegning
- Andre nivå: Risikoanalyse
- Tredje nivå: Risikovurdering
- Ytre nivå: HMS-styring

Figur 2.1 (kopiert fra NORSOK Z-013) viser rekkefølgen nivåene/oppgavene skal utføres i, med start på toppen av figuren.



**Figur 2.1 - Risikoanslag, -analyse og -vurdering**

### 2.1.1.1 Konsekvens- og eskaleringsanalyse

Konsekvensanalyse er plassert i det innerste nivået (risikoberegning) i figur 2.1, nedenfor følger utdrag fra NORSOK Z-013 om konsekvens- og eskaleringsanalyse.

Begrepet (konsekvens- og eskaleringsanalyse) er her anvendt i en utvidet betydning og inkluderer konsekvensmodellering (dvs. beregning av ulykkeslaster), eskaleringsanalyse, samt beregning av respons til ulykkeslast.

For TRA (total risikoanalyse), skal konsekvensanalysen inneholde, men ikke begrenses til de følgende trinn (enten som en del av TRA eller gjennom separate analyser), når faren er relevant:

- Lekkasje av brennbare stoffer
  - Beregning av utslipp (mengde, rate, varighet, etc.)
  - Spredningsberegning
  - Beregning av antennelsespotensial
  - Brannberegning
  - Eksplosjonsberegning
  - Responsberegning (kan også være egne analyser)

Listen over krav til konsekvensanalyse inneholder flere punkter, men disse er ikke relevant for oppgaven og tas ikke med.

Aktuelle verktøy for konsekvensberegninger relatert til brann og eksplosjon er:

- CFD-metoder
- Analytiske metoder
- Simuleringsmetoder (basert enten på CFD eller analytiske metoder)

Eskaleringsanalyse er nøye sammenbundet med konsekvens- og responsberegning. I eskaleringsanalyse inngår analyse eller vurdering av vesentlige sikkerhetssystemer for å bestemme muligheter og forutsetninger for å kunne kontrollere utviklingen av ulykkeshendelser.

### **2.1.1.2 Risikoakseptkriterier**

Følgende om risikoakseptkriterier er hentet fra NORSOK Z-013:

Risikoakseptkriterier uttrykker det overordnede risikonivået som fastsettes som tolererbart med hensyn til en definert tidsperiode eller en fase av en aktivitet.

Risikoakseptkriterier utgjør en referanse ved vurdering av behovet for risikoreduserende tiltak og skal derfor foreligge før man gjennomfører risikoanalysen. Akseptkriteriene skal så langt som mulig reflektere virksomhetens sikkerhetsmål og særegenhet.

De vurderinger som danner basis for utformingen av risikoakseptkriteriene skal dokumenteres. Det skal fastsettes klare rammer for bruk av risikoakseptkriterier. Data som legges til grunn for utarbeidelsen av kvantitative risikoakseptkriterier skal dokumenteres. Måten disse akseptkriteriene skal brukes på skal også spesifiseres, særlig med hensyn til usikkerheten som ligger i kvantitativt uttrykt risiko.

### **Risikoakseptkriterier for kvantitative analyser**

I tillegg til det som er nevnt i kapittel 2.1.2 inneholder NORSOK Z-013 et vedlegg som omhandler risikoakseptkriterier, der det blant beskrives risikoakseptkriterier for kvantitative analyser. Dette kapittelet består av utdrag fra nevnte vedlegg.

RAK for kvantitative analyser brukes vanligvis i forhold til TRA i konseptdesign, i prosjekteringsfasene og i driftsfasene. Bruken av RAK krever at det finnes relevante kvantifiserbare erfaringsdata som analysen kan ta utgangspunkt i.

Krav som settes i standarder, spesifikasjoner, prosedyrer, o.l. for å oppnå tilfredsstillende sikkerhetsnivå, skal ikke forstås som akseptkriterier for risiko. I en analysesammenheng vil slike krav inngå i risikoanalysen som krav som vil bidra til å oppnå et akseptabelt risikonivå.

Valg av akseptkriterier for risiko avhenger av hvilken problemstilling (fase/aktivitet/system) en står overfor, og hvilket behov en har for beslutningsstøtte. I tillegg må RAK tilpasses den risikoanalyse metodikk som til enhver tid blir brukt, samt være konsistente innenfor hvert enkelt selskap.

Disse forholdene kan illustreres med noen eksempler på risikoanalytiske problemstillinger for ulike nivåer/faser i petroleumsindustrien:

- En vil ha behov for en oversikt over det totale risikopotensialet i forbindelse med driften av en innretning. Akseptkriteriene knyttet til denne type analyse vil som oftest være kvantitative (for eksempel FAR-verdi) eller semi-kvantitative (for eksempel risikomatriser), da en har et vidt spekter av scenarioer å forholde seg til, og en ønsker å sammenfatte dette på en systematisk måte.
- For sammenlikning av to alternative feltutbyggingsløsninger trengs et overordnet risikomål for bl.a. risiko for personell. PLL kan i en del tilfeller være velegnet, da dette akseptkriteriet også kan benyttes dersom det er forskjellige bemanningsnivåer for de alternative løsningene for feltutbygging.
- Ved den kontinuerlige designutvikling i prosjektsammenheng tar en ofte beslutninger på grunnlag av sikkerhetsvurderinger eller risikoanalyser. Designendringer kan medføre endringer i risikobildet. RAKene bør formuleres slik at disse endringene kan måles. For eksempel hvis man bruker hovedsikkerhetsfunksjoner i akseptkriteriene vil en kunne måle hvordan frekvens for tap av disse varierer med endringer i design (for eksempel omplassering av utstyr).

### **Risikoakseptkriterier relatert til hovedsikkerhetsfunksjoner**

Siste eksempel ovenfor viser bruk av hovedsikringsfunksjoner i RAK, dette er en relevant metode i forhold til eksplosjoner. Beskrivelsen som følger er utdrag fra vedlegg til NORSOK Z-013.

For å etablere ulykkeslaster og sikre at plattformkonseptet ikke medfører en uakseptabel høy risiko, beregnes sannsynligheten for at definerte hovedsikkerhetsfunksjoner blir utilgjengelige, jfr. konseptrisikoanalyser.

Eksempel:

- Frekvensen  $1 \times 10^{-4}$  per år for hver ulykkeslast kan være en akseptabel verdi for utilgjengelighet av en hovedsikkerhetsfunksjon. Andre foretrekker en samlet frekvens for alle DULer (dimensjonerende ulykkeslaster). Et eksempel på det vil være en samlet frekvens på  $5 \times 10^{-4}$  per år for utilgjengelighet av en hovedsikkerhetsfunksjon.

Hovedsikkerhetsfunksjonene inklusiv den funksjonalitet de skal ha, defineres for hver enkelt innretning. Det eksponerte område er tradisjonelt et område adskilt med H-0 brannskiller fra andre områder. Der disse områdene kan ha meget stor fysisk utstrekning, kan det være aktuelt å benytte en finere oppdeling i områder (innenfor områder atskilt med H-0 beskyttelse), der utstrekning av de mindre områdene er basert på utstrekning av kritisk eksponering for ulykkeslaster. Dette innebærer at det eksponerte området kan variere avhengig av typen og omfanget av UH (Ulykkeshendelse).

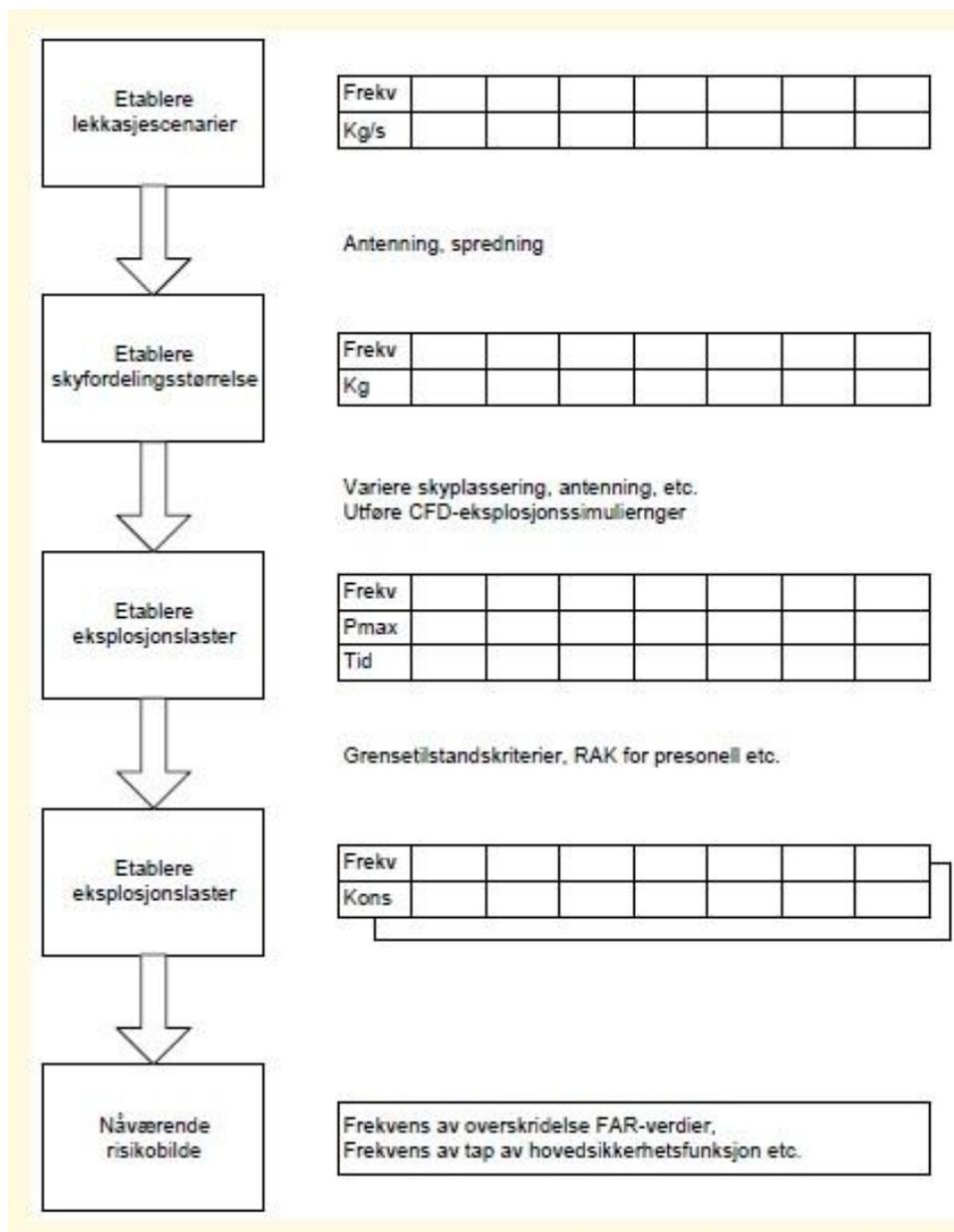
### **2.1.2 Prosedyre for simulering av sannsynlige eksplosjoner**

Vedlegg G til NORSOK Z-013 er en prosedyre for simulering av sannsynlige eksplosjoner. Figur 2.2 viser prosedyren for total beregning av eksplosjonsrisiko fra lekkasje til og med uakseptabel konstruksjonsrespons. Nedenfor følger utdrag (og figur 2.2) fra nevnte vedlegg.

Prosedyren er ment å benyttes til fullstendige analyser av plattformer i drift eller i de faser av prosjektering hvor det er tilgjengelig informasjon om alle vesentlige designelementer som påvirker risikobildet fra eksplosjoner. I tidlige faser av prosjekteringen må prosedyrene forenkles ut fra tilgjengelig designinformasjon. Mengden utstyr må estimeres ut fra tilsvarende områder i tidligere analyser. Følsomhetsanalyser skal brukes for å finne ut om mindre endringer i utstyrsmengde, trykkavlastningsområder eller ventilasjon vil endre gasseksplosjonslasten vesentlig.

Prosedyren følger hendelsesforløpet kronologisk, men inkluderer noen iterasjoner (gjentagelser). Uansett, for å få en riktig balanse mellom bruk av ressurser og korrekt fokusering på de relevante problemstillingene, er det nødvendig at en tenker på problemstillingen som helhet baklengs gjennom hendeskjeden når en planlegger arbeidet. Dette betyr at en må vurdere uønskede konsekvenser, definere hva som er uakseptabel respons, og derfra vurdere hvor mye lasten skal beskrives og etablere resten av metodikken styrt av dette.

Prosedyrene tar mål av seg til å estimere den mest sannsynlige eksplosjonslasten og ikke det verst tenkelige tilfelle, men på en slik måte at når der gjøres forenklinger i forhold til en tenkt ideell teoretisk modell, så skal det totale risikobildet, last eller respons, ikke være vesentlig for lav, men heller være på den konservative siden. Dette betyr ikke at hvert eneste ledd i prosedyren må være konservativt, men at man har rimelig kontroll over at sluttproduktet, dvs. last og respons, er konservativt.



**Figur 2.2 - Skjematisk framstilling av prosedyre for beregning av eksplosjonsrisiko**

### **2.1.2.1 Eksplosjon**

#### **Definisjon av last**

For å fastsette konstruksjonsrespons og sikkerhetsmargin for sikkerhetskritiske konstruksjonselementer på en installasjon skal det benyttes et tidsavhengig gasseksplosjonsovertrykk og dragkraft. Designverdier av last og konstruksjonsdesign skal etableres fra forholdet mellom trykk og impuls (P-I) av en estimert last, overtrykk/drag og frekvensen av last slik det gis i RAK.

Dermed vil ikke den dimensjonerende lasten bli en enkel trykkverdi, men en samling av trykk og impuls (tid) kombinasjoner med en gitt frekvens for overskridelse av både trykk og impuls. Dette fremkommer som snittet mellom trykk-impuls-flaten og akseptkriteriet for frekvens. Forholdet mellom maksimalt trykk og varighet kan brukes hvis simuleringer viser at dette er en god forenkling, men da må forholdet dokumenteres.

P-I-flaten skal beregnes for gjennomsnittlig trykk på er forhåndsbestemt areal.

I tilfeller der det er store variasjoner i overtrykk over et eksponert areal, skal det etableres et videre P-I-forhold for lokalt område med høyest lokalt overtrykk. Denne P-I-flaten skal i så fall gjelde alle andre lokalområder på arealet, med mindre dette ikke er realistisk (f.eks. hvis ekstremt høyt trykk i hjørnene blir gjeldene for hele arealet).

En draglast må vurderes for større rør og utstyr. Hvis ingen drag-impulsforhold etableres, skal drag beregnes fra spredningen av hastighetsfordelingen i CFD-beregninger for noen utvalgte dimensjoneringsscenarioer.

#### **Valg av simuleringsmodeller**

Prosedyren sier at ved valg av simuleringsmodell bør en velge en avansert CFD-modell som FALCS.

### **2.1.2.2 Beregning av respons:**

#### **Forholdet mellom responsanalyse og RAK**

Hvis RAK for eksplosjoner relaterer til frekvens for eksplosjonslast, er hensikten for responsanalysen å vise overensstemmelse mellom respons og krav til grensetilstand.

Hvis RAK for eksplosjoner relaterer til frekvens av lastrespons, er hensikten for responsanalysen å vise at frekvensen av overskridelse av kravene til grensetilstand er innenfor RAK.

## Grensetilstand

Konstruksjonsrespons skal klassifiseres i følge ALS (Accidental collapse Limit State) slik det er definert ovenfor (2.1.2.1 / NORSOK Z-013 G.6.1)

Blant andre skal følgende krav til styrke og funksjonalitet vurderes:

- Global konstruksjonskollaps
- Brudd på eller uakseptabel utbøyning av en eksplosjonsbarriere inklusiv uakseptabel skade på passiv brannbeskyttelse av barriere.
- Skade på utstyr og rør som forårsaker uakseptabel eskalering av hendelser (gjelder også for rør og kabler som gjennomtrenger barriere). Dette inkluderer skade på grunn av avbøyning/skade på bærende konstruksjoner
- Uakseptabel skade på sikkerhetskritisk utstyr som må virke etter eksplosjon

## 2.2 Eksplosjon

Eksplosjon er definert som en hendelse som leder til en rask trykkøkning.

Trykkøkningen kan være forårsaket av: kjernereaksjon, brist på beholdere med høyt trykk, høyeksplosiver, metall – vandamp eksplosjon, reaksjoner ute av kontroll, forbrenning av støv, tåke og gass (inkludert damp) i luft eller annen oksidant. [4].

Denne oppgaven vil fokusere på eksplosjoner forårsaket av forbrenning av gass i luft, da dette er det mest aktuelle scenarioet innen olje og gassnæringen. Blandingen av gass og luft, vil heretter bli kalt gassky. Denne type eksplosjon deles opp i to hovedkategorier: Deflagrasjon og detonasjon.

Deflagrasjon defineres som en forbrenning som propagerer med subsonisk hastighet relativt til den ubrente gasskyen umiddelbart framfor flammen. Hastigheten til gasskyen framfor flammen kommer av at forbrenningsproduktene ekspanderer. Ved en deflagrasjon er altså hastigheten flammen propagerer med inn i den ubrente delen av gasskyen, lavere enn lydens hastighet i gasskyen. Deflagrasjon kan gi flammehastighet relativt til en stasjonær observatør fra 1m/s – 1000m/s, og det korresponderende trykket kan bli mellom noen få millibar og flere bar.[4].

Detonasjon defineres som en forbrenning som propagerer med supersonisk hastighet relativt til den ubrente gasskyen umiddelbart framfor flammen. Ved detonasjon er altså hastigheten flammen propagerer med inn i den ubrente delen av gasskyen, over lydens hastighet i gasskyen. Ved detonasjon er det sjokk-kompresjon som varmer opp gasskyen og fører til forbrenning, detonasjonen kan altså beskrives som en sjokkbølge umiddelbart etterfulgt av flammen. Detonasjon av gasskyer kan gi detonasjonshastighet på opptil 2000m/s, og trykket kan bli opp mot 20bar.[4].

Ved eksplosjoner i gasskyer er deflagrasjon den vanligste måten for flammen å propagere på, detonasjon er også en mulighet, men den kan kun initieres på to måter. Deflagrasjonen kan gå over til å bli en detonasjon dersom den akselererer grunnet møte med hindringer og at gasskyen er helt/delvis innestengt (se mer i kapittel 3.2.2.1). Det andre alternativet for å få detonasjon, er at den igangsettes av en høyeksplosiv ladning.[4]. Oppgaven vil i hovedsak se på deflagrasjoner, og der det er snakk om detonasjoner vil dette bli nevnt.

Det kreves ikke nødvendigvis en svært kraftig eksplosjon for at det skal få katastrofale følger. En eksplosjon kan igangsette en kjede av hendelser som kan lede til en alvorlig ulykke / katastrofe. Ulykken på Piper Alpha plattformen i 1988 er et eksempel på dette. For denne ulykken ble overtrykket ved den initierende eksplosjonen beregnet til 0,3-0,4 bar, men den ledet til brann og nye eksplosjoner, plattformen gikk tapt og 167 mennesker mistet livet [5].

For å gi leseren noe å relatere overtrykksverdier til, vises sammenhengen mellom overtrykk og skader på bygninger i tabell 1.1 (Verdier hentet fra [6]).

**Tabell 2.1 - Skader fra overtrykk**

Skade	Overtrykk (barg)
Glassvinduer ødelegges	0,010 - 0,015
Mindre skader på enkelte bygninger	0,034 - 0,076
Metallpaneler bøyes	0,076 - 0,124
Svikt i vegger av betongblokker	0,124 - 0,200
Bygg med rammeverk av tre kollapser	over 0,345
Alvorlig skade på bygg med rammeverk av stål	0,276 - 0,483
Alvorlig skade på strukturer av armert betong	0,414 - 0,621
Sannsynlig total ødeleggelse av de fleste bygg	0,689 - 0,827

## 3. Inndata

Kapittel 3 vil se på hvilke faktorer som påvirker eksplosjonsberegningene. Forhold og egenskaper knyttet til inndataene vil også bli beskrevet, dette for å gi leseren en bedre forståelse av betydningen til de ulike inndata.

### 3.1 Hydrokarboner

Innen olje- og gassvirksomhet er det en rekke ulike hydrokarboner som går i gjennom installasjonene. De ulike hydrokarbonene har ulike egenskaper som spiller en viktig rolle dersom en skal gjøre eksplosjonsberegninger. Dette kapitlet (3.1) vil se nærmere på disse egenskapene og deres betydning ved eksplosjonsberegninger.

Innenfor eksplosjonstemaet i olje- og gassvirksomhet er det aktuelt å se på gasskyer av gass-luft blandinger. Eksplosjonsfarlige gasskyer kan skapes med andre oksidasjonsmidler enn luft, men oppgaven vil fokusere på gass-luft blandinger.

#### 3.1.1 Type hydrokarbon

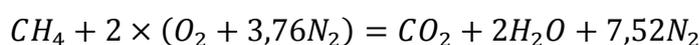
Type hydrokarbon i gasskyen vil påvirke mange faktorer i eksplosjonsberegningen, da ulike typer har forskjellige egenskaper. En gassky består ikke nødvendigvis av bare en type hydrokarbon men kan være en blanding av flere. Egenskapene som endres ut i fra type hydrokarbon er beskrevet nedenfor.

