

Retningslinjer for kvantitative risikovurderinger for anlegg som håndterer farlig stoff

Rapport til:
Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB)



Sammendrag

Retningslinjer for kvantitative risikovurderinger for anlegg som håndterer farlig stoff

Sikkerhetsklassifisering for dette dokument: Distribute only after client's acceptance

Rapportnr: 106535/R1 Revisjon: Sluttrapport A Dato: 18. oktober 2017

Utarbeidet av: Ane Kristiansen/Jan Pappas/
Henning Henriksen
Overingeniør/sjefingeniør/sjefingeniør

Gransket av: Joar Dalheim
Sjefingeniør

Godkjent av: Kristina Drage-Arianson
Avdelingsleder

Firmanavn og adresse:
Lloyd's Register Consulting - Energy AS
Postboks 376, Skøyen
0213 OSLO

Kundenavn og adresse:
Direktoratet for samfunnssikkerhet og
beredskap (DSB)
Rambergveien 9
3115 TØNSBERG

Kontaktperson:
Joar Dalheim
T: 952 41 750
E: joar.dalheim@lr.org

Kontaktperson kunde:
Jan G. Røed
T: 924 48 153
E: jan.roed@dsb.no

Lloyd's Register Group Limited, dets datterselskaper og tilknyttede selskaper og deres respektive tillitsmenn, ansatte og representanter omtales i denne bestemmelse enkeltvis eller samlet som "Lloyd's Register". Lloyd's Register påtar seg intet ansvar og kan ikke holdes ansvarlig av noen person for tap, skader eller utgifter som følge av opplysninger eller råd gitt i dette dokument eller på annen måte, med mindre vedkommende har undertegnet en kontrakt med det relevante foretak i Lloyd's Register om å gi slike opplysninger eller råd; i så tilfelle er ansvaret begrenset til de vilkår som er fastsatt i nevnte kontrakt.
©Lloyd's Register 2017.

Dokumentrevisjoner

Revisjon	Dato	Beskrivelse / endringer	Endringer utført av
Høringsutkast	12.04.2017		
Eksternt høringsutkast	28.04.2017	Kommentarer fra DSB implementert	Joar Dalheim/Jan Pappas
Sluttrapport	04.09.2017	Kommentarer fra industrien vurdert og implementert	Joar Dalheim/Jan Pappas
Sluttrapport A	18.10.2017	Presiseringer fra DSB inkludert. Tydeliggjøring av dødelighet fra CO2	Joar Dalheim/Jan Pappas

Forkortelser

CFD	Computational Fluid Dynamics
LOC	Loss Of Containment (tap av innhold)
FAR	Fatal Accident Rate (antall drepte pr. 100 millioner eksponerte arbeidstimer)
LFL	Lower Flammable Limit (nedre brennbarhetsgrense)
LEL	Lower Explosive Limit (nedre eksplosjonsgrense)
PLL	Potential Loss of Life (forventet antall omkomne pr. år)
UFL	Upper Flammable Limit (øvre brennbarhetsgrense)
UEL	Upper Explosive Limit (øvre eksplosjonsgrense)
QRA	Quantitative risk assessment (kvantitativ risikoanalyse)
AEGL	Acute Exposure Guideline Levels
EPA	United States Environmental Protection Agency
HAZOP	Hazard and operability study
HAZID	Hazard Identification
ISO 17776:2000	Petroleums- og naturgassindustri Produksjonsinstallasjoner til havs, Retningslinjer for verktøy og metoder for fareidentifikasjon og risikovurdering

Innholdsfortegnelse

Side

1	Innledning	1
1.1	Forord	1
1.2	Formål	1
1.3	Overordnede prinsipper	2
1.4	Utvalg av innhold	3
1.5	Definisjoner	3
2	Planlegging	5
2.1	Etablere kunnskap om anlegget	6
3	Risikoanalyse	6
3.1	Identifikasjon av farer, uønskede hendelser og barrierer	6
3.2	Etablere topphendelser	6
3.3	Analyse av hyppighet for topphendelser	7
3.4	Analyse av lekkasje og spredning	11
3.5	Analyse av tenning	15
3.6	Analyse av eksplosjoner	18
3.7	Analyse av branner	21
3.8	BLEVE og andre hendelser	22
3.9	Etablere risikokonturer	24
3.10	Beskrivelse av usikkerheter	34
4	Tålegrenser	34
4.1	Betydningen av tålegrenser for risikokonturene	34
4.2	Anbefalte tålegrenser	36
5	Konsekvensbaserte hensynssoner	39
5.1	Hensynssoner basert på eksplosjonslaster	39
5.2	Hensynssoner basert på brannlaster	40
6	Presentasjon av resultatene	40
6.1	Kommunikasjon av små frekvenser	40
6.2	Resultater og mellomresultater	41
6.3	Hensynssoner og individuell risiko	44
7	Scenarier for beredskapshensyn	44
8	Referanser	44