##### 3.1.1.1 Støkiometrisk blanding

Definisjon for støkiometrisk blanding: Blandingen der mengden brennstoff og oksygen (luft) er i balanse, slik at det ikke er noe resterende brennstoff eller oksygen etter den kjemiske reaksjonen er fullført [4].

Den støkiometriske blandingen ( gjerne målt i volumprosent - Vol%) varierer for ulike gasstyper. Lette gasser (lav molekylvekt) har generelt en høyere Vol% for støkiometrisk blanding enn tyngre gasser [7].

Eksempel på utregning av støkiometrisk blanding (Metan - CH<sub>4</sub>):



Slik ligningen er satt opp er det ikke resterende brennstoff eller oksygen når den kjemiske reaksjonen er fullført. 3,76 er forholdstallet mellom oksygen og nitrogen i luften.

$$C_{st} = \frac{CH_4}{CH_4 + 2(O_2 + 3,76N_2)} = \frac{n_{fuel}}{n_{total}} = \frac{1}{10,52} \approx 0,095$$

Den støkiometriske blandingen er antall mol brennstoff delt på antall mol totalt.

$$C_{st} \approx 9,5Vol\%$$

Rent teoretisk vil maksimal varmeproduksjon inntreffe ved støkiometrisk konsentrasjon [7]. For gasskyer med én type brennstoff kan en forvente størst eksplosjonstrykk når gasskonsentrasjonen er ved eller litt i overkant av støkiometrisk blanding [4].

Når eksplosjonstrykk skal beregnes vil støkiometrisk blanding for den aktuelle gasskyen være en interessant parameter, da det er den delen av gasskyen som er i området rundt støkiometriske blandingen som skaper høyest trykk.

### **3.1.1.2 Flashpoint**

Flashpoint for et brennstoff i væskeform er den minste temperaturen som skaper nok avdampning til at det dannes en brennbar gassky [4].

Det er spesielt interessant å ha kjennskap til flashpoint dersom det er fare for at brennstoff kan leke ut i væskeform.

### **3.1.1.3 AIT**

AIT (minimum autoignition temperature) angir ved hvilken temperatur en gassky vil selvantenne. Se kapittel 3.6.1.2 for nærmere forklaring.

### **3.1.1.4 MIE**

MIE (minimum ignition energy) angir minste mengde energi en elektrisk gnist eller lysbue må inneholde for å antenne en gassky. Forskjeller i gassers diffusitet gjør at MIE befinner seg ved ulik gasskonsentrasjon for forskjellige typer gass, der økt molekylvekt er lik økt gasskonsentrasjon for MIE [8]. MIE er også temperaturavhengig, der MIE halveres for hver 100 °C temperaturen øker med [8]. Se kapittel 3.6.1.1 for mer om MIE.

### **3.1.1.5 Reaktivitet**

Noen gasstyper er mer reaktive enn andre og vil derfor ha et større potensial til å skape trykkoppbygning ved en eksplosjon.

## **3.1.2 Gasskonsentrasjon**

Gasskonsentrasjonen vil påvirke hvordan gasskyen brenner, og om den i det hele tatt er brennbar. Støkiometrisk er den optimale blandingen for en gassky, men gasskyen har et brennbarhetsområde som for Vol% både over og under støkiometrisk. Dette brennbarhetsområdet går fra nedre til øvre brennbarhetsgrense.

Brennbarhetsgrensene er avhengige av temperatur og trykk [4]. For situasjoner med økt trykk vil generelt nedre brennbarhetsgrense synke litt, og øvre brennbarhetsgrense øker mye [8].

Når gasskonsentrasjonen er i nærheten av øvre eller nedre brennbarhetsgrense vil forbrenningshastigheten (burning rate) bli veldig lav, og for å oppnå høyt trykk må gasskyen være innestengt [4].

For å unngå missforståelser nevnes det at brennbarhetsgrense og eksplosjonsgrense bare er to forskjellige benevnelser for samme grenseverdi (altså er LFL = LEL og UFL = UEL). Oppgaven vil bruke benevnelsen brennbarhetsgrense.

### **3.1.2.1 Brennbarhetsgrenser**

Når gasskyen er innenfor brennbarhetsgrensene vil flamme propagere gjennom blandingen forbi området som er direkte påvirket av en tennkilde [7].

#### **Nedre brennbarhetsgrense**

Nedre brennbarhetsgrense, forkortet LFL (lower flammability limit). LFL angir laveste brennbare Vol% for gasskyen. Gasskonsentrasjoner under LFL inneholder for lite brennstoff til at blandingen kan brenne selvstendig.

#### **Øvre brennbarhetsgrense**

Øvre brennbarhetsgrense, forkortet UFL (upper flammability limit). UFL angir øvre brennbare Vol% for gasskyen. Gasskonsentrasjoner over UFL inneholder for lite oksygen til at blandingen kan brenne selvstendig.

## **3.2 Geometri**

Geometriske forhold er av stor betydning for hvilket trykk som forekommer ved en eksplosjon i en gassky. Selve utformingen av området eksplosjonen inntreffer i, og hindringer som befinner seg der vil påvirke trykkoppbyggingen. Dette kapitlet (3.2) vil se nærmere på hvilke faktorer som påvirker trykkoppbyggingen og hvordan disse henger sammen med geometriske forhold.

### **3.2.1 Forbrenning og strømning**

Betydningen av de geometriske forholdene ved en eksplosjon henger tett sammen med forhold rundt forbrenning, flammehastighet og strømning. Disse forholdene er ikke inndata for eksplosjonsberegninger, men de beskrives kort her for å forklare hvorfor de geometriske forholdene har stor betydning.

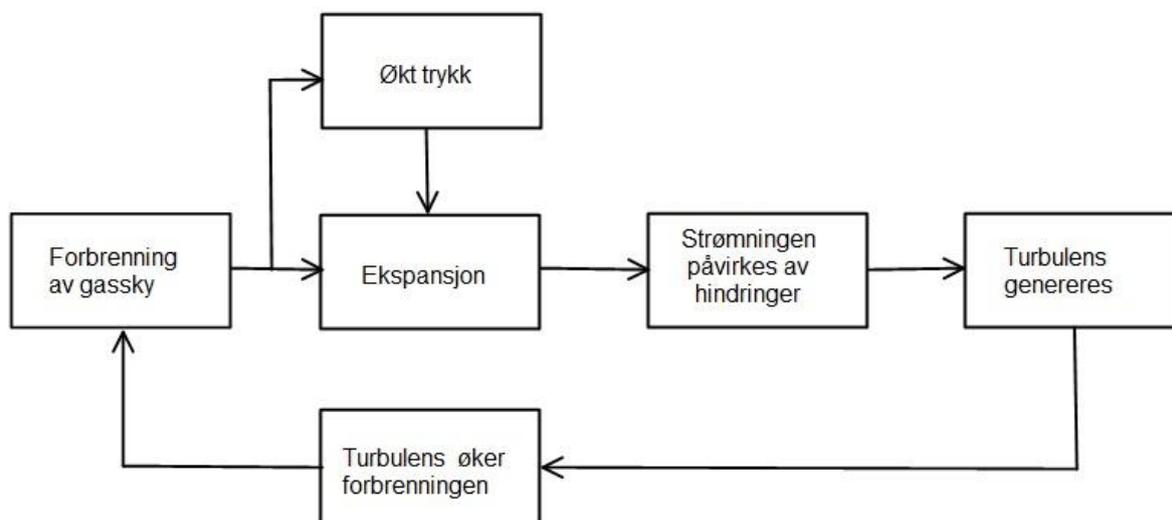
#### **Flammehastighet**

Flammehastigheten er definert som hastigheten til flammen i forhold til en stasjonær observatør [4]. Flammehastigheten er av stor betydning for trykkoppbyggingen. Ved laminær strømning vil ikke flammehastigheten bli høy og trykkoppbyggingen vil være moderat. Det er derimot vanlig for eksplosjonsulykker at den laminære flammen går over til å bli turbulent, siden strømningen foran flammefronten blir turbulent som en følge av at den treffer hindringer (utstyr, rør, strukturer osv.)[4].

## Turbulens

Når gasskyen brenner vil den ekspandere opptil 8-9 ganger (se figur 2.2) det opprinnelige volumet. Denne ekspansjonen skyver den ubrente delen av gasskyen foran seg og en turbulent strømning kan oppstå. Når flammen propagerer inn i den turbulente strømningen vil forbrenningshastigheten øke dramatisk, som igjen fører til økt strømningshastighet og turbulens foran flammen. [4].

Når gasskyen er i et delvis innestengt område med hindringer kan flammehastigheten akselerere til flere hundre meter per sekund [4]. Figur 3.1 er en gjengivelse av fig. 5.9 i Gas Explosion Handbook, den illustrerer hvordan flammehastigheten akselererer grunnet turbulens.



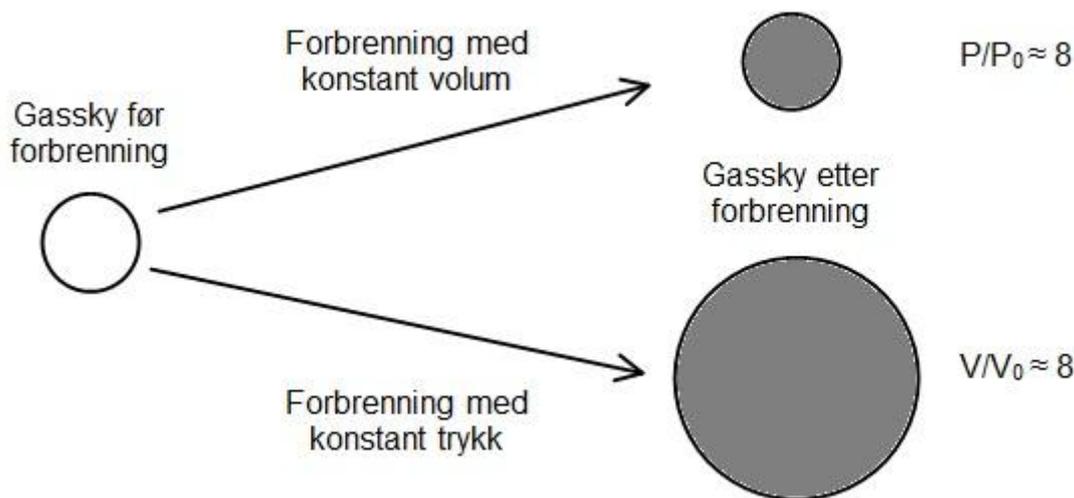
Figur 3.1 - Økt flammehastighet grunnet turbulens

## 3.2.2 Geometriske forhold

### 3.2.2.1 Området rundt gasskyen

Inndataene er selve oppbygningen av det som omgir gasskyen, for eksempel gulv, tak og vegger i en offshore modul. Ventilasjonsåpninger er en viktig del, da trykkoppbygningen i en gasseksplasjon blir styrt av balansen mellom trykkgenerasjon fra flammen og trykkavlastning gjennom ventilasjon [4].

Dersom området rundt eksplosjonen legger begrensninger på hvordan eksplosjonen får utvide seg vil dette skape trykkøkning. Området rundt vil være en viktig parameter når en skal gjøre eksplosjonsberegninger, fordi det i stor grad kan påvirke hvilket trykk eksplosjonen resulterer i. Figur 3.2 illustrerer hvordan området rundt kan påvirke eksplosjonstrykket, legg merke til at den viser for de mest ekstreme tilfellene; helt innestengt og helt åpent. Figur 3.2 er en gjengivelse av figur 4.8 i Gas Explosion Handbook.



**Figur 3.2 - Forbrenning med konstant volum eller trykk**

### **Innestengt eksplosjon**

Med innestengt eksplosjon menes det en eksplosjon som skjer inne i en tank, prosessutstyr, rør, lukkede rom eller i underjordiske installasjoner [4]. Typisk for innestengte eksplosjoner er at forbrenningshastigheten ikke trenger å være høy for at det skal produseres betydelig trykk [4]. Figur 3.2 viser at ved en innestengt eksplosjon vil trykket bli omtrent 8 ganger høyere enn det opprinnelige trykket. Dette varierer ut i fra gasstype og det er heller ikke tatt hensyn til andre faktorer som ytterligere kan øke trykket.

### **Delvis innestengt eksplosjon**

Dersom en eksplosjon forekommer inne i en bygning med åpninger eller eksplosjonspaneler som åpnes ved lavt trykk, kan vi kalle det en delvis innestengt eksplosjon [4]. Eksplosjonstrykket vil da avlastes gjennom de åpningene som finnes i bygget og trykkoppbygningen vil dermed bli lavere enn for et helt lukket bygg der konfigurasjonen ellers er like.

### **Eksplosjon i det fri**

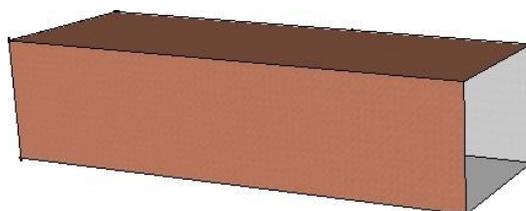
Dersom hele gasskyen som antennes er i det fri, dvs. ingen del av gasskyen er delvis innesperret, kan en si at det er en eksplosjon i det fri. Dette scenarionet er lite aktuelt, da det ikke sammenfaller med områder en typisk ønsker å gjøre eksplosjonsberegninger for.

Tester i stor skala har vist at gasskyer i det fri, som antennes av en svak tennekilde og som ikke møter hindringer, vil skape lite overtrykk når den brenner (flash fire). Derimot om en gassky i det fri detonerer, vil dette skape svært høyt overtrykk. [4]

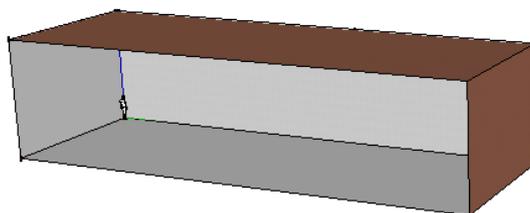
For områder det er aktuelt å gjøre eksplosjonsberegninger for, vil det typisk være steder der deler av gasskyen kan bli delvis innesperret, eller møter hindringer, og det er på disse plassene trykket vil genereres [4].

### Ventilasjonsåpninger

Som nevnt i innledningen, avlastes trykkoppbyggingen fra en eksplosjon gjennom ventilasjonsåpninger. Ved å ventilere ut forbrenningsprodukter (den delen av gasskyen som har forbrent) kan flammeakselerasjon til en viss grad unngås, og strømmingen og turbulensen i den ubrente delen av gasskyen reduseres. Ventilering av forbrenningsprodukter er en veldig effektiv måte å minimere akselerasjonen som oppstår grunnet gjentatte hindringer (se fig 3.1). Ventilering av den ubrente delen av gasskyen kan også bidra til lavere trykkoppbygging, spesielt dersom ventileringen fører strømmingen vekk fra hindringer. Dersom ventileringen derimot fører strømmingen forbi hindringer, vil det meste sannsynlig oppstå flammeakselerasjon. [4]. Ventileringen er altså mest effektiv om det er forbrenningsprodukter som ventileres, og derfor vil det være hensiktsmessig at ventilasjonsåpninger er i nærheten av der antenning mest sannsynlig vil inntreffe.



**Figur 3.3 - Åpning i kortsida**



**Figur 3.4 - Åpning i langside**

Åpen langside er mer gunstig enn åpen kortsida i en modul, da en ved åpen langside vil for de fleste tilfeller redusere avstanden mellom antenningpunkt og ventilasjonsåpning. Dette reduserer flammens mulighet til trykkoppbygning. (Fig 3.3 og 3.4 er inspirert av figur i [5].)

Ventilasjonsåpninger trenger ikke nødvendigvis å være permanente åpninger i konstruksjonen, men kan være paneler som åpner seg dersom de blir utsatt for overtrykk. Men en slik løsning ivaretas arbeidsmiljøet, samtidig som ventilasjonsåpninger blir tilgjengelig ved en eksplosjon.

I noen tilfeller kan en ventilasjonsåpning føre til at eksplosjonstrykket blir større enn dersom åpningen ikke hadde vært tilstede (forutsetter flere ventilasjonsåpninger). Dette kan inntreffe når det ikke er god nok klaring på utsiden av ventilasjonsåpningen. Forklaringen er at dersom det ikke hadde vært noen ventilasjonsåpning der, ville ikke strømmingen ha gått i den retningen, men ha beveget seg mot andre ventilasjonsåpninger.

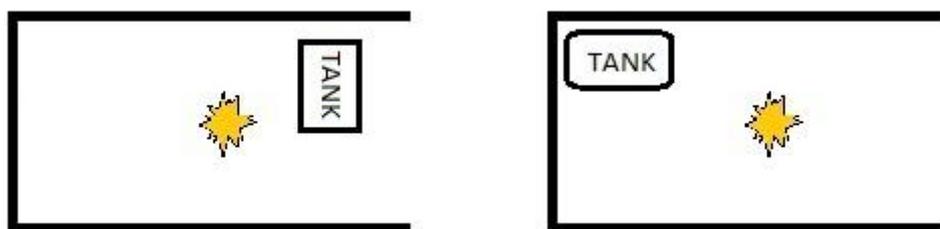
### Oppsummering

Området rundt gasskyen har stor betydning for eksplosjonstrykket og det er derfor viktig å ta hensyn til dette i eksplosjonsberegninger. Overtrykket blir typisk høyest når eksplosjonen er helt innestengt, lavere ved delvis innestengt, og lite ved eksplosjon i det fri. Trykkoppbygningen blir styrt av balansen mellom trykkgenerasjon fra flammen og trykkavlastning gjennom ventilasjon.

### 3.2.2.2 Hindringer

Hindringer som befinner seg i selve gasskyen, eller i området som gasskyen etter antenning ekspanderer til, vil bidra til å skape turbulent strømning (se figur 3.1). Dette vil i stor grad påvirke flammehastigheten, og derfor har hindringer en stor betydning for trykkoppbygningen.

Hindringer vil være alt som står i veien for den naturlige strømmingen til den antente gasskyen. Det er typisk snakk om prosessutstyr, rør og annet som måtte finnes seg i området.



**Figur 3.5 - Plassering av hindringer**

Figur 3.5 viser to ulike oppsett i en modul sett ovenfra. Modulen til høyre er gunstigst i forhold til å oppnå minst overtrykk ved en eksplosjon. Følgende anbefalinger (hentet fra [5]) er brukt for å redusere muligheten for trykkoppbygning i modulen til høyre:

- Utstyr plasseres slik at det ikke er mellom antenningspunktet og ventilasjonsåpningen.
- Stort utstyr plasseres lengst mulig unna ventilasjonsåpningen.
- Langsiden av utstyr bør være parallelt med ventilasjonsretningen.
- Avrundete kanter er bedre enn skarpe.

## 3.3 Lekkasje

### 3.3.1 Lekkasje punkter

Lekkasje punkter innenfor gjeldene område må identifiseres. Noen eksempler på lekkasje punkter som kan finnes offshore: flenser, instrumenter, rør, ventiler, pumper, tanker, varmeutvekslere, forgreninger og kompressorer.

### 3.3.1 Lekkasje frekvens for lekkasje punkter

Hvor ofte kan en forvente lekkasje i de ulike komponentene (lekkasje punktene). Det må også tas med tilfeller der menneskelig interaksjon kan føre til lekkasje.

### 3.3.2 Lekkasje rate, varighet og mengde

Lekkasje raten angir hvor mye brennstoff som per tidsenhet lekker ut til omgivelsene. Det er mange faktorer som er med på å avgjøre lekkasje raten, blant annet trykk og temperatur inne i beholderen, størrelsen på hullet, gassens fysiske egenskaper, volum og geometri på beholderen og om gassen kondenserer [8]. Lekkasje raten fra et hull i en beholder vil bli større dersom trykket i beholderen øker, tilsvarende vil det være dersom størrelsen på hullet økes. Gasslekkasjer er oftest sonisk (gassens utgangshastighet fra hullet er lydets hastighet i gassen som lekker), subsonisk lekkasje skjer kun for veldig lavt trykk [8]. Ofte er lekkasje raten tidsavhengig og vil synke etter hvert som trykket i beholderen minker (for eksempel ved lekkasje fra en gasstank, eller fra et rør der tilførselen har blitt stengt).

I risikoanalyser brukes ulykkesstatistikk for å estimere størrelse på hullet. For å illustrere at ulike komponenter gir ulike hullstørrelser, angis noen typiske verdier for hullstørrelse: [8]

- Ventiler, flenser og instrumentkoblinger:  $A < 2\text{-}3\text{cm}^2$
- Sprekker i tank/holder:  $A = 10\text{-}100\text{cm}^2$
- Sprekker i rør:  $A = 0,475Rt$  (eksempel  $R=0,15\text{m}$ ,  $t=0,01\text{m}$ :  $A=7,125\text{cm}^2$ )

Dersom lekkasje raten og varigheten (tiden fram til tidspunktet en ønsker å gjøre eksplosjonsberegningen for, ikke nødvendigvis tiden til lekkasjen har stoppet) er kjent, er også total masse brennstoff som er lekket ut kjent. Dette vil være viktig data når størrelsen på gasskyen skal beregnes.

Størrelsen på gasskyen er av betydning i forholdt til hvilket trykk en kan forvente, der store gasskyer naturlig nok inneholder mer brennstoff enn små skyer, og dermed har de potensial til å skape en større eksplosjon. I forhold til flammeakselerasjon vil en større sky gi flammen lengre vei å akselerere på, samt økt mulighet for turbulens, og dermed kan en forvente høyere flammehastigheter.

## **3.4 Vind og ventilasjon**

### **3.4.1 Vindretning og styrke**

Vinden vil ha betydning for dannelsen av gasskyer ved en lekkasje. I områder med åpninger kan naturlig ventilasjon raskt tynne ut gasskyen, eller i beste fall lede den helt vekk fra potensielle tennkilder. For væskelekkasjer er ikke nødvendigvis vind en ønskelig faktor, da vinden kan bidra til væsken raskere går over i gassform.

Utdrag fra NORSOK Standard Z-013N, vedlegg G:

*Det skal i utgangspunktet tas hensyn til minst åtte vindretninger med en frekvens og hastighetsfordeling bestemt fra vindrosa i området. Ofte kan disse grupperes i et fåtall (2-4) ulike ventilasjonsregimer. CFD-ventilasjonsmodeller kan brukes for å finne disse.*

Ved lave vindhastigheter er det viktig å ta hensyn til at andre faktorer kan bli dominerende.

### **3.4.2 Ventilasjon**

Det skiller mellom mekanisk og naturlig ventilasjon. For områder med naturlig ventilasjon vil en se på ventilasjonsåpningene i sammenheng med vindretning og styrke. For områder med mekanisk ventilasjon vil en se på plassering av ventilasjonsåpningene (inn og ut), samt ventilasjonskapasiteten.

## **3.5 Spredning**

Før eksplosjonsberegninger for gasskyer kan gjennomføres, må det gjennomføres bergegninger av spredningen. Dette kan gjøres ved hjelp av CFD. Beregning av spredning kan være komplisert, siden spredningen kan påvirkes av mange faktorer. Dette kapittelet vil se på noen av faktorene som påvirker spredningen og hva en ønsker å få ut av spredningsberegninger.

Spredningen ut fra lekkasjepunktet vil avhenge av om det som lekker er gass, væske, eller begge deler, og der det som lekker også kan endre fase (fasetransisjon).

En gasslekkasje (gas jet) vil ha stor drivkraft, og den vil dra med seg luft, det kan da oppstå resirkulasjonssoner som rask blander sammen gass og luft [4]. Vegger, tak og hindringer vil spille inn på hvordan gassen blander seg med luften. Når lekkasjen er kraftig, vil strømmingene blir drevet av kraften fra lekkasjen (lekkasjedrevet strømming).

En væskelekkasje vil danne en pøl, og det er avdampningen fra denne som danner gasskyen. Avdampningen fra pølen påvirkes av varmeoverføringen til pølen: Stråling,

varme fra vind, varme fra underlag og fordampningsvarme. Ved denne typen lekkasje vil spredningen bli kontrollert av vind og oppdrift, og strømningshastigheten vil være mye lavere enn for en gasslekkasje (gas jet) [4]. Dersom væskelekkasjen har høyt trykk vil det dannes aerosol [8].

Ventilasjonens (naturlig og mekanisk) retning og styrke vil spille inn på hvordan lekkasjen sprer seg. Det samme gjelder for gassens oppdrift (gass lettere eller tyngre enn luft).

Gjennom spredningsberegninger kan en finne ut en rekke parametere som er av betydning for eksplosjonsberegningene. Disse parameterne og deres innvirkning vil bli kort beskrevet nedenfor.

Total masse som er lekket ut (se kapittel 3.3.2). Videre er det interessant å vite massen på den delen av gasskyen som er innenfor brennbarhetsgrensene, da alt innenfor brennbarhetsgrensene vil bidra til å skape trykk. Mest interessant er det å vite massen på delen av gasskyen som er nært støkiometrisk blanding, da det er rundt dette blandingsforholdet det skapes mest trykk ved en eksplosjon.

For væskelekkasjer er det i forhold til eksplosjonsfaren, interessant å vite hvor mye som har fordampet og hvor fort fordampingen skjer. Denne informasjonen kombinert med informasjon om oppdrift og vind/ventilasjon vil gi grunnlag for å kunne beregne størrelsen på gasskyen.

### **3.6 Antenning**

Definisjon av antenning: Forbrenningsreaksjon i gassfase, assosiert med generering av varme og utslipp av lys, typisk assosiert med hurtig oksidering av brennbart stoff [8]. Antenning av en gassky krever (at det tilføres) en viss mengde energi. Denne energien kan være i form av elektrisitet, varme eller en kjemisk reaksjon. Tabell 3.1 viser et eksempel på hvilken energi eller varme som må tilføres for å antenne ulike gasser (verdier hentet fra [7]). Dette kapitlet (3.6) tar for seg de viktigste momentene rundt antenning.

**Tabell 3.1 - Eksempel på MIE og AIT**

Gass	MIE (mJ)	AIT (°C)
Metan	0,3	630
Etan	0,26	515
Propan	0,26	450

### 3.6.1 Tennkildens styrke

Tennkildens styrke kan påvirke eksplosjonens utvikling, der en kraftig tennkilde kan lede til en kraftigere eksplosjon. Det vanligste er antenning fra en svak tennkilde, som en varm overflate eller en gnist.[4].

I tilfeller der en stikkflamme (jet flame) er tennkilden, kan det resultere i en veldig kraftig eksplosjon, anhengig av hastigheten på stikkflammen [4]. Dette kan skje i tilfeller der gass blir antent inne i for eksempel et rør eller et annet delvis innestengt område og kommer ut som en stikkflamme.

#### 3.6.1.1 Elektrisk antenning

Hvor mye energi en elektrisk gnist eller lysbue må inneholde for å antenne en gassky avhenger av gasstype, gasskonsentrasjon, temperatur og trykk.

Minimum antennelsesenergi, forkortet MIE (Minimum Ignition Energy), ligger for de fleste brennbare gasser i området 0,1-0,3mJ ved normalt trykk og temperatur (25 °C og 1atm)[7]. MIE inntreffer for de fleste hydrokarboner ved høy gasskonsentrasjon, dvs. over den støkiometriske konsentrasjonen [7].

Som et sammenligningsgrunnlag nevnes det at et menneske kan produsere en statisk ladning på 15mJ, noe som er langt over MIE for de fleste gassblandinger [7].

Områder der det kan forekomme gass vil normalt være områdeklassifisert, noe som innebærer krav til at elektrisk utstyr som benyttes eller er installert der, ikke skal kunne forårsake antenning enten fra elektrisk utladning eller varm overflate. Dersom det skulle oppstå feil på dette utstyret kan det allikevel forårsake antenning.[9]. Et interessant spørsmål innenfor antenning fra feil på elektrisk utstyr, er hvorvidt et utløst delugeanlegg kan forårsake kortslutninger i elektrisk utstyr og dermed skaper flere potensielle tennkilder i et område der gass/brann allerede er detektert.

#### 3.6.1.2 Termisk antenning

##### Selvantenning

Gasskyer kan selvantenne dersom temperaturen blir tilstrekkelig høy, ulike gasser har ulike temperaturer for selvantenning, forkortet betegnelse for dette er AIT (minimum autoignition temperature). For at gasskyen skal selvantenne kreves det at deler av selve gasskyen når AIT, dette vil si at gasskyen kan være i kontakt med en overflate med temperatur over AIT uten å antenne, dette skyldes konveksjon.

##### Konveksjon

Gitt at en varm overflate plassert inne i en gassky, har temperatur lik AIT for gasskyen og størrelsen er liten i forhold til gasskyen. Da vil konveksjon lede gassen som blir oppvarmet vekk (stiger oppover p.g.a. mindre tetthet) fra den varme

overflaten før gassen når AIT. Dersom den oppvarmede gassen derimot ikke kan stige vekk, men i stede samles opp rundt den varme overflaten, vil gassen til slutt nå AIT og selvantenne. For varme overflater som er isolert eller støvete kan AIT bli redusert med så mye som 100-200 °C [9].

### Overflater med temperatur høyt over AIT

Dersom overflater med temperatur høyt over AIT kommer i kontakt med gasskyen, vil de kunne varme opp gassen til AIT raskere en konveksjon leder gassen bort.

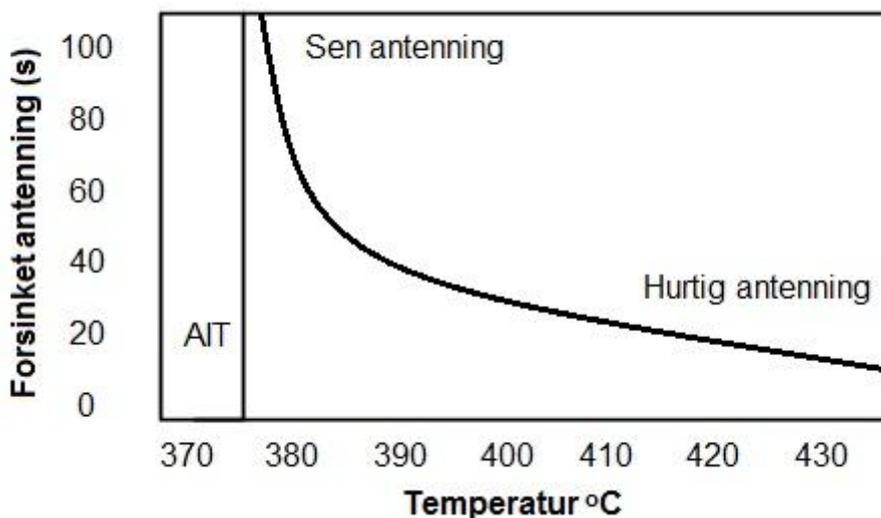
Størrelse og temperatur på overflaten vil være avgjørende for om gasskyen antenner. Tabell 3.2 illustrerer hvordan overflatens temperatur og størrelse påvirker antennelse av ulike gasskyer, data er hentet fra [7].

**Tabell 3.2 - Antennelsestemperatur i luft ved 1 atm**

Gass	Antennelsestemperatur °C		
	AIT	Oppvarmet Inconelwire (1cm diameter)	Oppvarmet Nichromwire (0,1cm diameter)
Metan	630	Ingen data	1220
Propan	450	Ingen data	1050
n-Hexane	225	670	900
n-Octane	220	660	860

AIT minker dersom trykket økes, men reduksjonen er som oftest liten for moderate trykkøkninger [8].

Figur 3.3 illustrerer hvordan tid til antenning avhenger av temperaturen på den varme overflaten. I figuren er AIT på ca 375 °C, og en ser at dersom temperaturen er på AIT vil det ta lang tid før antenning inntreffer. Figuren tar ikke hensyn til dimensjon på gassky og varm overflate, den illustrer bare hvordan temperaturen påvirker tid til antenning. (Figuren er inspirert av figur i [8]).



Figur 3.3 - Temperaturens påvirkning av tid til antenning

### 3.6.1.3 Kjemisk antenning

I spesielle tilfeller kan varmeutviklingen i en kjemisk reaksjon alene føre til selvantennelse [7]. Det er flere typer reaksjoner som kan føre til kjemisk antenning, men oppgaven vil ikke gå nærmere inn på dette området.

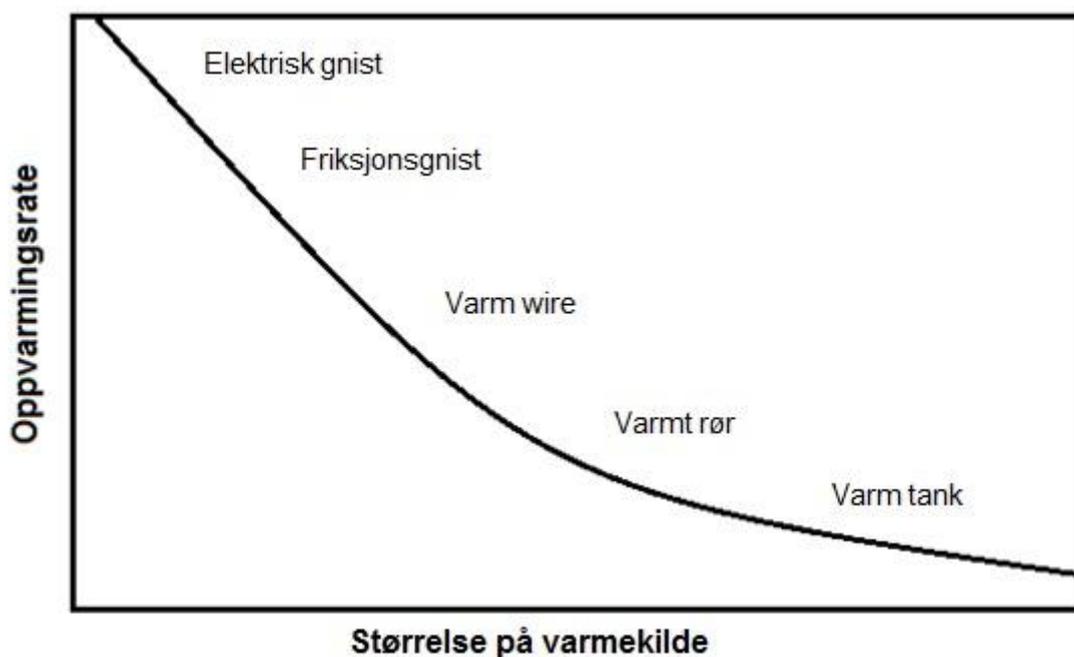
### 3.6.2 Eksempler på tennkilder

Listen er hentet fra [9].

- Flammer, direkte varme og varme overflater
- Roterende maskineri
- Forbrenningsmotorer
- Feil på elektrisk utstyr
- Mekaniske gnister
- Statisk elektrisitet
- Varmt arbeid ved vedlikehold
- Kjemisk energi

Antenning forårsaket av en varm overflate er alltid en funksjon av varmekildens dimensjon (størrelse). Små dimensjoner (for eksempel wire eller stang) har normalt mye høyere temperatur enn AIT.[8]. Figur 3.4 viser at små tennkilder må ha en høy oppvarmingsrate (inneholde mye energi), mens større tennkilder kan ha lavere oppvarmingsrate. Dette henger sammen med kravet for å få antenning: Et tilstrekkelig stort volum med gass må varmes til en tilstrekkelig høy temperatur, slik at flammen kan selvpropagere gjennom gassen, uten å slukke [8]. For små tennkilder er

det altså energien som er interessant (i forhold til MIE), og for store tennkilder er det temperaturen (i forhold til AIT).



Figur 3.4 - Antenningskarakteristikk for tennkilder

### 3.6.3 Tennkildens plassering

Tennkildens plassering vil ha betydning for eksplosjonstrykket. Forhold som spiller inn på eksplosjonstrykket er avstand mellom tennkilde og ventilasjonsåpning, hvor i gasskyen det antennes, og plassering i forhold til hindringer.

Generelt vil det bli lavest trykk dersom tennkildens plassering er nært ventilasjonsåpning, eller i utkanten av gasskyen, det finnes unntak fra dette [4].



Figur 3.5 - Plassering av tennkilde

Figur 3.5 (inspirert av [5]) viser en modul sett ovenfra, med to ulike plasseringer for tennkilden. Konfigurasjonen med tennkilden nært ventilasjonsåpningen vil være mest gunstig i forhold til å oppnå lavest overtrykk.

### **3.6.4 Tid til antenning**

Tid til antenning vil være tiden fra utslippet starter og fram til gasskyen antenner. Gasskyen kan komme i kontakt med aktive tennkilder uten å antenne dersom den er utenfor brennbarhetsgrensene (se kapittel 3.1.2.1). Både kontinuerlige og diskontinuerlige tennkilder må tas hensyn til.

Dersom en lekkasje antennes umiddelbart vil det resultere i en brann, og dersom lekkasjen har høyt trykk vil det bli en jetbrann.

#### **3.6.4.1 Kontinuerlige tennkilder**

Tennkilder som til en hver tid er aktive, og som ved kontakt med gasskyen vil gi antenning. Tid til antenning vil da være lik tiden mellom utslippet starter og til gasskyen når tennkilden, forutsatt at gasskyen er innenfor brennbarhetsgrensene.

#### **3.6.4.2 Diskontinuerlige tennkilder**

Tennkilder som ikke er aktive til en hver tid. Disse vil komplisere beregningen av tid til antenning, da gasskyen kan være i kontakt med tennkilden på et tidspunkt den ikke er aktiv. For disse vil det være interessant å vite hvor ofte tennkilden er aktiv innen at gitt tidsintervall. Ut i fra det kan en finne en betinget sannsynlighet for antenning gitt at gasskyen eksponeres for tennkilden når den er innenfor brennbarhetsgrensene [3].

## **3.7 Barrierer**

Definisjon fra Petroleumstilsynet (Ptil): En barriere defineres som tekniske, operasjonelle og organisatoriske tiltak som hver for seg, eller i samspill, skal hindre eller bryte spesifiserte uønskede hendelsesforløp. Barrierer kan være både sannsynlighetsreduserende og konsekvensreduserende.

Ved eksplosjonsberegninger må det tas hensyn til barrierer som er aktive, eller som blir aktivert ved gassdeteksjon eller på annen måte. Disse barrierene kan påvirke variablene i beregningene på ulike måter. Det kan for eksempel være en ventil som automatisk stenger gasstilførsel ved gassdeteksjon, eller et delugeanlegg som aktiveres. Eksplosjoner produserer overtrykk og eksplosjonsvind med kort varighet (typisk under ett sekund), derfor er det sjeldent at disse kan kontrolleres av barrierer aktivert etter antenning [8].

### **Nedstenging**

Ved gassdeteksjon vil det iverksettes nedstenging. Dette innebærer at elektrisitet kuttes og ventiler stenger tilførselen av gass til området, eventuelt sender det som er i området til fakkell. Når elektrisiteten kuttes vil mange av de potensielle tennkildene i området forsvinne. Gjenværende tennkilder vil da være det som eventuelt finnes av

varme overflater på prosessutstyr og lignende. Selv om gasstilførselen kuttet ved en nedstengning vil det fortsatt være gass i rør og utstyr, en lekkasje kan da bare vare så lenge det er gjenværende trykk i de segmentene som befinner seg innenfor avstengningsområdet.

### **Delugeanlegg**

Delugeanlegg er lignende de sprinkleranlegg som finnes i vanlige bygg, men forskjellen er at sprinklerhodene er helt åpne, derfor må rørnettet til et delugeanlegg være tørt i normaltilstand. Anlegget kobles til brann- og/eller gassdetektorer, og når anlegget utløses vil vann strømme inn i rørnettet og alle sprinklerhodene sprayer ut vann (i motsetning til et vanlig sprinkleranlegg der hvert enkelt sprinklerhode må utsettes for en gitt temperatur før det utløser).

Forsøk har vist at i noen tilfeller kan delugeanlegg føre til kraftigere eksplosjoner. Dette har vært tilfelle for tester utført i medium skala. For stor skala viser testene at deluge gir en betydelig reduksjon i overtrykket.[8].

NORSOK Z-013, vedlegg G sier følgende om effekten av deluge:

Deluge reduserer høyt overtrykk i overfylte områder, men har ingen slik effekt på scenarioer med lavt trykk. Siden det er nødvendig å etablere deluge før antenning, vil deluge bare være effektiv ved sen antenning (typisk 20 s eller senere).

Sannsynligheten for antenning vil vanligvis ikke øke når en bruker deluge. Per i dag ser FLACS ut til å gi en god prediksjon av tester med deluge. Dermed er det akseptabelt å bruke FLACS for scenarioer med deluge.[3].

### **Kort om FLACS:**

FLACS – Flame acceleration simulator. Brukes i analyser av gasseksplosjoner og til simulering av ventilasjon og gasspredning.

## 4. Case for illustrasjon av sensitivitet i inndata

Dette kapitlet inneholder et referanseoppsett basert på noen av inndataene presentert i kapittel 3, i tillegg blir det presentert tre scenarier. I scenarioene blir deler av inndataene i referanseoppsettet endret, der hensikten er å illustrere sensitiviteten til inndata ved hjelp av utregninger. Kapittel 4 er bygget opp på følgende måte:

- Referanseoppsett
- Utregninger for å finne overtrykket ved eksplosjon i referanseoppsett
- Scenario 1-3 med tilhørende resultater
- Kombinasjon av scenarioene (to faktorer endres samtidig), resultater
- Samlede resultater
- Diskusjon angående resultatene og sensitivitet

Alle utregninger vil bli gjort manuelt med formeler/metoder fra Gas Explosion Handbook [4], Kuchta [7] og Gexcon. Det hadde vært interessant å få gjort en sensitivitetsanalyse for inndata ved hjelp av FLACS, men dette programmet krever mye resurser (tilgang, opplæring, tid), og er derfor uaktuelt for denne oppgaven. I forholdt til hensikten med kapitlet er de manuelle utregningsmetodene som blir brukt, gode nok for å illustrere sensitiviteten i inndataene.

## 4.1 Referanseoppsett

Dette oppsettet er for en fiktiv offshoremodul, der det har blitt vektlagt å få med inndata som kan benyttes i manuelle utregningsmetoder, og som dermed kan benyttes til å vise inndataenes sensitivitet. Oppsettet er veldig forenklet i forhold til det som kan forventes å forekomme i en reel modul, men det er her ingen hensikt å ta med faktorer som ikke vil gi utslag i resultatene med de utregningsmetodene som blir benyttet. Nedenfor i tabell 4.1 følger referanseoppsettet.