Vedlegg A - Sjekkliste for virksomheten og ledeord for kartlegging av en risikoanalyse

1 Innledning

1.1 Forord

Denne rapporten er utarbeidet av Lloyds Register for DSB. Foreløpig anbefaler DSB å benytte rapporten som veiledende retningslinjer i virksomhetenes arbeid med risikovurderinger for beregning av risikokonturer. Rapporten som nå foreligger er mer detaljert enn hvordan vi ser for oss at de endelige retningslinjene skal presenteres. Dette skyldes dels at vi har ønsket at forslagene er begrunnet, dels at vi for egen del ser behov for nærmere forklaringer til deler av innholdet.

DSB vil rette en stor takk til alle som har bidratt til denne rapporten. Vårt arbeidsmøte i desember 2016 med bred deltagelse fra industri, konsulenter og utviklere samt myndigheter, viste at det er et omforent behov for slike retningslinjer. Formål, innhold og rammer ble diskutert på møtet som dannet et grunnlag for ett rapportutkast som ble sendt på høring i mai/juni 2017. Vi fikk relativt mange kommentarer og forslag til endringer. Det er i etterkant gjort en oppsummering av kommentarene med tilbakemeldinger og vurderinger.

Vi ønsker at retningslinjene som nå foreligger blir tatt aktivt i bruk, og at vi kan vinne erfaringer fra praktisk bruk og videre utvikling av metoder og verktøy for beregning av risikokonturer. Vi vil gjerne ha kommentarer og tilbakemeldinger på erfaringer med bruken av retningslinjene. DSBs mål er etter hvert å komme med mer konkrete og spesifikke retningslinjer som er sterkere knyttet til regelverket.

Vi oppfordrer brukermiljøene til løpende å sende inn kommentarer til postmottak@dsb.no.

1.2 Formål

Retningslinjene er tenkt benyttet ved utarbeidelse av kvantitative risikovurderinger hvor hensikten er å beregne risikokonturer rundt anlegg som håndterer farlig stoff. Risikokonturene vil være utgangspunkt for fastsettelse av hensynssoner i arealplaner. Selv om det foreligger standarder og internasjonalt anerkjente metoder for kvantitative risikoanalyser er det erkjent at det er betydelige usikkerheter knyttet til beregning av denne type risikokonturer. DSB har derfor sett behov for å utarbeide nærmere retningslinjer for slike beregninger.

Formålet med retningslinjene er å redusere tilfeldige variasjoner i resultatene som følge av datagrunnlag og metode. For øvrig er det en målsetning at retningslinjene skal bidra til at risikovurderingene blir utført på en slik måte at de blir forstått, kan verifiseres, gjenskapes og sammenlignes, uavhengig av hvilke verktøy som er benyttet og hvem som har gjort vurderingene.

Retningslinjene må ses i sammenheng med temarapport (2013), ref. /1/, og veileder om sikkerheten rundt storulykkevirksomheter (2017), ref. /2/, som begge er utgitt av DSB.

Temarapporten (2013) redegjør for det forvaltningsmessige grunnlaget og gir kriterier for akseptabel risiko for befolkningen i områder rundt anlegg som håndterer farlig stoff, herunder kriteriet om at risikoen skal være redusert til et nivå som med rimelighet kan oppnås (ALARP). Prinsippene for utforming av kriteriene er beskrevet i temarapporten, og retningslinjene for kvantitative risikovurderinger er utformet i tråd med disse prinsippene.