**Tabell 4.1 - Referanseoppsett**

Geometri for modul	
Lengde	30 m
Bredde	10 m
Høyde	7,5 m
Volum modul	2250 m <sup>3</sup>
Rør, utstyr, tanker osv. opptar 25 % av volumet	
Volum tilgjengelig	<b>1687,5</b> m <sup>3</sup>
Omgivelsestemperatur	<b>293</b> K
Den ene kortsiden av modulen er helt åpen	
Hydrokarbon (brennstoff) i modul	
Type	Metan
Kjemisk betegnelse	CH <sub>4</sub>
M (molvekt)	<b>16,04</b> kg/kmol
Støkiometrisk kons.	<b>9,48</b> Vol%
Mengde	<b>150</b> kg
Lekkasjepunkt og varighet	
Lekkasje fra hull i tank	
Tanken er ved tid for lekkasje et lukket system	
Diameter hull	<b>0,02</b> m
Trykk i tank	<b>6</b> bar
Temperatur i tank	<b>293</b> K
Tid til antennelse	<b>100</b> s

### 4.1.1 Utregning av eksplosjonstrykk for referanseoppsett

Her presenteres utregningsmetoder, forutsetninger og antagelser som trengs for å komme fram til eksplosjonstrykket.

### 4.1.1.1 Tetthet før og etter lekkasje

#### Tetthet før lekkasje

Tetthet for gassen inne i beholderen før lekkasjen inntreffer:

$$\rho_0 = \frac{pM}{ZRT}$$

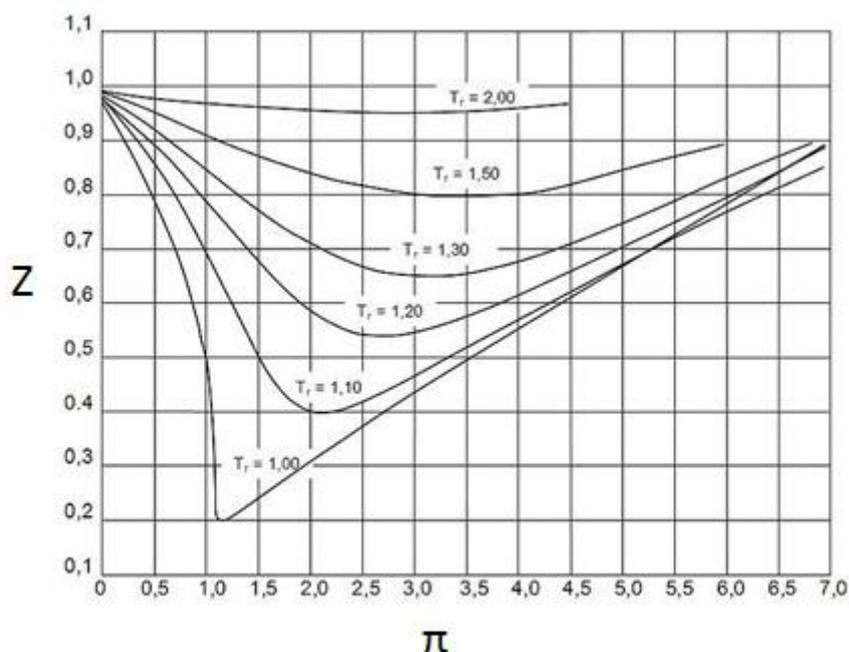
der:  $\rho$  = tetthet  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ ,  $p$  = trykk  $[Pa] = \left[\frac{N}{m^2}\right]$ ,  $M$  = molvekt  $\left[\frac{kg}{kmol}\right]$ ,

$Z$  = kompresjonsfaktor,  $R$  = gasskonstant  $\approx 8314 \left[\frac{J}{K \times kmol}\right]$ ,  $T$  = temperatur  $[K]$ .

Kompresjonsfaktoren,  $Z$ , bestemmes ut i fra kritiske egenskaper for gassen. For metan er kritisk temperatur,  $T_C = 291,1K$ , og kritisk trykk,  $P_C = 45,8atm$  (verdier hentet fra Tabell 1 i [7]). I referanseoppsettet er temperatur i tanken og for omgivelsene 293K, og trykk i tanken er 6bar.

$$T_r = \frac{T}{T_C} = \frac{293}{291,1} \approx 1,01, \quad \pi = \frac{p}{p_C} = \frac{6,08}{45,8} \approx 0,13, \quad (6bar \approx 6,08atm).$$

Kompresjonsfaktoren leses av fra figur 4.1,(hentet fra: [10]).



Figur 4.1 - Kompresjonsfaktor

Ved å lese av figuren blir  $Z_0=0,98$ .

Tettheten for metan før lekkasjen er da:

$$\rho_0 = \frac{pM}{ZRT} = \frac{6 \times 10^5 \frac{N}{m^2} \times 16,04 \frac{kg}{kmol}}{0,98 \times 8314 \frac{Nm}{K \times kmol} \times 293K} \approx 4,03 \frac{kg}{m^3}$$

### Tetthet etter lekkasje

Antar isotermisk ekspansjon. Gassen som lekker ut vil ha redusert temperatur i forhold til gassen inne i beholderen, men gassen vil blande seg med luft, og dermed vil temperaturen jevnes ut. For videre beregninger er støkiometrisk blanding en antagelse som benyttes, og da er gassen godt blandet med luft, altså er det ikke urimelig å anta isotermisk ekspansjon i dette tilfellet.

Finner først kompresjonsfaktoren:

$$T_r = \frac{T}{T_c} = \frac{293}{191} \approx 1,53, \quad \pi = \frac{p}{p_c} = \frac{1}{45,8} \approx 0,02.$$

Ved å lese av figur 4.1, blir  $Z_1=0,99$ .

$$\rho_1 = \frac{\rho_0 Z_0 p_1}{p_0 Z_1} = \frac{4,03 \frac{kg}{m^3} \times 0,98 \times 1,013 \times 10^5 \frac{N}{m^2}}{6 \times 10^5 \frac{N}{m^2} \times 0,99} \approx 0,67 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_1 \approx 0,67 \frac{kg}{m^3}$$

Tettheten til gassen (metan) som har lekket ut er  $0,67 \text{kg/m}^3$ . Tettheten brukes til utregning av volumet på gasskyen (se 4.1.1.3). Alternativt kan tettheter for ulike gasser hentes fra tabeller i relevant litteratur (for eksempel Kuchta [7]), men oppgitte tettheter er ofte begrenset til forhold med 1 atmosfæres trykk (1atm) og temperatur på 15-20 °C. Ved å bruke den viste fremgangsmåten for utregning, kan en finne tettheten ved forhold der temperatur og trykk avviker fra de som er oppgitt i nevnte tabeller.

### 4.1.1.2 Initiell og tidsavhengig lekkasjerate og samlet lekkasje

#### Initiell lekkasjerate

Følgende formel brukes for å beregne initiell lekkasjerate i tilfeller der friksjon kan neglisjeres og lekkasjehastigheten er sonisk.

$$m_{og} = A \times C_D \times \sqrt{\gamma \times \left(\frac{2}{\gamma-1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \times \frac{p}{\sqrt{\frac{T \times R}{M}}}$$

Lekkasjepunktet er et hull i en tank og for slike tilfeller kan friksjon neglisjeres. Friksjon spiller typisk inn på lekkasjer fra rør der gassen er i bevegelse. Lekkasjen er sonisk dersom følgende krav er oppfylt:

$$\frac{p_1}{p_2} \leq \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

Sjekker om lekkasjen i referanseoppsettet er sonisk:

$$\frac{1,013 \times 10^5 \frac{N}{m^2}}{6 \times 10^5 \frac{N}{m^2}} \leq \left( \frac{2}{1,3 + 1} \right)^{\frac{1,3}{1,3 - 1}} \equiv 0,169 \leq 0,546$$

Kravet er oppfylt, altså er lekkasjen sonisk. Initiell lekkasjerate kan da regnes ut med tidligere nevnt formel.

Tabell 4.2 viser verdier fra referanseoppsett og andre verdier som brukes til å finne initiell lekkasjerate.

**Tabell 4.2 - Verdier til utregning av initiell lekkasjerate**

Tegn	Beskrivelse	Verdi	Benevning
$m_{0g}$	Initiell lekkasjerate		kg/s
A	Areal hull	0,00031	$m^2$
$C_D$	Discharge coefficient	0,62	
$\gamma$	Specific heat ratio	1,3	
P	Trykk	$6 \cdot 10^5$	$N/m^2$
R	Gasskonstant	8314	$Nm/(K \cdot kmol)$
M	Molvekt	16,04	$kg/kmol$

Utregning av initiell lekkasjerate:

$$m_{0g} = 0,00031 m^2 \times 0,62 \sqrt{1,3 \times \left( \frac{2}{1,3 - 1} \right)^{\frac{1,3 + 1}{1,3 - 1}}} \times \sqrt{\frac{600000 \frac{N}{m^2}}{\frac{293K \times 8314 \frac{Nm}{(K \times kmol)}}{16,04 \frac{kg}{kmol}}}} \approx 0,2 \frac{kg}{s}$$

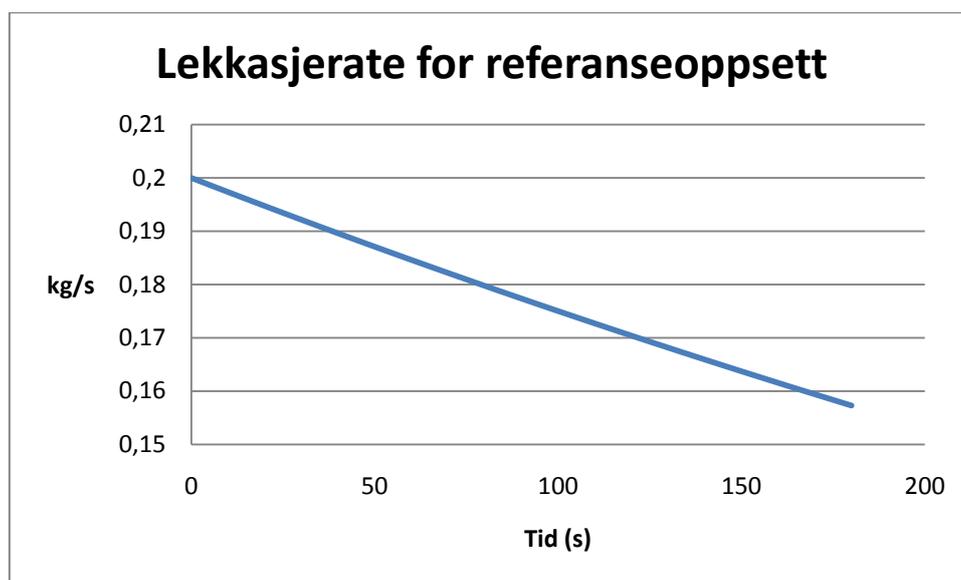
Initiell lekkasjerate er for referanseoppsett er på  $\approx 0,2$  kg/s.

### Tidsavhengig lekkasjerate

Tidsavhengig lekkasjerate beregnes med følgende formel:

$$m_g = m_{og} \times \exp\left(-\frac{m_{og}}{w} \times t\right),$$
 der  $w$  er samlet masse i tanken, og  $t$  er tid i sekunder.

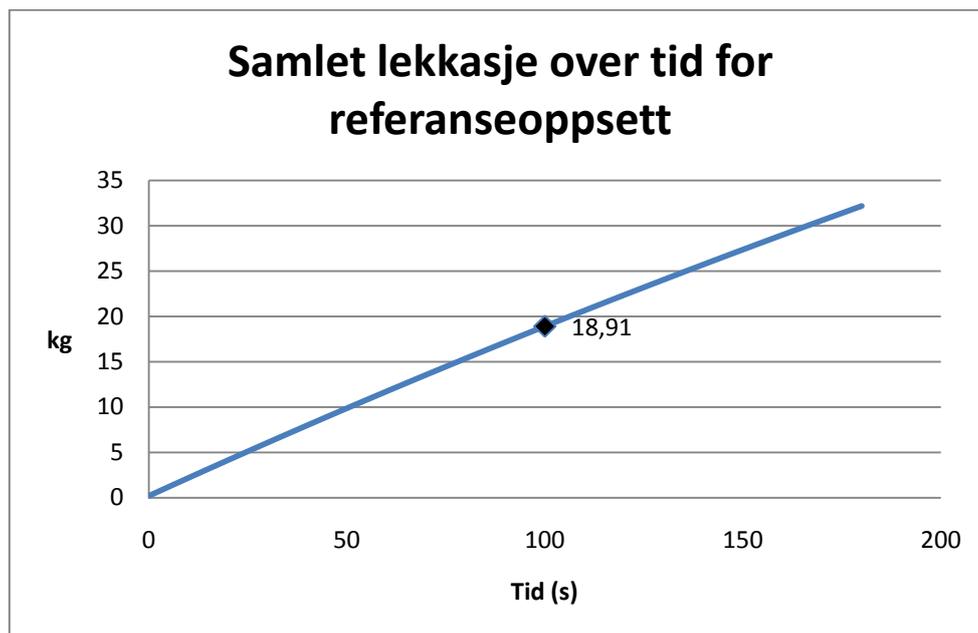
Figur 4.2 er basert på overstående ligning, og viser tidsavhengig lekkasjerate for referanseoppsettet.



Figur 4.2 - Lekkasjerate for referanseoppsett

### Samlet lekkasje

Når den tidsavhengige lekkasjeraten for alle tidssteg fra lekkasjen starter og fram til antenning er kjent, kan en finne den samlede lekkasjen fram til antenning. Figur 4.3 viser den samlede lekkasjen fra 0 til 180 sekunder, markeringen viser samlet lekkasje etter 100 sekunder, som er tidspunktet for antenning i referanseoppsettet.



**Figur 4.3 - Samlet lekkasje over tid for referanseoppsett**

Samlet lekkasje etter 100 sekunder er 18,91kg.

#### 4.1.1.3 Beregning av masse gass i svært hindret område

For å kunne beregne eksplosjonstrykket må det først beregnes masse gass som befinner seg i svært hindret område, dette er fordi formelen som benyttes for å beregne eksplosjonstrykket kun tar hensyn til den gassen som er i svært hindret område. Forutsetter at 10 % av det tilgjengelige volumet i modulen er svært hindret, og at dette er jevnt fordelt i modulen. Det vil si at dersom en gassky fyller 50 % av det tilgjengelige volumet, vil 5 % av gasskyen være i svært hindret område.

**Tabell 4.3 - Volum gassky og volum gassky i svært hindret område**

Volum gassky	
Samlet lekkasje	18,91 kg
Tetthet	0,67 kg/m <sup>3</sup>
Volum gass	28,22 m <sup>3</sup>
Støkiometrisk blanding	9,48 Vol%
Volum gassky (st)	<b>297,72</b> m <sup>3</sup>
Volum/masse gassky i svært hindret område	
Volum tilgjengelig	1687,5 m <sup>3</sup>
Gassky/volum tilgjengelig	0,18
Andel svært hindret område	0,10
Volum gassky i svært hindret område	5,25 m <sup>3</sup>
Masse gass i svært hindret område	<b>3,52</b> kg

#### 4.1.1.4 Beregning av TNT-ekvivalent

Beregning av eksplosjonstrykket gjøres ved bruk av TNT-ekvivalent metoden. Denne metoden bruker data fra TNT-eksplosjoner, og derfor må mengden gass gjøres om til ekvivalent mengde TNT. For finne ekvivalent mengde TNT brukes det en utnyttelsesfaktor ( $\eta$ ). For eksplosjoner der det må tas hensyn til geometriske forhold benyttes en utnyttelsesfaktor på 0,2, og kun den delen av gasskyen som befinner seg i svært hindret område tas med i beregningen [4]. Som vist i tabell 4.3 er det for referanseoppsettet 3,52kg gass i svært hindret område.

Formel for omgjøring av masse gass til ekvivalent masse TNT:

$$W_{TNT} = 10 \times \eta \times W_{HC}$$

Ekvivalent masse TNT for referanseoppsettet:

$$W_{TNT} = 10 \times 0,2 \times 3,52kg = 7,04kg$$

#### 4.1.1.5 Skalert avstand

Ekvivalent masse TNT brukes i formelen for skalert avstand ( $R^*$ ). ( $R$ ) er den avstanden fra eksplosjonssentrumet en ønsker å finne overtrykket for, i referanseoppsettet er denne avstanden 15m, noe som tilsvarer avstanden mellom åpningen og sentrum i modulen. Følgende formel brukes for å finne skalert avstand:

$$R^* = \frac{R}{W_{TNT}^{\frac{1}{3}}}$$

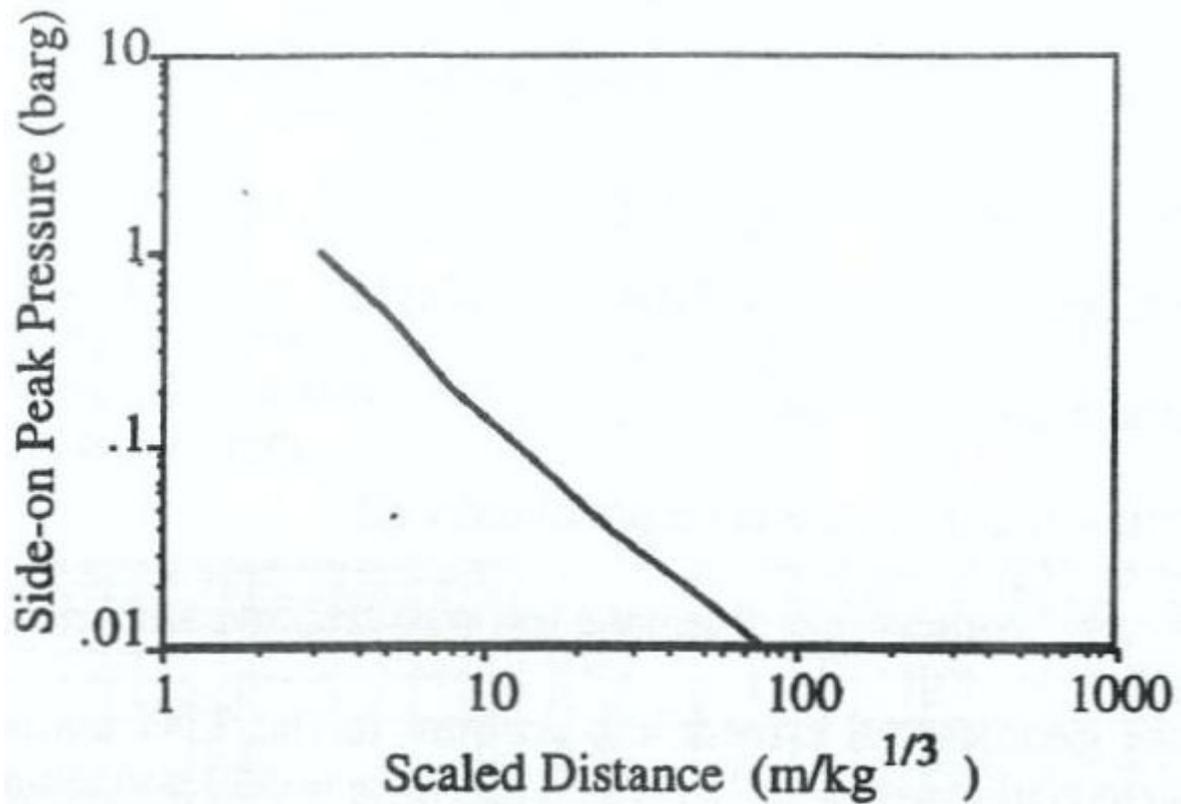
Skaler avstand for referanseoppsettet:

$$R^* = \frac{15}{7,04^{\frac{1}{3}}} = 7,82$$

#### 4.1.1.6 Overtrykk

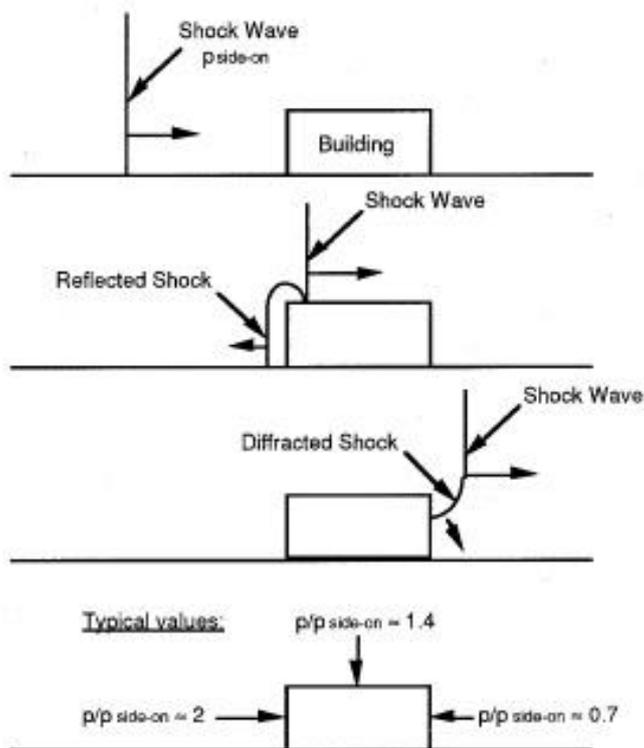
Ved å benytte skalert avstand i figur 4.4 (hentet fra [4]) kan overtrykket leses av, for referanseoppsettet gir dette et overtrykk på **0,2322 bar**. Fordi kurven kan være noe vanskelig å lese av nøyaktig, er det i oppgaven blitt brukt en webkalkulator som baserer seg på denne kurven

(<http://www2.gexcon.com/calculators/new/TNTMethod.php>).



**Figur 4.4 - Overtrykk (side-on peak pressure) versus skalert avstand**

Overtrykket som leses av fra figur 4.4 er det høyeste overtrykket (peak pressure) i trykkbølgen. Hvordan trykkbølgen påvirker objektet den treffer, avhenger av formen på objektet. Figur 4.5 (hentet fra [11]) viser hvordan trykklasten blir forskjellig på frontvegg, tak og bakvegg.



**Figur 4.5 - Trykkrefleksjon på bygning**

Dersom en bruker de typiske verdiene gitt i figur 4.5 for overtrykket i referanseoppsettet, blir trykklasten på frontveggen 0,4644barg, trykklast på tak 0,3251barg, og trykklast på bakvegg 0,1625barg.

## **4.2 Scenarioer med endring av en faktor**

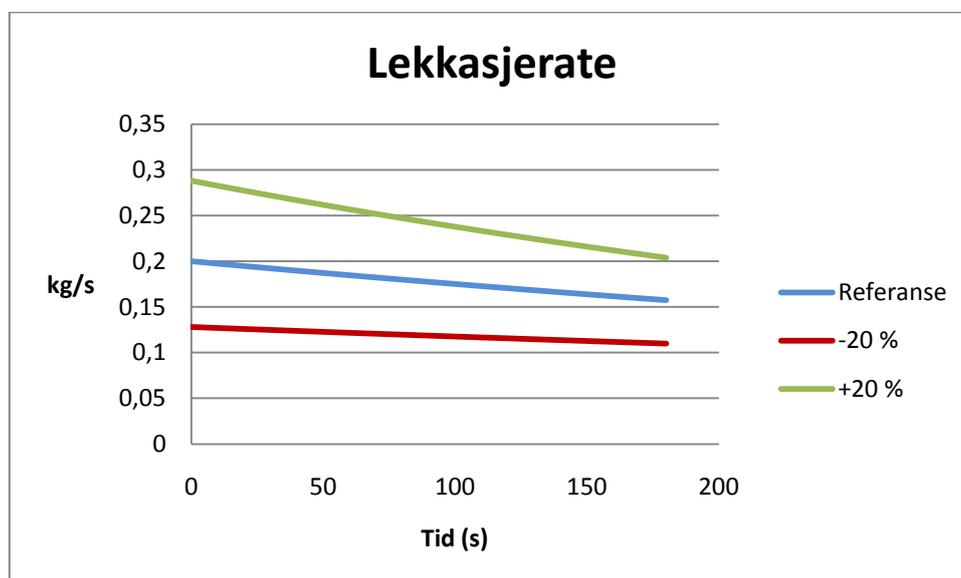
Oppsettet i scenarioene er tilsvarende som for referanseoppsettet, bortsett fra at i hvert scenario endres en faktor med 20 %. For hvert scenario er det gjort to utregninger av eksplosjonstrykket, en for positiv endring av faktoren, og en for negativ endring. Utregningsmetoden er tilsvarende som for referanseoppsettet, derfor presenteres ikke utregningene, men kun noe data og resultatene.

### 4.2.1 Scenario 1: Endring av diameter hull (+/-)20 %

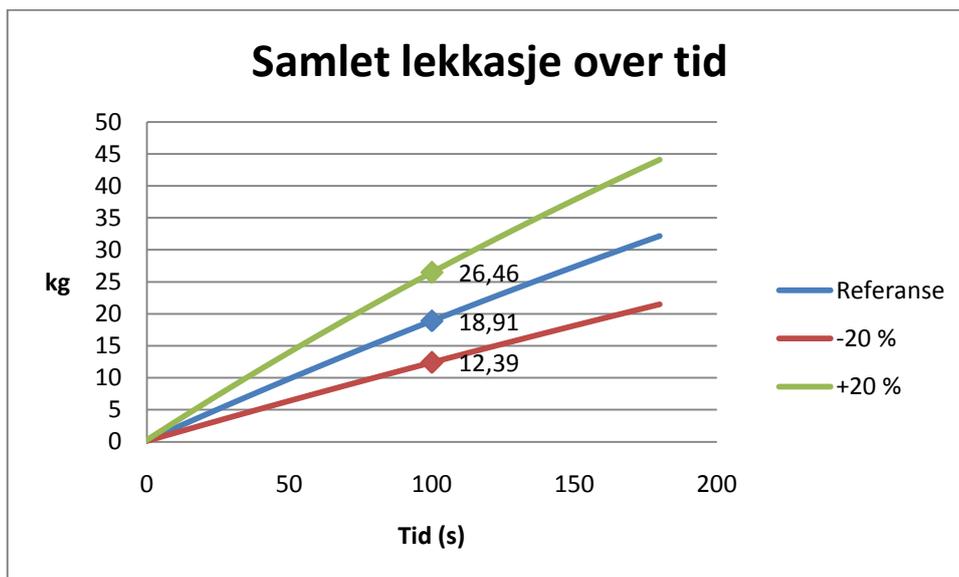
Endring av diameter hull vil direkte påvirke initiell lekkasjerate, og dermed påvirkes også samlet lekkasje fram til antenning. Det er kun diameter hull som endres, tabell 4.4 viser hvilke data som endres som en følge av dette. Figur 4.6 viser lekkasjeratene, og figur 4.7 viser samlet lekkasje.

**Tabell 4.4 - Scenario 1**

Scenario 1	Referanse	Endret diameter hull		
		-20 %	20 %	
Diameter hull	0,020	0,016	0,024	m
Initiell lekkasje	0,200	0,128	0,288	kg/s
Tid t	100	100	100	s
Samlet lekkasje (tid=t)	18,91	12,39	26,46	kg
Volum sky	297,72	195,07	416,59	m <sup>3</sup>
Andel av modul svært hindret	10	10	10	%
Volum sky svært hindret	5,25	2,25	10,28	m <sup>3</sup>
Masse HC svært hindret	3,52	1,51	6,89	kg
$W_{TNT}$	7,04	3,02	13,78	kg
Overtrykk	0,2322	0,1527	0,3290	barg



**Figur 4.6 - Lekkasjerate for scenario 1**



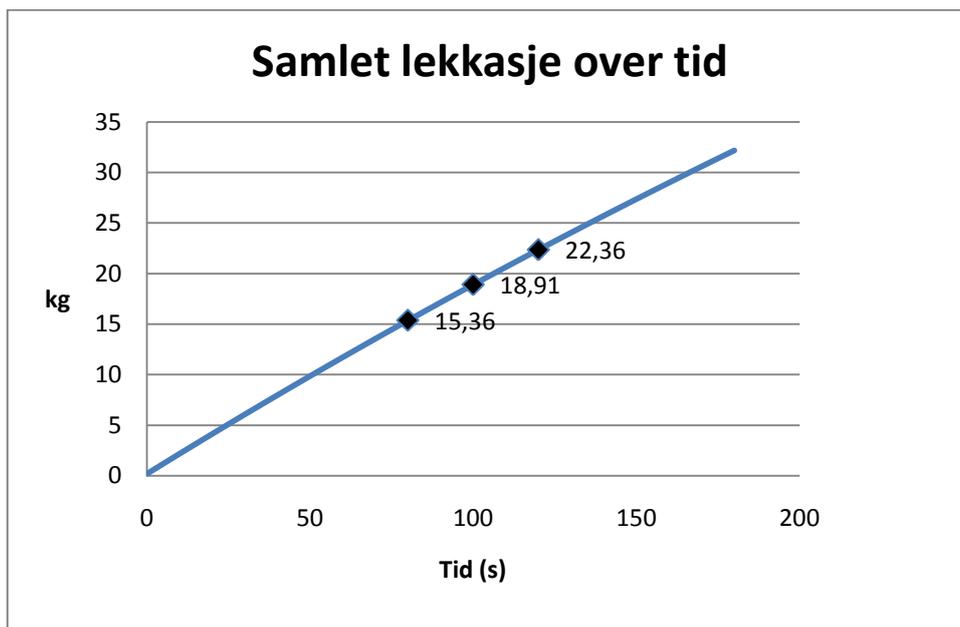
Figur 4.7 - Samlet lekkasje for scenario 1

#### 4.2.2 Scenario 2: Endring av tid (+/-)20 %

Endring av tid til antenning påvirker mengden gass som deltar i eksplosjonen. Det er kun tid til antenning som endres, tabell 4.5 viser hvilke data som endres som en følge av dette. Figur 4.8 viser samlet lekkasje, med markering for tid (i sekunder) 80, 100 og 120.

Tabell 4.5 - Scenario 2

Scenario 2	Referanse	Endret tid		
		-20 %	20 %	
Diameter hull	0,020	0,020	0,020	m
Initiell lekkasje	0,200	0,200	0,200	kg/s
Tid t	100	80	120	s
Samlet lekkasje (tid=t)	18,91	15,36	22,36	kg
Volum sky	297,72	241,83	352,04	m <sup>3</sup>
Andel av modul svært hindret	10	10	10	%
Volum sky svært hindret	5,25	3,47	7,34	m <sup>3</sup>
Masse HC svært hindret	3,52	2,32	4,92	kg
W <sub>TNT</sub>	7,04	4,64	9,84	kg
Overtrykk	0,2322	0,1900	0,2757	barg



Figur 4.8 - Samlet lekkasje for scenario 2

### 4.2.3 Scenario 3: Endring av andel svært hindret område (+/-)20 %

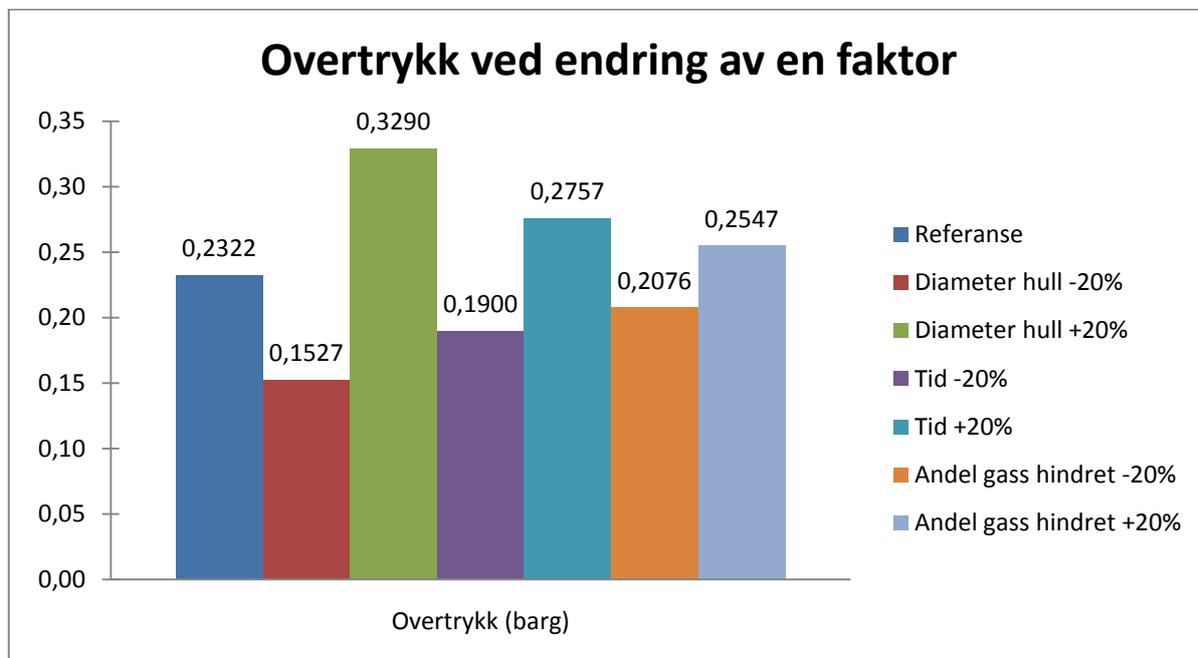
Endring av andel svært hindret område i modulen påvirker direkte mengden hydrokarbon som deltar i eksplosjonen, da metoden som benyttes kun tar hensyn til mengde hydrokarbon i svært hindret område.

Tabell 4.6 - Scenario 3

Scenario 3	Referanse	Endret andel svært hindret		
		-20 %	20 %	
Diameter hull	0,020	0,020	0,020	m
Initiell lekkasje	0,200	0,200	0,200	kg/s
Tid t	100	100	100	s
Samlet lekkasje (tid=t)	18,91	18,91	18,91	kg
Volum sky	297,72	297,72	297,72	m <sup>3</sup>
Andel av modul svært hindret	10	8	12	%
Volum sky svært hindret	5,25	4,20	6,30	m <sup>3</sup>
Masse HC svært hindret	3,52	2,82	4,22	kg
$W_{TNT}$	7,04	5,63	8,45	kg
Overtrykk	0,2322	0,2076	0,2547	barg

#### 4.2.4 Resultater for scenarier med endring av en faktor

For å bedre kunne sammenligne de ulike scenarioene er resultatene her samlet i figur 4.9.

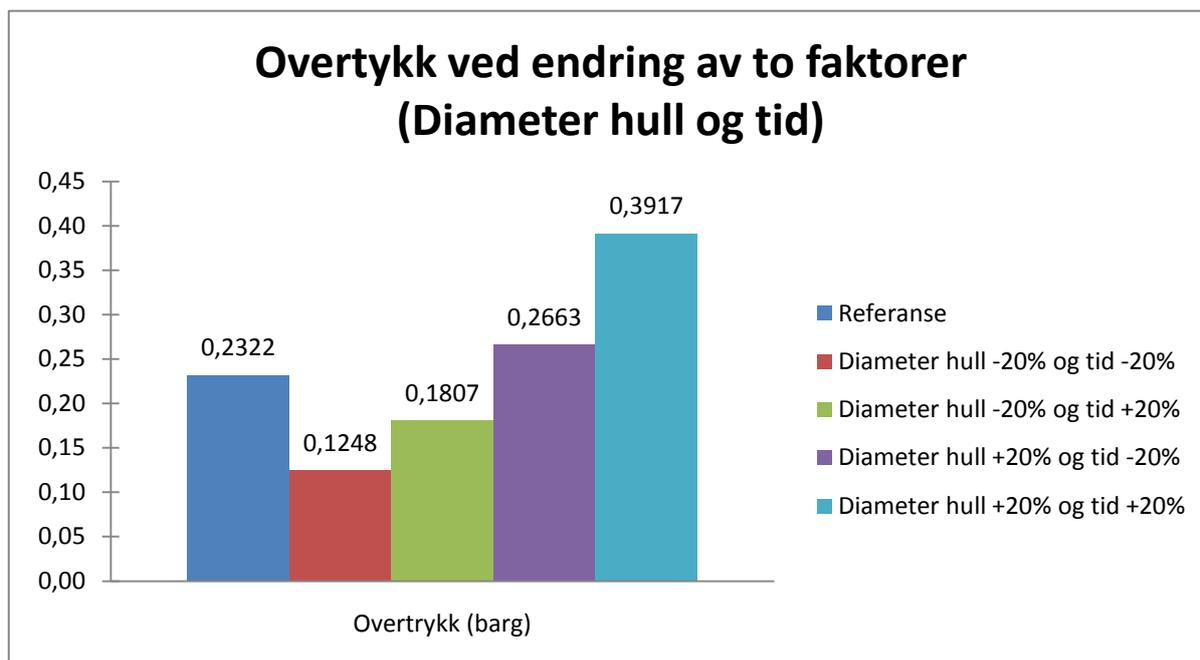


Figur 4.9 - Samlede resultater for scenario 1-3

### 4.3 Overtrykk ved endring av to faktorer

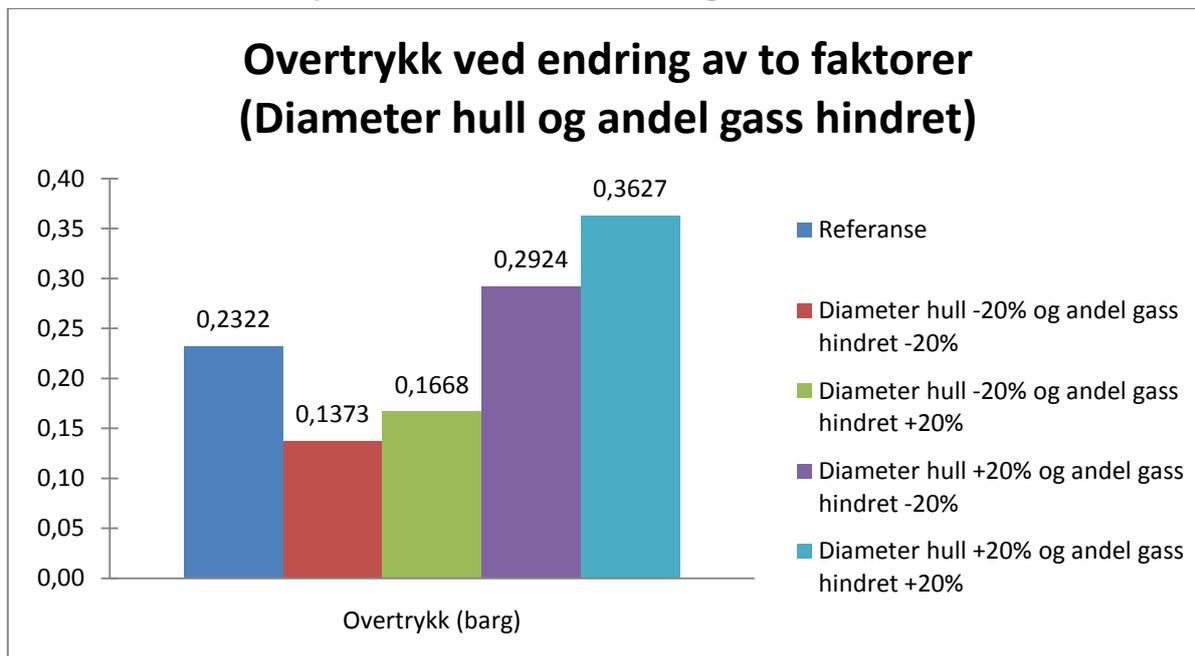
Når det er usikkerhet angående nøyaktigheten av inndataene i en eksplosjonsberegning, kan det tenkes at flere faktorer avviker fra det som brukes som inndata i beregningene. I dette kapitlet presenteres resultater fra beregninger der to faktorer er endret i forhold til referanseoppsettet. Beregningene er gjort ved å kombinere inndataene fra de tre scenarioene, totalt gir dette 12 nye beregninger.