Veilederen (2017) er primært utarbeidet for kommunene til bruk i arealplanlegging og styring av risiko i områdene rundt storulykkevirksomheter. Den setter også andre prosesser etter DSBs sektorlovgivning (samtykker og tillatelser) inn i et arealplanperspektiv. Veilederen omhandler bruk av hensynssoner ved følgende problemstillinger:

1. Opprettholde forsvarlig avstand til befolkningen rundt storulykkevirksomheter
2. Nye tiltak (endringer) i omgivelsene rundt storulykkevirksomheter
3. Etablering av ny storulykkevirksomhet og nye tiltak (endringer) i storulykkevirksomheter

I henhold til storulykeforskriften har virksomhetene plikt til å fremskaffe informasjon om sin risiko til kommunene. Det framgår ikke eksplisitt av kravene i regelverket at virksomhetene skal beregne risikokonturer, men både temarapporten (2013) og veilederen (2017) baserer seg på bruk av risikokonturer som grunnlag for etablering av hensynssoner rundt storulykevirksomheter.

Hensynssoner benyttes i planprosesser etter plan- og bygningsloven som et styringsverktøy for å redusere risiko rundt storulykevirksomheter. Til hensynssonene blir det fastsatt bestemmelser. Det er planbestemmelsene som beskriver restriksjonene, hensynssonene angir kun hvilke områder bestemmelsene gjelder for og hvilken type fare som det skal tas hensyn til. Relevante bestemmelser kan være vilkår for arealbruk (forbud mot eksempelvis boligbebyggelse m.v.) rekkefølgebestemmelser, krav om detaljregulering og krav om nærmere undersøkelser før gjennomføring av tiltak.

Risikostyringen i omgivelsene rundt en virksomhet gjøres med andre ord primært gjennom kommunens praktisering og håndheving av planbestemmelser til hensynssoner i gjeldende arealplaner. Mens risikostyringen i virksomhetene som håndterer farlig stoff er regulert i brann- og eksplosjonsvernloven, og forutsatt ivaretatt gjennom tekniske og organisatoriske tiltak eventuelt i kombinasjon med arealmessige begrensninger. Retningslinjene fokuserer ikke på detaljer rundt risikobildet inne på selve anlegget og hvordan dette skal vurderes.

Det er imidlertid viktig å merke seg at det ikke blir tatt beslutninger om hensynssoner med tilhørende planbestemmelser direkte på bakgrunn av virksomhetenes beregninger av risikokonturer, men at disse utgjør et vesentlig informasjonsgrunnlag for arbeidet med arealplaner der storulykerisiko er relevant. Praktisk sett blir virksomhetenes risikoanalyser ofte benyttet som sakkyndige utredninger som underlag for de mer generelle ROS-analysene som følger selve planarbeidet.

Arbeidet med retningslinjene er i hovedsak begrunnet utfra innarbeidet bruk av risikokonturer for storulykevirksomheter jf. veileder (2017), men retningslinjene er likevel utformet generelt for anlegg som håndterer farlig stoff, uavhengig av om virksomhetene er omfattet av storulykeforskriften.

1.3 Overordnede prinsipper

Dette kapitlet beskriver prinsipper som er lagt til grunn for utforming av retningslinjene:

Risiko for omgivelsene skal vurderes ut fra den samlede aktiviteten på anlegget eller virksomheten, dvs. at alle relevante anleggsdeler, aktiviteter og hendelser skal inngå i risikovurderingene. Likeledes skal kilder til ekstern påvirkning (naturhendelser, dominoeffekter fra annen virksomhet m.v.) inngå i risikovurderingene.

Beregning av risikokonturer skal utføres og presenteres som "beste praksis" (beste tilnærming), gitt informasjonsgrunnlaget og valgt metode for risikovurderingen. I dette ligger at risikokonturene som presenteres som resultat av risikovurderingene, er vurdert å være verken "konservative" eller "optimistiske". Om man for eksempel i et forsøk på å ta høyde for usikkerhet, legger inn betydelig konservatisme på deler av vurderingene risikerer man at man i analysen mister oversikt over hvilke hendelser som bidrar mest til risiko, hvilke barrierer som er kritiske og mest effektive og man mister presisjon på de representative risikokonturene. Dette vil kunne påvirke muligheten til å gjennomføre en effektiv arealplanlegging. Risikoanalysen bør derfor benytte de mest forventede nivåer på antakelser (for eksempel forventet lekkasjefrekvens) og de mest realistiske fortolkninger av hvor langt man kan forvente at konsekvensene av de vurderte scenarioene vil strekke seg.