#### 4.3.1 Kombinasjon av scenario 1 og 2



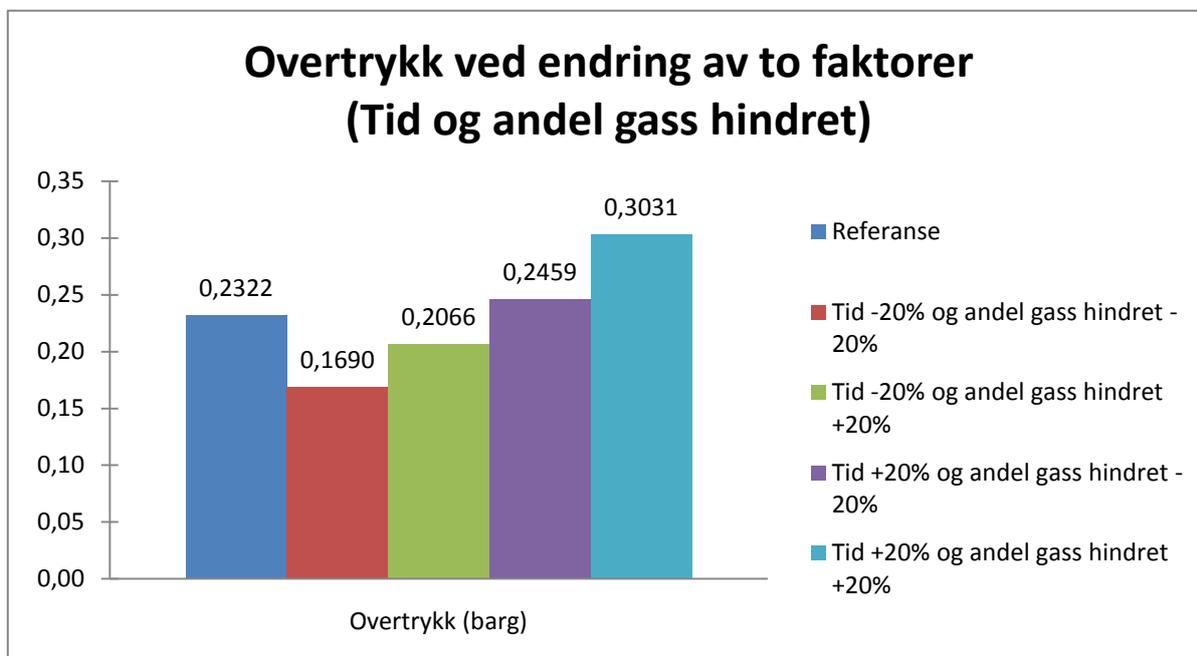
Figur 4.10 - Kombinasjon scenario 1 og 2

### 4.3.2 Kombinasjon av scenario 1 og 3



Figur 4.11 - Kombinasjon scenario 1 og 3

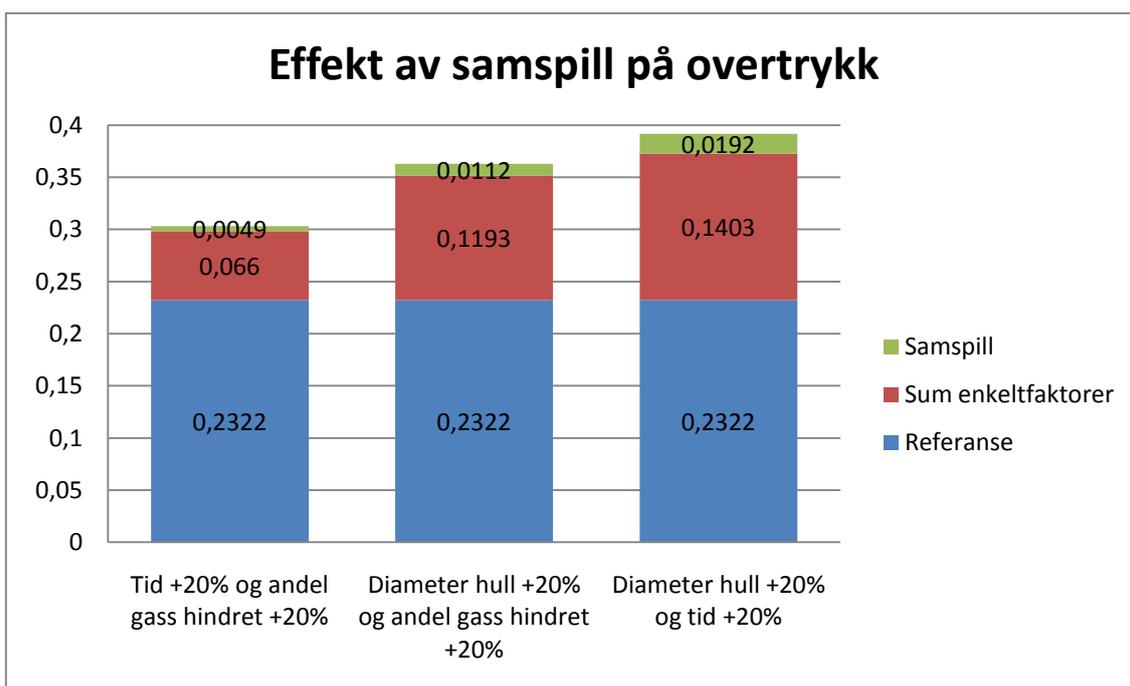
### 4.3.3 Kombinasjon av scenario 2 og 3



Figur 4.12 - Kombinasjon scenario 2 og 3

### 4.3.4 Samspill

Når det endres på to faktorer (kombinasjon av to scenarier) kan dette påvirke resultatet annerledes enn summen av endringene i overtrykk for hvert enkelt scenario. Figur 4.13 illustrerer dette for de beregningene som er gjort for kombinasjon av to scenarier, der begge faktorene er endret i positiv retning. Figuren viser overtrykket fra referanseoppsettet, summen av endringene i scenarioene ga hver for seg, og effekten av samspillet mellom de to faktorene.



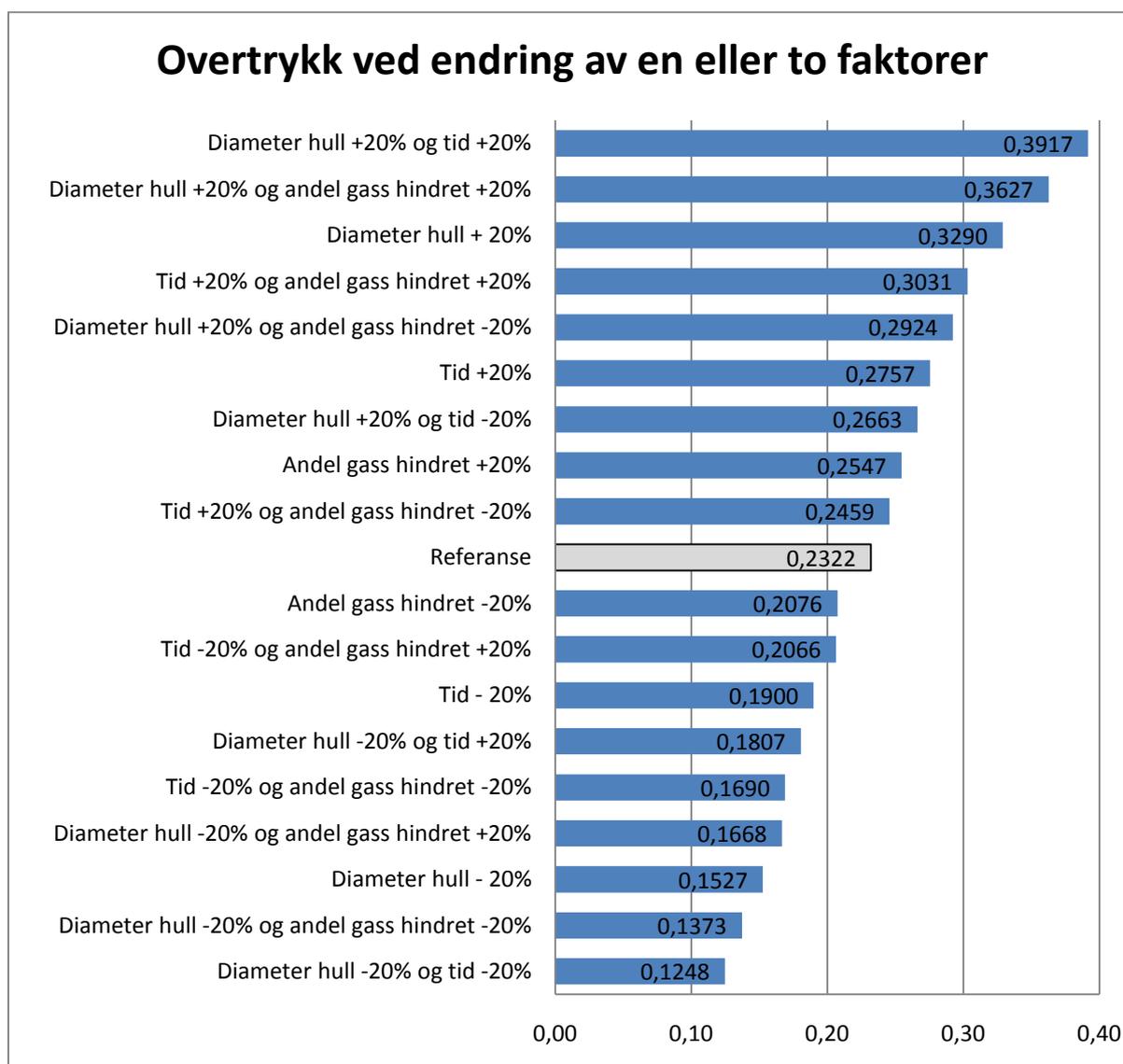
**Figur 4.13 - Samspill ved endring av to faktorer**

Figur 4.13 viser at samspillet mellom to faktorer gir et overtrykk som er høyere enn summen av endringene enkeltfaktorene gir i scenarioene. Merk at denne figuren kun viser de beregningene der begge faktorene er endret i positiv retning, da det er for disse beregningene en klart kan se effekten av samspillet.

## 4.4 Samlet resultat

Tabell 4.7 - Samlet resultat fra scenarioer og kombinasjon av scenarioer

Faktor endret	Overtrykk (barg)	Endring (barg)	Endring (%)
Diameter hull -20% og tid -20%	0,1248	-0,1074	-46,25
Diameter hull -20% og andel gass hindret -20%	0,1373	-0,0949	-40,87
Diameter hull - 20%	0,1527	-0,0795	-34,24
Diameter hull -20% og andel gass hindret +20%	0,1668	-0,0654	-28,17
Tid -20% og andel gass hindret -20%	0,1690	-0,0632	-27,22
Diameter hull -20% og tid +20%	0,1807	-0,0515	-22,18
Tid - 20%	0,1900	-0,0422	-18,17
Tid -20% og andel gass hindret +20%	0,2066	-0,0256	-11,02
Andel gass hindret -20%	0,2076	-0,0246	-10,59
<b>Referanse</b>	<b>0,2322</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,00</b>
Tid +20% og andel gass hindret -20%	0,2459	0,0137	5,90
Andel gass hindret +20%	0,2547	0,0225	9,69
Diameter hull +20% og tid -20%	0,2663	0,0341	14,69
Tid +20%	0,2757	0,0435	18,73
Diameter hull +20% og andel gass hindret -20%	0,2924	0,0602	25,93
Tid +20% og andel gass hindret +20%	0,3031	0,0709	30,53
Diameter hull + 20%	0,3290	0,0968	41,69
Diameter hull +20% og andel gass hindret +20%	0,3627	0,1305	56,20
Diameter hull +20% og tid +20%	0,3917	0,1595	68,69



**Figur 4.14 - Samlet resultat fra scenarier og kombinasjon av scenarier**

## 4.6 Diskusjon om resultater og sensitivitet

Som nevnt tidligere er referanseoppsettet og dermed også scenarioene veldig forenklet i forhold til det som forekommer i virkeligheten. Også utregningsmetodene som brukes er veldig enkle i forhold til hvordan en simulering fungerer. Dette nevnes for å understreke at det ikke er de spesifikke resultatene (overtrykkene) fra de forskjellige beregningene som vektlegges her, da resultatene trolig hadde sett litt annerledes ut dersom en mer avansert metode hadde blitt brukt. Det som derimot vektlegges, og som er formålet med dette kapittelet, er at utregningene viser om små endringer på en eller flere faktorer kan gi betydelig endring i overtrykket.

Selv om resultatene ikke nødvendigvis er helt nøyaktig i forhold til virkeligheten, kan en allikevel anta at de gir en indikasjon på virkeligheten. Med utgangspunkt i dette,

kan resultatene legges til grunn for å gi en generell betraktning om hvor sensitiv resultatene fra eksplosjonsberegninger er i forhold til små endringer i faktorer.

I utregningene av overtrykk i dette kapittelet er det et lite antall faktorer som spiller inn på resultatet, og scenarioene baserer seg på endring av tre forskjellige faktorer. I en eksplosjonssimulering vil det være mange flere faktorer som spiller inn, og beregningsmetodene er langt mer avansert, derfor vil det ikke ha noen hensikt å gå i dybden på hvorfor de tre valgte faktorene i scenarioene gir endring i overtrykket. Det er mer interessant å se på selve endringene i overtrykk som scenarioene gir.

Dersom en ser på de samlede resultatene i tabell 4.7 og figur 4.14, viser de at en kan få betydelige endringer i overtrykket ved å endre litt på en eller flere faktorer. Ved å sammenligne disse resultatene med tabell 2.1 - Skader fra overtrykk, ser en hvilke konsekvenser overtrykkene gir. Det må også ta hensyn til at resultatene gir overtrykk i side-on, og at det da kan gi høyere trykklast enn dette, avhengig av hvordan trykkbølgen treffer (se figur 4.5).

Dersom en ser på hver enkelt faktor som ble endret og hvordan den enkelte faktor påvirket overtrykket, ser en at det er forskjell mellom de ulike faktorene. For scenarioene der bare en faktor ble endret av gangen, er det endring av diameter hull som gir størst utslag i både positiv og negativ retning, etterfulgt av endring av tid, og til sist med minst utslag i begge retninger kommer endring av andel svært hindret område. Ut fra dette kan en si at små endringer på en faktor kan gi betydelig endring av overtrykket, men hvor mye endring av faktoren som er påkrevd for å gi hvilken endring i resultatet, vil avhenge av hvilken faktor det gjelder.

I tabell 4.13 kan en se at når to faktorer er endret i positiv retning vil samspillet mellom disse føre til et overtrykk som er større enn summen av endringene i overtrykk hver enkelt faktor får i sitt scenario. Dette viser at det er samspill mellom faktorene når begge er endret i positiv retning, og at dette samspillet forsterker overtrykket ytterligere.

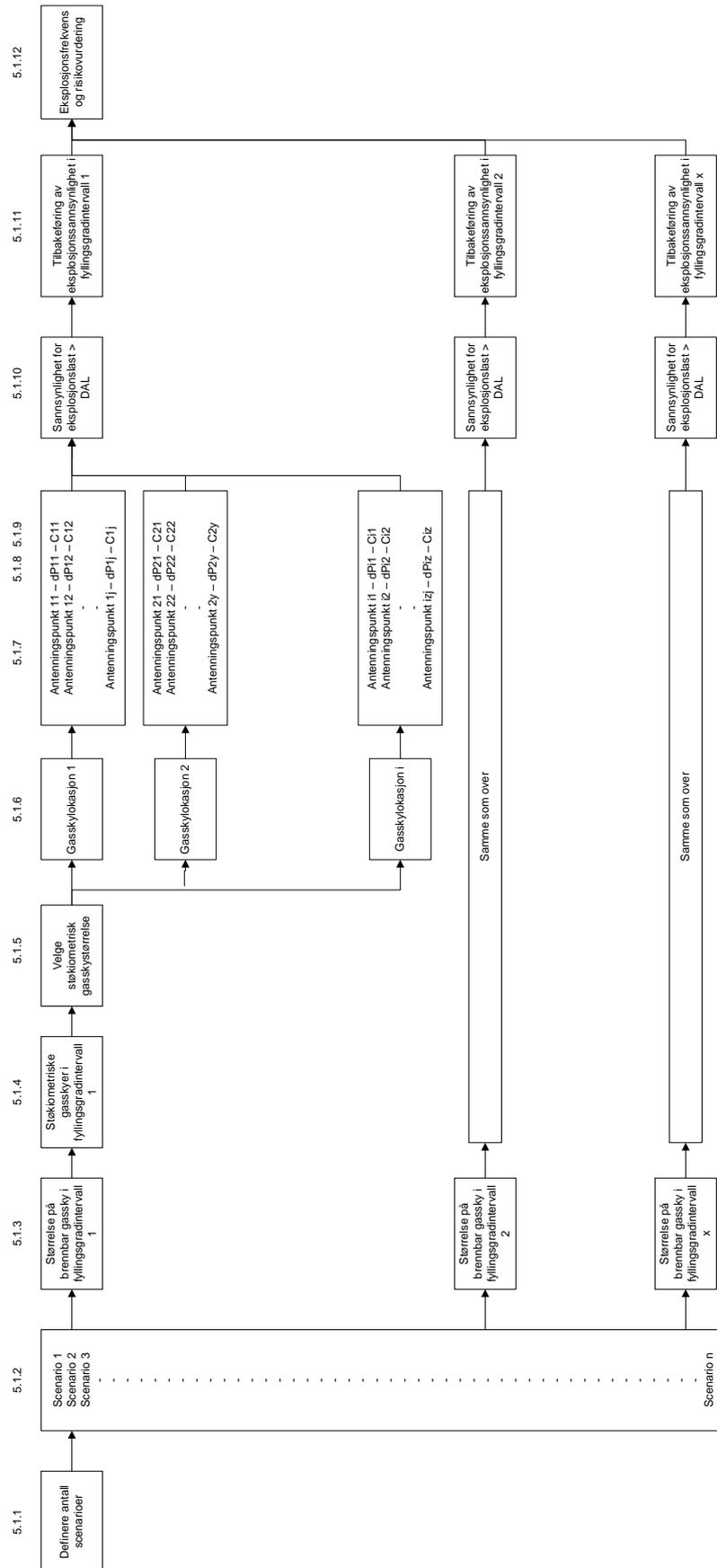
Selv om det er et relativt lite datagrunnlag, og metodene ikke er svært nøyaktig, kan en like vel konkludere med at dersom det gjøres små endringer i en eller flere faktorer, kan dette gi betydelig utslag i resultatet (overtrykket). Denne konklusjonen i seg selv sier ikke så mye, men den må ses i sammenheng med den eventuelle usikkerheten som ligger i de verdiene som benyttes for de forskjellige faktorene i en eksplosjonsberegning. Usikkerhet i inndata vil bli diskutert i kapittel 6.

## 5 Eksplosjonsvedlegg

Dette kapitlet viser fremgangsmåten for et eksplosjonsvedlegg. Fremgangsmåten er hentet fra et eksplosjonsvedlegg tilhørende en reel kvantitativ risikoanalyse gjennomført for en offshoreinstallasjon. Kilden holdes anonym. Hele kapittel 5.1 og 5.2 er enten hentet fra nevnte eksplosjonsvedlegg, eller beskriver innholdet i det.

Kapitlet 5.1 beskriver fremgangsmåten for eksplosjonsvedlegg, og kapittel 5.2 beskriver metodens håndtering av usikkerhetsmomenter.

Eksplosjonsvedlegget har til hensikt å finne eksplosjonsrisikoen for installasjonen, der eksplosjonsrisiko er definert som frekvensen for overskridelse av DAL (Design Accident Load) for bærende strukturer. Legg merke at definisjonen av eksplosjonsrisiko ikke defineres som frekvensen for alle eksplosjoner, men kun de som overstiger DAL. Figur 5.1 gir en oversikt over fremgangsmåten i eksplosjonsvedlegget.



## Figur 5.1 - Oversikt

# 5.1 Beskrivelse av fremgangsmåte

5.1.1 – 5.1.12 beskriver fremgangsmåten som vises i figur 5.1.

## 5.1.1 Definere antall scenarioer

Det må tas hensyn til de parametere som forventes å ha betydning for formasjonen av gasskyen. Disse parametere er som følger:

- Prosessegment
- Prosessenhet (definerer lekkasjelokasjon, fluidkomposisjon, trykk og temperatur).
- Lekkasje rate
- Lekkasje profil (tidsavhengig lekkasje rate)
- Lekkasje retning
- Vindretning
- Vindhastighet

For hver parameter vil det være en eller flere tilhørende verdier som skal benyttes, for eksempel kan det være 8 forskjellige vindretninger. Ved å sette opp alle mulige kombinasjoner av verdier for parametere får en totalt antall scenarioer, tabell 5.1 viser et eksempel på hvordan dette kan være.

**Tabell 5.1 - Totalt antall scenarioer**

Parameter	Antall
Prosessegment	5
Proessenhet	4
Lekkasje rate	9
Lekkasje profil	1
Lekkasje retning	6
Vindretning	8
Vindhastighet	5
Totalt antall scenarioer	43200

NORSOK Z-013 sier det prinsipielt skal tas hensyn til minst 8 vindretninger og at det skal etableres frekvens og hastighetsdistribusjon for disse ut i fra en vindrose for området. Ved hjelp av CFD-simuleringer kan disse klassifiseres i 2-4 vindregimer. Dersom dette gjøres vil totalt antall scenarioer reduseres betydelig. Dersom det

benyttes 4 vindregimer i stede for 8 vindretninger og 5 vindhastigheter i tabell 5.1, blir totalt antall scenarier 4320, altså 10 % av det opprinnelige antallet.

### 5.1.2 Scenario

Hvert av scenarioene nevnt ovenfor er unike, men for mange vil forskjellene være ubetydelige. For å oppnå et nøyaktig risikobilde burde alle scenarioene analyseres separat, før de klassifiseres. Dette gjøres ved hjelp av analytiske modell (dataverktøyet ASAP). Beregningstiden ved bruk av analytisk modell er kort og dermed kan den kjøres for et stort antall scenarier i løpet av akseptabel tid.

#### Kort om ASAP:

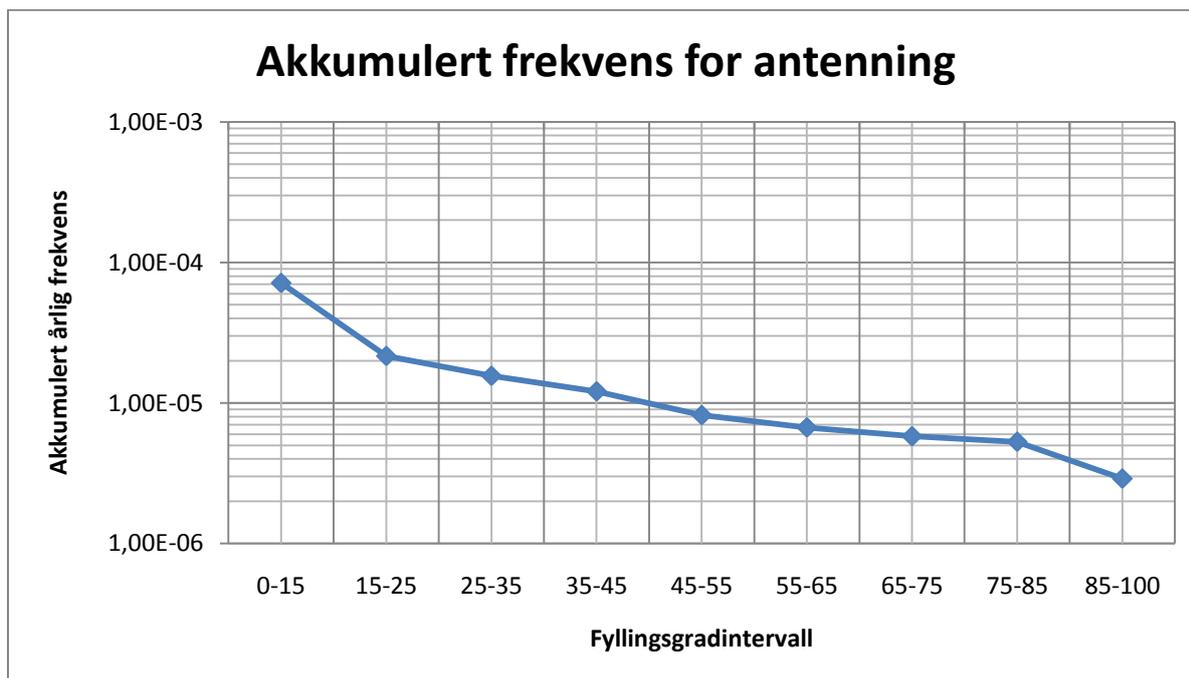
ASAP er en programvarepakke som kalkulerer risikoen relatert til hydrokarbonlekkasjer, branner og eksplosjoner på olje- og gassinstallasjoner.