Det er viktig at risikovurderingene ikke baseres på forutsetninger som lett kan endres eller som man ikke har kontroll over. Dette gjelder spesielt antagelser om hvordan 3. person vil oppføre seg eller være beskyttet ved en hendelse. Det legges derfor til grunn at 3. person vil være ubeskyttet, stå i ro og ikke vil søke dekning. I realiteten vil ikke dette være tilfelle, men det vurderes som viktigere at risikokonturene som skal legges til grunn i arealplanleggingen er uavhengig av antagelser om 3. persons beskyttelse eller reaksjoner ved en hendelse. Det

samme forhold gjelder ved antagelser om aktivitetsnivået i omgivelsene og dets innvirkning på sannsynlighet for antennelse av en gassky som når ut i områder rundt et anlegg. Det er for eksempel ikke formålstjenlig at hensynssonene er avhengig av trafikk tettheten, tettheten av hus eller fritidsaktiviteter i området. Det skal som en konsekvens av dette derfor legges til grunn at en brennbar gassky som eksponerer arealer utenfor anleggets grenser, hvor det ikke er krav til tennkildek kontroll, vil bli antent.

Gjennomføring av risikoreduserende tiltak eller (andre) vesentlige endringer eller aktiviteter i anleggene, skal kunne påvirke utstrekningen av risikokonturene.

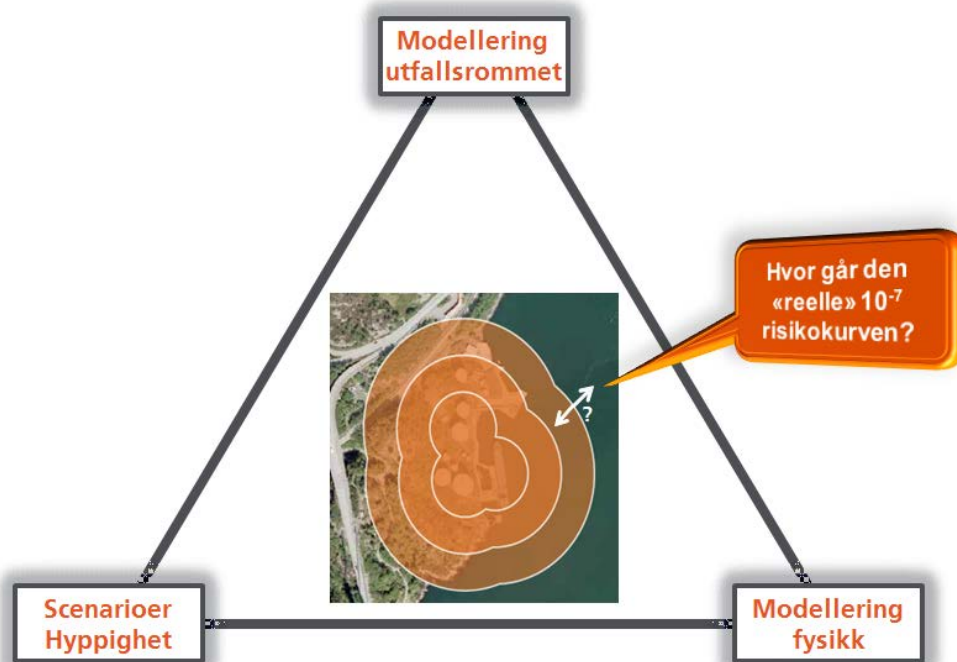
Usikkerheter knyttet til informasjonsgrunnlaget og bruk av metode skal vurderes og beskrives, men ikke kvantifiseres. Usikkerheter er omhandlet i kapittel 3.10.

1.4 Utvalg av innhold

NS 5814 ligger til grunn for retningslinjene. I hovedsak er det analysedelen av standarden det er gitt retningslinjer til og retningslinjene er ikke ment å være utfyllende for hele risikovurderingsprosessen.

Retningslinjene fokuserer i hovedsak på de faktorene som i størst grad påvirker beregning av risikokonturer jf. Figur 1.1.