### 5.1.3 Størrelse på brennbar gassky i fyllingsgradintervall

For hvert scenario kalkulerer ASAP størrelsen på brennbar gassky, og registrerer gasskyen og dens antenningsfrekvens i predefinerte fyllingsgradintervaller. Når alle scenarioene er kalkulert, er resultatet en tabell (eksempel tabell 5.2) med antenningsfrekvens for gasskyer i hvert fyllingsgradintervall. Figur 5.2 viser akkumulert antenningsfrekvens for fyllingsgradintervallene.

**Tabell 5.2 - Eksempel på antenningsfrekvenser for fyllingsgradintervaller**

Fyllingsgradintervaller (%)	Antenningsfrekvens (per 10 <sup>4</sup> år)
< 15	0,498
15-25	0,06
25-35	0,035
35-45	0,039
45-55	0,015
55-65	0,009
65-75	0,005
75-85	0,024
85-100	0,029
Sum alle gasskystørrelser:	<b>0,714</b>



**Figur 5.1 - Akkumulert frekvens for antenning (fra eksempelverdier gitt i tabell 5.2)**

### 5.1.4 Støkiometriske gasskyer

Forholdet mellom størrelse på brennbar gassky fra ASAP og størrelsen på ekvivalent støkiometrisk gassky må estimeres. Dette gjøres for å relatere volumet på gasskyen fra ASAP til volumet på støkiometrisk gassky som benyttes i eksplosjonssimulering.

Basert på bred erfaring med simuleringer for forskjellige fyllingsgradintervaller, brukes en gjennomsnittsfaktor på alle scenarioene fra ASAP.

### 5.1.5 Velge støkiometrisk gasskystørrelse

En støkiometrisk gasskystørrelse velges for å representere hver av fyllingsgradintervallene fra ASAP. De støkiometriske gasskyene simuleres så i FLACS for å gi eksplosjonsresultater for hver av fyllingsgradintervallene.

### 5.1.6 Lokasjon av støkiometrisk gassky

I eksplosjonssimuleringene vil gasskyen bli plassert på ulike lokasjoner, dette fordi forskjellige lokasjoner vil gi ulik eksplosjonslast. Antall ulike lokaliseringer av gasskyen vil avhenge av størrelsen og oppbygningen av modulen. Dersom dispersjonssimuleringer viser en klar distribusjon på gasskyens plassering, vil dette bli brukt for å plassere gasskyen.

### **5.1.7 Antenningspunkter**

For hver gasskylokasjon vil det bli simulert med flere antenningspunkter, typisk en i senter av gasskyen og en i enden. Antenneing i enden representerer kontinuerlige tennkilder, mens antenneing i senter representerer diskontinuerlige tennkilder.

### **5.1.8 Eksplosjonstrykk**

Hvert eksplosjonsscenario gir et unikt eksplosjonstrykk i forskjellige deler av modulen. Antall eksplosjonssimuleringer for hvert intervall med gasskystørrelser burde være tilstrekkelig stort til å produsere en representativ distribusjon av eksplosjonslaster. Dette er viktigst for intervall med gasskystørrelser som bidrar til design (DAL) og for intervaller med høy frekvens.

### **5.1.9 Konsekvensvurdering**

Resultater om trykk og impuls fra eksplosjonssimuleringene evalueres i forhold til skade på modulens partisjoner (for eksempel vegger og dekke). Resultatene fra skadevurderingene kategoriseres i forhold til hvilken funksjon partisjonen har (for eksempel brannvegg, lokal bærende konstruksjon og global bærende konstruksjon).

### **5.1.10 Etablere sannsynligheter for eksplosjonslast > DAL for hver partisjon**

Hver eksplosjonssimulering og den assosierte konsekvensvurderingen avgjør om eksplosjonen forårsaker eskalering (uakseptabel skade) eller ikke. Antall eskaleringstilfeller for en partisjon dividert på antall eksplosjonstilfeller i det fyllingsgradintervallet, gir sannsynligheten for eksplosjonslast > DAL. Kalkulering av sannsynligheten på denne måten er gyldig så lenge alle gasskylokasjoner og alle antenningspunkter er tildelt samme sannsynlighet for eksplosjon. Dersom det brukes en sannsynlighetsfordeling for gasskylokasjon og/eller antenningspunkter må sannsynligheten for eskalering justeres i forhold til disse.

### **5.1.11 Tilbakeføring av eksplosjonssannsynlighet i fyllingsgradintervall**

Sannsynlighetsverdiene som er funnet ovenfor for fyllingsgradintervallene brukes så på alle scenarier som gir brennbare gasskyer innenfor samme fyllingsgradintervallet.

### **5.1.12 Eksplosjonsfrekvens og risikovurdering**

Når sannsynligheten for eksplosjonslast > DAL er funnet for alle fyllingsgradintervaller kan eksplosjonsrisikoanalysen ferdigstilles. Den gir da eksplosjonsfrekvens per modul og kalkulerer risiko for personell grunnet både brann

og eksplosjon. Brann- og eksplosjonsulykker er ofte knyttet til hverandre og derfor må de ses i sammenheng slik at ikke risikoen overestimeres.

Tabell 5.3 viser et eksempel på sannsynlighet for eksplosjonslaster som overstiger DAL for hver partisjon av en modul. Merk at det er valgt en støkiometrisk gasskystørrelse for hvert fyllingsgradintervall slik som beskrevet i kapittel 5.1.5.

**Tabell 5.3 - Eksempel: Sannsynlighet for eksplosjonslast > DAL**

Sannsynlighet for svekkelse av partisjon fordelt på gasskystørrelse									
ASAP fyllingsgradintervall (%)	< 15	15-25	25-35	35-45	45-55	55-65	65-75	75-85	85-100
Støkiometrisk gassky (%)	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Partisjon:									
Dekke	0	0	0	0	0,08	0,31	0,51	0,69	0,85
Tak	0	0	0	0	0,65	0,92	1	1	1
Brannvegg	0	0	0	0	0,5	0,83	1	1	1

## 5.2 Håndtering av usikkerhet i eksplosjonsvedlegget

Dette kapittel vil gå igjennom de usikkerhetsmomentene som er identifisert i metoden. Følger samme rekkefølgen som kapittel 5.1, altså slik oppbygningen er i figur 5.1. Kun de momentene som metoden selv har identifisert og kommentert er tatt med i dette kapittelet. Diskusjon angående disse er i kapittel 6.

### 5.2.1 Definere antall scenarioer

En realistisk oppdeling av lekkasjelokasjoner ville gitt mer nøyaktige resultater i forhold til gasspredning og antenning. Det er imidlertid nødvendig med en vis kategorisering for å oppnå håndterbare antall scenarioer. I et segment (ESD segment) er det ofte mange potensielle lekkasjekilder spredt over et stort område i modulen. Utfordringen er da å bestemme hvor en lekkasje som skal representere flere andre lekkasjer skal plasseres.

For å ta hensyn til påvirkningen fra temperatur, trykk og fluidkomposisjon, vil metoden anse hver større prosessenhet (for eksempel kompressor, separator eller kjøler) som en unik lekkasjekilde.

Initiell lekkasjerate vil stort sett forbli konstant til ESDVer og XVer lukker og blowdown ventiler åpner. Normalt vil det ta 30 til 60 sekunder fra lekkasjen starter og til shutdown er fullført. Etter 30 til 60 sekunder vil de fleste gasskyer har nådd sitt maksimum, og dermed vil lekkasjeraten etter shutdown ha liten innvirkning. Det er derimot tilfeller der gasskyen blir liten selv om lekkasjeraten er høy, dette kan forekomme i dårlig ventilerte moduler i tilfeller med lite vind. For disse tilfellene vil

gasskyen nå sitt maksimum etter shutdown, og metoden (som går ut i fra at gasskyene har nådd maksimum før shutdown) vil ikke være konservativ.

I tilfeller med transient lekkasjerate der initiell lekkasjerate betydelig overstiger produksjonsraten, vil lekkasjeraten rask synke og bli lik produksjonsraten. Metoden antar da at maksimal lekkasjerate er lik produksjonsraten og at raten er stabil (ikke transient) fram til shutdown.

I tilfeller der shutdown ikke virker, kan varigheten for gasslekkasjen bli betydelig lengre. Metoden velger å se bort i fra tilfeller der isolering og trykkavlastning ikke fungerer, og sier at disse feilene er usannsynlig sammenlignet med vellykket isolering og trykkavlastning (ESD og blowdown).

### **5.2.2 Scenario**

Ingen momenter nevnt.

### **5.2.3 Størrelse på brennbar gassky i fyllingsgradintervall**

Ingen momenter nevnt.

### **5.2.4 Støkiometriske gasskyer**

Metoden velger en gjennomsnittsfaktor for forholdet mellom fyllingsgrad i ASAP og støkiometrisk gassky som brukes i eksplosjonsberegningen.

Metoden går over fra å bruke ASAP-modeller til CFD-modeller. Dette innebærer at metoden er inkonsekvent, da to så forskjellige modeller aldri vil gi samme resultat. Det nevnes også at to forskjellige CFD-modeller heller aldri vil gi samme resultat.

### **5.2.5 Velge støkiometrisk gasskystørrelse**

En støkiometrisk gasskystørrelse velges for å representere hvert fyllingsgradintervall.

### **5.2.6 Lokasjon av støkiometrisk gassky**

Ingen momenter nevnt.

### **5.2.7 Antenningspunkter**

Ingen momenter nevnt.

### **5.2.8 Eksplosjonstrykk**

Antall eksplosjonssimuleringer for hvert fyllingsgradintervall burde være tilstrekkelig stor til å produsere en representativ eksplosjonslastdistribusjon. Dette er mest viktig for fyllingsgradintervallene som bidrar til design (DAL) og for de med høy frekvens.

### **5.2.9 – 5.2.12**

Ingen momenter nevnt.

## 6 Om usikkerhet og bruk av RAK

### 6.1 Generelle betraktninger om usikkerhet

Dette kapitlet tar for seg generelle betraktninger om usikkerhet, og momenter rundt usikkerhet i inndata, modell og metode. Usikkerhet behandles ulikt avhengig av hvilket perspektiv en benytter seg av, oppgaven tar utgangspunkt i det prediktive perspektivet for risiko. I dette perspektivet er usikkerheten epistemisk, dvs. at usikkerheten er et resultat av manglende kunnskap. Sannsynlighetene i dette perspektivet er et subjektivt uttrykk for usikkerhet, der sannsynlighetene vil avhenge av ulike forutsetninger og antagelser [2]. Med andre ord er det ikke usikkerhet i sannsynlighetene, men de uttrykker usikkerheten.

#### 6.1.1 Kilder til usikkerhet

Det er generelt akseptert at det er tre hovedkilder til usikkerhet i QRA-studier, disse presenteres nedenfor (hentet fra [5]).

Den første kilden er variasjon i populasjoner som benyttes i kalkulasjoner. Altså om data av tilstrekkelig mengde og relevans er tilgjengelig eller ikke.

Den andre kilden er relatert til forenklinger som gjøres i modelleringen av risikoaspekter.

Den tredje kilden er relatert til fullkommenheten av kunnskapen om relevante fenomen og mekanismer.

#### 6.1.2 Utdyping av kilder til usikkerhet

##### 6.1.2.1 Historiske data

For en faktor som helt eller delvis baserer seg på historiske data vil usikkerhetsmomentet i faktoren være knyttet til mengde og relevans av de historiske dataene. Når det finnes lite tilgjengelig data (få observerte verdier) er det vanskelig å predikere en sannsynlighet for fremtidige hendelser, ofte er dette tilfellet (få observerte verdier) for svært alvorlige hendelser. Når det finnes lite tilgjengelig data kan det være mulig å hente inn data fra lignende aktiviteter, da må relevansen av disse vurderes.

"Lignede aktiviteter" består ofte av en sammensetning av erfaringer og representerer derfor et gjennomsnittssystem. Dette gjør det vanskelig å skille mellom beslutningsalternativer som foreligger, og det blir spesielt vanskelig å forsvare bruk av nye teknologier som ikke er representert i dataene.[12].

I de fleste tilfeller representerer ikke dataene systemspesifikk informasjon (relatert til lokale operasjonsforhold, og tekniske og organisatoriske tiltak som allerede er

implementert). Slik tilleggsinformasjon eksisterer vanligvis som en blanding av detaljerte systemspesifikasjoner og ekspertkunnskap. For å kunne reflektere slik informasjon, trengs det videre modellering. Differensiering mellom beslutningsalternativer oppnås da gjennom en mer detaljert representasjon av systemet.[12].

### **6.1.2.2 Modell/modellering**

I forhold til det prediktive perspektivet er det ikke relevant å snakke om usikkerhet i modellen. Nedenfor blir det presentert hva som menes med en modell/modellering og hvordan det henger sammen med usikkerhetsmomenter. Disse betraktningene om modell/modellering er basert på det som er presentert i Terje Avens Foundations of Risk Analysis (2003).

En modell er en forenklet representasjon av et system i den virkelige verden. Siden modeller brukes til å reflektere den virkelige verden, inkluderer de kun forbindelser mellom observerbare verdier. Modellering er et verktøy som lar en uttrykke ens usikkerhet i det formatet som er best egnet til å oppfylle målene med gjennomføringen av analysen.

Detaljert modellering trengs for å identifisere kritiske faktorer som bidrar til risikoen og for å evaluere effekten av risikoreducerende tiltak.

Under den prediktive tilnærmingen til risiko og risikoanalyse er modellering et verktøy for identifisering og uttrykking av usikkerhet, dermed er det også verktøy for å potensielt redusere usikkerheten. Usikkerheten kan identifiseres ved å inkludere mer systemspesifikk informasjon i analysene, i form av utvidet informasjonsgrunnlag for uttrykk om usikkerhet, og i form av strukturen på selve modellen.

Som nevnt tidligere er ikke relevant å snakke om usikkerhet i modellen. Det som er interessant er å se på godheten av en spesifikk modell som brukes i en spesifikk risikoanalyse og beslutningssammenheng. En modell kan gi en mer eller mindre god representasjon av den virkelige verden. Ingen modell reflekterer alle aspekter i den virkelige verden, men den burde reflektere det viktigste.

### **6.1.2.3 Kunnskap**

Kunnskapen angående fenomener eller mekanismer som er av betydning for risikoforholdene kan variere. Det avhenger av blant annet av tilgjengelig informasjon og erfaringer hos risikoanalytikerne. Dersom det er lite kunnskap tilgjengelig om et fenomen vil det være vanskelig å predikere sannsynligheter for dette. Jo mindre kunnskap en har om et fenomen, jo større vil usikkerheten være. For å redusere usikkerheten kan en skaffe mer kunnskap, dersom det er mulig. I forholdt til beslutningen om hvorvidt en skal bruke mer resurser på å skaffe ytterligere informasjon om noe (redusere usikkerheten), er generelt den forventede verdien av

ytterligere informasjon større, jo større usikkerheten er [13].

#### **6.1.2.4 Vurderingsfeil ved tildeling av sannsynligheter**

Når en person skal tildele noe en sannsynlighet, er det enkelte fallgruver som en lett kan havne i. Disse er intuitive måter å håndtere usikre situasjoner på og kan lede til at en ubevist legger for mye vekt på ubetydelige faktorer. Disse presenteres nedenfor (Hentet fra [12]).

Tildelingen av sannsynlighet blir påvirket av hvor lett det er for personen å huske lignende hendelser. For hendelser der personen lett kan hente en lignende hendelse i hukommelsen, er tendensen at disse blir tildelt høyere sannsynlighet enn hendelser som ikke så lett kan hentes fra hukommelsen, eller hendelser som er totalt ukjent for personen.

Ved tildeling av sannsynlighet er tendensen at det velges et initielt forankringspunkt. Så blir de ekstreme verdiene vurdert ved å justere bort fra forankringspunktet. En konsekvens av dette er et ofte gis lave sannsynlighet for ekstreme utfall.

Tildelingen av sannsynlighet skjer ved at personen sammenligner sin kunnskap om fenomenet med et stereotypisk tilfelle i en spesifikk kategori. Desto mer likheter mellom de to, jo større sannsynlighet for at fenomenet vurderes som tilhørende i kategorien.

I tillegg kommer problemer med håndtering av hendelser med liten sannsynlighet: Mangel på presisjon er typisk et problem ved evaluering av hendelser på nedre del av sannsynlighetsskalaen, typisk mindre enn 1/100. [12].

## **6.2 Diskusjon om usikkerhet**

### **6.2.1 Usikkerhet i inndata vurdert mot sensitivitet**

I diskusjonen i kapittel 4 ble det konkludert med at dersom det gjøres små endringer i en eller flere faktorer, kan dette gi betydelig utslag resultatet (overtrykket). Det ble også vist at det varierer fra faktor til faktor, hvilket utslag endringer gir på resultater. Dette er nyttig informasjon, men den må ses i sammenheng med hvor sikre en er på den verdien som benyttes for den enkelte faktor.

Dersom det ligger usikkerhet i den verdien som benyttes for en faktor, vil eksplosjonsberegningens sensitivitet i forhold til denne faktoren være av betydning. Gitt at eksplosjonsberegningen er relativt sensitiv for en faktor (små endringer i faktoren gir utslag av betydning i resultatet), og det ligger usikkerhet i verdien som benyttes for denne faktoren, vil også resultatet av eksplosjonssimuleringen bli usikkert.

I motsatt tilfelle, der en er sikkert på verdien som benyttes for en faktor, vil ikke eksplosjonsberegningens sensitivitet ovenfor denne faktoren ha betydning. Det spiller ingen rolle at endringer i faktorens verdi gir betydelige utslag i resultatet til eksplosjonsberegningen, når en uansett er sikker på at verdien som benyttes for faktoren er korrekt.

Som vist i figur 4.13 i kapittel 4.3.4, kan samspill forsterke overtrykket utover det som summen av enkeltfaktorene tilsier. I tilfeller der eksplosjonssimuleringen baserer seg på flere faktorer som er usikre og som den i tillegg er sensitiv ovenfor, vil usikkerheten i resultatet også bli påvirket av effekten av samspillet mellom faktorene.

## 6.2.2 Usikkerhetsmomenter i metoden

Dette kapitlet diskuterer usikkerhetsmomenter i metoden som ble presentert i kapittel 5.1.

Ved definering av antall scenarioer er det flere momenter det må tas hensyn til. Antall scenarioer er lik alle mulige kombinasjoner av verdier for parameterne som benyttes. Dette betyr at desto flere verdier som benyttes for hver enkelt parameter, og desto flere parametre som inkluderes, jo større vil antallet scenarioer bli. Dette innebærer at en viss kategorisering av verdiene som benyttes for parameterne må gjøres for å redusere det totale antall scenarioer. Reduseringen gjøres for å begrense resursbruken. Her er det viktig at antall verdier for hver parameter er på et forsvarlig nivå, dvs. at det antall verdier som benyttes lar seg rettferdiggjøre. For hver reduksjon i antall verdier/parametre som gjøres vil nøyaktigheten også bli redusert. I forhold til å definere at antall scenarioer blir det viktig å gjøre en vurdering av hvor mye en ønsker å redusere resursbruken på bekostning av nøyaktigheten.

For å finne størrelsen på støkiometriske gasskyer, brukes det en gjennomsnittsfaktor på gasskyene fra alle scenarioene kalkulert i ASAP. Gjennomsnittsfaktoren er basert tidligere erfaringer og viser seg å passe godt for alle moduler og lekkasjeparametre. Metoden anslår at innvirkningen av lokal design har liten betydning på denne faktoren. Denne gjennomsnittsfaktoren brukes fordi det er for resurskrevende å kjøre CFD-modellering på alle scenarioene. Bakdelen med denne fremgangsmåten henger sammen med at gasskonsentrasjonen i ulike gasskyer varierer og dette vil igjen gi utslag i størrelsen på en ekvivalent støkiometrisk gassky. Ved å bruke en gjennomsnittsfaktor vil ikke de ekstreme tilfellene bli tatt med. Resultatet er at det som ville ha blitt de største og de minste støkiometriske gasskyene ikke blir tatt hensyn til. De minste er av liten interesse, men de største er derimot av betydning.

I neste steg velges det en støkiometrisk gasskystørrelse for hvert fyllingsgradintervall fra ASAP. Det innebærer at et fyllingsgradintervall, for eksempel 15-25 %, nå skal representeres av med en støkiometrisk gasskystørrelse. Det brukes en middelverdi slik at fyllingsgradintervallet 15-25 % representeres av en ekvivalent støkiometrisk

gassky (ved bruk av gjennomsnittsfaktoren) for fyllingsgrad 20 %. Igjen ser en at fremgangsmåten ikke tar hensyn til de ekstreme tilfellene. Denne gangen vil de ekstreme tilfellene i hvert fyllingsgradintervall bli utelukket. Dette gir en gjennomsnittsverdi for hvert fyllingsgradintervall, og om en ser på alle intervallene samlet er dette en grei framgangsmåte, bortsett fra at en mister de ekstreme verdiene ytterst i det første og siste intervallet. Igjen er det de store verdiene som er av betydning, altså ekstremverdiene ytterst i det største fyllingsgradintervallet.

Når det gjennomføres eksplosjonssimuleringer (i FLACS) fokuseres det i hovedsak på de gasskystørrelsene som gir eksplosjonstrykk rundt DAL (Design Accident Load) for de forskjellige modulene. Det gjennomføres nok simuleringer til at det kan utarbeides en eksplosjonsfrekvenskurve, der en kan se frekvensen for overskridelse av DAL. Når en ser at eksplosjonssimuleringene har fokus rettet mot området rundt DAL, altså de store verdiene, er det til dels problematisk at de mest ekstreme verdiene er blitt utelukket (gjennom bruk av gjennomsnittsfaktor og en gasskystørrelse per fyllingsgradintervall). Dette resulterer i at de mest ekstreme utfallene ikke representeres i eksplosjonsfrekvenskurven. Et annet punkt som burde tas hensyn til er at metoden to ganger på rad utelukker de mest ekstreme verdiene. På den annen side er det slik at ekstreme hendelser har lav sannsynlighet, og dermed ikke gir store utslag på eksplosjonsfrekvenskurven.

Hvorvidt en bør inkludere de ekstreme hendelsene, slik at de gir utslag i eksplosjonsfrekvenskurven, må vurderes i sammenheng med hvor en befinner seg i forhold til RAK. Hvis RAK for eksplosjon overskrides, betyr det at DAL må økes, eller at en på andre måter må redusere eksplosjonsrisikoen. Bruk av RAK diskuteres i kapittel 6.3, men for å illustrere en problemstilling tas det utgangspunkt i en situasjon der RAK alene avgjør om det er godt nok eller ikke: Sett at eksplosjonsfrekvenskurven viser at en havner rett under RAK. I en slik situasjon der "alt" bestemmes av RAK, burde en også undersøke om ekstremverdiene gir såpass utslag dersom de inkluderes, at RAK overskrides.

Generelt burde ikke risikoanalyser tilskrives så stor nøyaktighet at det kan fattes beslutninger om at risikoen er lav nok når risikonivået ligger nært grensen for utolerbar risiko. Dersom risikonivået havner nært en grense som utløser økt DAL eller andre risikoreducerende tiltak, burde heller noe av dette utføres i stede for å finregne for å se om en havner innenfor grensen.

I forhold til at ekstreme verdier ikke representeres i eksplosjonsfrekvenskurven, burde dette uttrykkes eksplisitt slik at beslutningstakere er klar over det. Det samme gjelder for andre usikkerhetsmomenter og for eventuelle reduksjoner i nøyaktigheten som følger av at antall verdier for parametere reduseres.

## 6.3 Bruk av RAK

Som nevnt tidligere har eksplosjonsvedlegget til hensikt å finne eksplosjonsrisikoen, der eksplosjonsrisiko er definert som frekvens for overskridelse av DAL.

Risikoakseptkriteriet knyttet til dette er for eksempel at eksplosjonsrisikoen skal være mindre en  $1 \times 10^{-4}$  per år. Fordelen ved å bruke et slikt RAK for eksplosjonsrisiko er at en lett kan måle endringer i eksplosjonsrisikoen etter hvert som designet endres.

Denne type RAK er også godt kjent og en innarbeidet praksis i næringen. NORSOK Z-013 legger også opp til bruk av denne type RAK.

Bakdelen med bruk av denne type RAK, er at hovedfokuset i for stor grad kan bli rettet mot å oppfylle RAK. Når risikoanalysen viser at en er innenfor RAK, gjøres det lite for å ytterligere redusere risikoen. I så måte blir risikoanalysen bare et verktøy for å bekrefte at RAK er oppfylt.

Et annet moment rundt RAK er at det gir mulighet for en mekanisk beslutningsprosess. Med dette menes det at beslutningen om at risikonivået er redusert tilstrekkelig, fattes i det RAK er oppfylt. Dette kan lede til at beslutninger tas på lave ledernivåer, og at beslutningene som fattes at toppledelsen ikke bygger på all tilgjengelig informasjon, men kun det som har sluppet i gjennom de andre ledernivåene. Om dette er et positivt eller negativt moment ved RAK, avhenger av hva en er ute etter. Det gir en enkel beslutningsprosess, men samtidig utelukker det mulighetene for bedre alternativer.

Dersom en ser på dette i sammenheng med myndighetenes krav slik de er uttrykt i Rammeforskriften, ser en at dette ikke er en hensiktsmessig fremgangsmåte i forhold til prinsippene for risikoreduksjon. Fra Rammeforskriften: Ved reduksjon av risiko skal den ansvarlige velge de tekniske, operasjonelle eller organisatoriske løsningene som etter en enkeltvis og samlet vurdering av skadepotensialet og nåværende og fremtidig bruk gir de beste resultater, så sant kostnadene ikke står i et vesentlig missforhold til den risikoreduksjonen som oppnås.

Hvis en antar at beslutningsprosessen er tilnærmet slik som nevnt over, altså at arbeidet med risikoreduksjon avsluttes eller reduseres når RAK er oppfylt, så sammenfaller det dårlig med Rammeforskriftens prinsipp for risikoreduksjon. Sett fra en annen side, så er det mulig å oppnå et "lavt" risikonivå uten å følge prinsippene for risikoreduksjon, men da må RAK være tilsvarende lavt.

Aven og Vinnem (2007) gjør en sammenligning mellom RAK benyttet i Norge og ALARP praksisen i Storbritannia. Denne praksisen innebærer at risikoen kategoriseres i tre grupper: En der risikoen er så lav at den er neglisjerbar, en der risikoen er så høy at den er utolererbar, og den siste gruppen der risikoen er på et mellomnivå og der ALARP prinsippet anvendes. Sammenligningen sier da at RAK som benyttes i Norge er typisk lavere enn grensen for hva som er utolererbart og

høyere enn grensen for det som er neglisjerbart. Men at tendensen er at RAK defineres nært grensen for det som er utolererbare nivåer.[14].

Hvis en da antar at RAK ligger nært grensen for det som er utolererbart, og at arbeidet med risikoreduksjon stanses/reduseres når RAK er oppfylt. Så ser en at denne praksisen ikke samsvarer med intensjonene i Rammeforskriften. Hadde disse intensjonene blitt fulgt, ville det blitt lagt ned mer arbeid for å videre redusere risikoen. ALARP prinsippet betyr at risikoen skal reduseres så lenge det ikke er betydelig missforhold mellom kostnadene og risikoreduksjonen som oppnås. Dersom arbeidet med å redusere risikoen stanser/reduseres når RAK er oppfylt, kan en anta at løsninger som kunne ha redusert risikoen ytterligere ikke alltid blir tiltrekkelig utforsket. Det kan godt være at mange potensielle løsninger ville blitt for kostbare i forhold til risikoreduksjonen de gir, men på den annen side vil det også være løsninger som samsvarer med ALARP prinsippet. Poenget er at ved å stanse søken etter risikoreducerende tiltak når RAK er oppfylt, så innebærer dette at beslutningen må fattes uten at alle alternativer er kartlagt.

I en ideell situasjon burde beslutningene som fattes, blir tatt ut i fra et ønske om å oppnå den beste løsningen, og der det tas hensyn til alle influerende faktorer. Det vil alltid være fordeler og ulemper ved en løsning, derfor er det viktig å kartlegge alle kjente fordeler og ulemper, og i tillegg usikkerhetsmomenter ved løsningen. Når en da har flere alternativer å velge mellom og kjenner til fordelene og ulempene ved dem, vil det bli opp til ledelsen å velge hvilken løsning som er den beste. Dette står i kontrast til det som er nevnt tidligere om mekaniserte beslutningsprosesser og stans i søken etter risikoreduksjon når RAK er oppfylt.

## 7 Forslag til forbedringer og konklusjon

### 7.1 Forslag til forbedringer

I dette kapitlet presenteres forslag til forbedringer og andre forhold som er viktige å belyse.

#### 7.1.1 Opplæring/bevisstgjøring om fallgruver og problemer

I kapittel 6.1.2.4 ble det beskrevet vanlige fallgruver ved tildeling av sannsynligheter, disse bør det være fokus på i arbeidet med risikoanalyser. Ved bevisstgjøring og opplæring av personer som skal jobbe med risikoanalyser, og da spesielt de som skal predikere sannsynligheter, vil en kunne unngå disse fallgruvene. Når personene som jobber med risikoanalysene er trente i å gjenkjenne fallgruvene, vil de kunne avdekke og unngå feil i eget og andres arbeid.

#### 7.1.2 Historiske data

I forhold til bruk av historiske data, må fokuset være på å benytte kun relevante data. En fremgangsmåte etter det prediktive perspektivet på risiko bør benyttes. Der legges det til grunn at kun relevante data tas med i vurderingen når en risikoanalytiker predikere en sannsynlighet for en fremtidig hendelse. Det er heller ikke slik at prediksjonen avhenger kun av relevante historiske data, men også av analytikerens kunnskap og grad av tro om det fremtidige utfallet av hendelsen. Som nevnt tidligere blir ikke den predikerte sannsynligheten usikker, men den reflekterer analytikerens usikkerhet.

Det bør utøves forsiktighet med for mye vektlegging av historiske data når en står ovenfor en beslutning om å velge en løsning basert gammel eller ny teknologi. For de gamle løsningene har man gjerne et stort erfaringsgrunnlag, og usikkerheten knyttet til denne løsningen kan være lav. For den nye teknologien finnes det lite erfaringsgrunnlag, men usikkerheten kan være større siden teknologien er lite utprøvd. BAT (Best Available Technology) burde legges til grunn i slike tilfeller. Dvs. at en baserer seg på bruk av beste tilgjengelige teknologi. Da må en vurdere den nye teknologien ut i fra hvilke forbedringer den gir kontra den gamle, og hvilke usikkerhetsmomenter den representerer.

#### 7.1.3 Sensitivitetsanalyse

I forhold til definering av antall scenarioer i metoden (se kapittel 5.1.1, 5.2.1 og 6.2.2) burde det gjennomføres en sensitivitetsanalyse for å kartlegge hvilke parametre som har stor betydning. I de tilfellene der det viser seg at en parameter har stor betydning, kan det være grunnlag for å øke antall verdier for denne parameteren og dermed øke nøyaktigheten. Ved å kombinere resultatene fra sensitivitetsanalysen med en

analyse av kilder til usikkerhet for parameterne, kan en bruke dette for å avgjøre detaljnivået (antall verdier) som skal benyttes for hver parameter.

#### **7.1.4 Synliggjøring av usikkerhet og begrensinger**

Usikkerheten underveis i prosessen må eksplisitt uttrykkes, og være en del av det endelige produktet som legges til grunn for å fatte beslutninger om hvilke alternativer som skal velges. Usikkerhetene skal altså presenteres for lederne som skal fatte beslutningene. Da må ledelsen i sine vurderinger ta hensyn til de usikkerhetene som er identifisert, og avgjørelsen kan da fattes på et best mulig grunnlag.

I tilfeller der en har lite kunnskap om et fenomen, bør en forsøke å redusere usikkerheten ved å skaffe mer kunnskap dersom det er mulig. Som nevnt tidligere er generelt den forventede verdien av økt kunnskap større, jo større usikkerheten er.

Det er viktig at det ikke bare fokuseres på å uttrykke usikkerheten for de som skal fatte de endelige beslutningene, men også for beslutningstakere underveis i prosessen. Ofte er det slik at beslutninger ikke fattes av en person på et gitt tidspunkt, men at beslutningen involverer mange aktører over en lengre tidsperiode. Dersom usikkerheten til en hver tid er eksplisitt uttrykt, vil en analysedel være mer anvendelig ved at den lar brukeren se usikkerhetene og begrensinger som ligger til grunn for konklusjoner som er tatt. Dermed blir usikkerheter og begrensninger tatt med i vurderingen etter hvert som sammenhengen endrer seg i den pågående beslutningsprosessen.

Synliggjøring av usikkerheter og begrensninger er gjeldene for det som ble diskutert (i kapittel 6.2.2) om usikkerhetsmomenter i metoden. Her ville det vært aktuelt å synliggjøre hvordan nøyaktigheten blir påvirket av begrensinger i antall verdier som benyttes for parametrene. På samme måte må det synliggjøres at metoden utelukker ekstremverdier som ville ha påvirket eksplosjonsfrekvenskurven.

#### **7.1.5 Bruk av RAK**

I forhold til eksplosjonsvedleggets formål om å finne eksplosjonsrisikoen, er det nyttig med en målestokk å forholde seg til. De risikoakseptkriterier som benyttes i dag, er en slik målestokk, men de kan også som nevnt bli selve målet. I forhold til Rammeforskriftens prinsipper for risikoreduksjon er ikke tilstrekkelig å sette seg et mål (RAK) og så stanse arbeidet med risikoreduksjon når målet er nådd. Risikoreduksjonen skal fortsette til det er et vesentlig missforhold mellom kostnadene og risikoreduksjonen som oppnås. Nedenfor presenteres forslag til hvordan prosessen kan gjennomføres.

Når det gjelder risikoreduksjon må fokuset være på bruk av ALARP prinsippet. Det må legges ned mye arbeid i å kartlegge alternative løsninger og deres tilhørende fordeler, ulemper og usikkerhetsmomenter. Unngå mekaniserte beslutninger ved at

beslutningene fattes på høyt ledernivå og er basert på all tilgjengelig informasjon. Risikoreduserende løsninger implementeres så lenge det ikke er vesentlig missforhold mellom kostnaden og risikoreduksjonen. I forhold til RAK, presenteres to forslag:

1. RAK lik det som benyttes i dag beholdes fordi det er velkjent og lett å forholde seg til. Det må klargjøres for alle ledd i risikostyringsprosessen at RAK ikke er målet, men det største risikonivået en kan akseptere. Det må og presiseres at målet er risikoreduksjon gjennom ALARP prinsippet.
2. RAK benyttes ikke. I stede benyttes en overordnet målsetting om at risikoen skal reduseres så langt som ALARP prinsippet tillater.

Kommentar til forslagene: Begge er ute etter samme sluttprodukt, men har forskjellig håndtering av endringen fra dagens praksis. Ved å fortsatt beholde RAK, er faren at det blir vanskelig å endre praksisen, ettersom dette forslaget egentlig er holdningsendring innenfor dagen rammer. Dersom en går helt bort i fra å bruke RAK, vil det antagelig være lettere å implementere (holdnings-)endringene, men samtidig vil det være mer resursskrevende.

Dersom en på tross av det som ble diskutert i kapittel 6.3 og det som er nevnt ovenfor, velger å bruke en fremgangsmåte der RAK alene er kriteriet for å avgjøre om noe er godt nok, bør en ta hensyn til følgende: Risikoanalyser bør ikke tilskrives så stor nøyaktighet at det vurderes som godt nok dersom risikonivået havner på eller rett under RAK. I forhold til det som ble diskutert angående metoden, bør en da (hvis en havner nært RAK) se på hvilket utslag ekstremverdiene gir dersom de inkluderes. Det burde også gjøres en vurdering av om nøyaktigheten er godt nok, i forhold til at det gjøres begrensinger i antall scenarioer.

## 7.1.6 Beslutningsprosessen

Under kapittel 7.1.1 nevnes det kort om beslutningsprosessen som en innledning til forslag angående bruk av RAK. I det som følger vil det bli gitt nærmere forslag til beslutningsprosessen.

Som allerede nevnt bør beslutninger om valg av løsninger og lignende fattes på høyt ledernivå og følge ALARP prinsippet. Valget står gjerne mellom flere alternative løsninger. Det er da viktig at all tilgjengelig informasjon om alternativene tas med i vurderingen.

Dette er informasjon om fordeler, ulemper og usikkerhetsmomenter tilknyttet alternativet. I tillegg kommer informasjon om antagelser og begrensinger som er gjort i analyser. Så må det også tas hensyn til at resultater fra analyser gjelder for modeller, altså forenklinger av den virkelige verden.[14].

Når denne informasjonen er tilgjengelig for alle alternativene, kan ledelsen gjøre en sammenligning av alternativene og avgjøre hvilket som er det beste.

## 7.2 Konklusjon

I oppgaven er det utført en studie av regelverk, faktorer, metodikk og håndtering av usikkerhet i forbindelse med eksplosjonsberegning for offshoreinstallasjoner.

Eksplosjoner er kompliserte fenomener som påvirkes av mange faktorer, og for å få håndterbare datamengder gjøres det forenklinger og antagelser i eksplosjonsberegningmetoden. I tillegg er det usikkerhetsmomenter knyttet til verdiene som benyttes for faktorene. Det er viktig at forenklinger, antagelser og usikkerhet blir eksplisitt uttrykt gjennom hele risikoanalyseprosessen. Da vil det være mulig å vurdere disse sammen med foreløpige resultater, samme hvilket steg i prosessen en befinner seg på.

En sensitivitetsanalyse burde gjennomføres for de faktorene som er med i eksplosjonsberegningmetoden. Ved å kombinere resultater fra sensitivitetsanalysen med en analyse av kilder til usikkerhet for faktorene, kan en sørge for at hver faktor i eksplosjonsberegningmetoden blir tildelt rett detaljnivå (antall verdier benyttet for hver faktor). Dette vil bidra til at metodens nøyaktighet havner på et fornuftig nivå i forhold til usikkerheten knyttet til faktorene.

Beslutninger om valg av løsning burde fattes på høyt ledernivå, og for å oppnå best mulig løsninger er det viktig at beslutninger fattes på bakgrunn av en fullstendig vurdering av tilgjengelige alternativer. Vurderingen må ta for seg fordeler, ulemper og usikkerhetsmomenter ved alternativene. Samtidig må det tas hensyn til antagelser, begrensinger og det faktum at analyser gir resultater for modeller, altså forenklinger av den virkelige verden.

Arbeidet med risikoreduksjon skal følge ALARP-prinsippet, og i den sammenheng burde en være oppmerksom på mulige problemer i forbindelse med bruk av RAK. Bruk av RAK (risikoakseptkriterier) kan lede til mekaniserte beslutningsprosesser og at arbeidet med risikoreduksjon avsluttes eller trappes ned når RAK er oppfylt. Dersom bruk av RAK vanskeliggjør etterlevelse av ALARP-prinsippet burde det innføres en alternativ fremgangsmåte, der en for eksempel bruker overordnede mål i stede for RAK.

1. Ptil. *Rammeforskriften*. Available from:  
<http://www.ptil.no/rammeforskriften/category381.html>.
2. Aven, T., *Risikostyring: grunnleggende prinsipper og ideer*. 2007, Oslo: Universitetsforl. 180 s.
3. Centre, N.T., *NORSOK STANDARD Z-013N Rev. 2, September 2001. Risiko- og beredskapsanalyse*. 2001.
4. Bjerketvedt, D., J.R. Bakke, and K. van Wingerden, *Gas explosion handbook: version 1.2*. 1993, Fantoft: Cristian Michelsen Research. 209 s.
5. Vinnem, J.E., *Offshore risk assessment: principles, modelling and applications of QRA studies*. 2007, London: Springer. XXV, 577 s.
6. Security, F.F.E.M.A.U.S.D.o.H., *Primer to Design Safe School Projects in Case of Terrorist Attacks*. 2003.
7. Kuchta, J.M., *Investigation of fire and explosion accidents in the chemical, mining, and fuel-related industries*. Bulletin/U.S. Dept. of the Interior. Bureau of Mines; 680, 1985.
8. (Gexcon), J.R.B., *Forelesningsnotater Teknisk Sikkerhet (MOS230 - UIS)*. 2009.
9. Sintef, S.R.M.a., *Handbook for Fire Calculations and Fire Risk Assessment in the Process Industry*. 2003.
10. *Kompresjonsfaktor bilde*. Available from:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Diagramma\\_generalizzato\\_fattore\\_di\\_compressibilit%C3%A0.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Diagramma_generalizzato_fattore_di_compressibilit%C3%A0.jpg)
11. Gexcon. Available from:  
[http://www.gexcon.com/handbook/GEXHBchap7.htm#sect7\\_2](http://www.gexcon.com/handbook/GEXHBchap7.htm#sect7_2).
12. Aven, T., *Foundations of risk analysis: a knowledge and decision-oriented perspective*. 2003, Chichester: Wiley. XV, 190 s.
13. Morgan, M.G., M. Henrion, and M. Small, *Uncertainty: a guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis*. 1990, Cambridge: Cambridge University Press. XII, 332 s.
14. Aven, T. and J.E. Vinnem, *Risk management: with applications from the offshore petroleum industry*. 2007, London: Springer. XII, 200 s.