For at risikoanalysene skal gi et så riktig bilde på risiko som mulig må de reflektere de faktiske forhold ved det analyserte anlegget. Det er derfor viktig å trekke inn all relevant erfaring om anlegget for å få analysemodellen tilstrekkelig realistisk. Anvendt metodikk og resultater må kunne begrunnes og forklares på en forståelig måte.



Figur 1.1 - Hoveddrivere for etablering av forventningsrette risikokonturer

1.5 Definisjoner

Nedenfor følger forklaring på noen sentrale begreper som benyttes i rapporten. Generelt henvises det til definisjoner i NS 5814:2008.

Isokontur

En isokontur er en linje eller flate gjennom alle punkter i løsningsrommet som representerer samme løsningsverdi. For eksempel så vil isokonturen gjennom alle punkter som har en frekvens for dødelig eksponering på $1E-7$ ganger pr. år representere risikokonturen som definerer ytre hensynssone i henhold til temarapporten (2013), ref. /1/.

Risikokontur

Risikokonturer er i denne rapporten benyttet for å uttrykke dødelig risiko i områdene rundt anlegg som håndterer farlig stoff. Risikokonturer beregnes ved at man kombinerer mulige ulykkeshendelser med tilhørende sannsynlighet for å omkomme dersom man oppholder seg i konsekvenssonen. Risikokonturene viser således den geografiske distribusjon av individuell risiko, ved å vise den forventede frekvens til hendelser som er i stand til å forårsake fatalitet (død) på et gitt sted, uavhengig av om det faktisk befinner seg personer på det aktuelle stedet. Det skal derfor ikke tas hensyn til tilstedeværelse av antall personer, dvs. hvor mange og hvor lenge eventuelle personer måtte befinne seg innenfor det berørte område. Hvordan tiden i probitfunksjoner skal forstås i denne sammenheng, er beskrevet i kapittel 3.9.

Hensynssone

Arealplaner skal i nødvendig utstrekning vise hensyn og restriksjoner som har betydning for bruken av areal. Dette skal markeres i arealplanen som hensynssoner med tilhørende retningslinjer og bestemmelser. Til hensynssone skal det i nødvendig utstrekning angis hvilke bestemmelser og retningslinjer som gjelder eller skal gjelde i medhold av plan- og bygningsloven eller andre lover for å ivareta det hensynet sonen viser. Hensynssoner blir med andre ord fastsatt av planmyndigheten (vanligvis kommunen) på bakgrunn av utredninger, vurderinger og høringer m.v. som ledd i den aktuelle planprosessen.

Forventningsrett

En verdi som vurderes som verken konservativ eller optimistisk. Om man for eksempel i et forsøk på å ta høyde for usikkerhet legger inn betydelig konservatisme på deler av vurderingene, risikerer man at man i analysen mister oversikt over hvilke hendelser som bidrar mest til risiko, hvilke barrierer som er kritiske og mest effektive og man mister presisjon på de representative risikokonturene. Dette vil kunne påvirke muligheten til å gjennomføre en effektiv arealplanlegging. Risikoanalysen bør derfor benytte de mest forventede nivåer på antakelser (for eksempel forventet lekkasjefrekvens) og de mest realistiske fortolkninger av hvor langt man kan forvente at konsekvensene av de vurderte scenarioene vil strekke seg. Dette prinsippet omtales i denne rapporten som å gjøre risikoanalysen forventningsrett.

Topphendelse

Gjennom en fareidentifikasjon (HAZID) vil man etablere en oversikt over alle hendelser med farepotensiale som kan inntreffe på et gitt anlegg. Noen av disse vil man av ulike årsaker (typisk lav konsekvens eller lav frekvens) ikke ta med videre i analysen. Hendelser som skal være med i risikoanalysen må defineres med et tydelig startpunkt og et slutt punkt for konsekvensberegninger. Startpunktet for slike hendelser kalles ofte for topphendelser, og er vanligvis en utilsiktet lekkasje av et farlig stoff. Topphendelsen er altså ikke den direkte eller bakenforliggende årsak til at man får en lekkasje, men selve lekkasjen. En topphendelse kan lede til flere mulige slutthendelser (alle med ulik sannsynlighet) for eksempel "ikke antent lekkasje", "brann" eller "eksplosjon". I retningslinjene er "scenario" benyttet både for slutthendelser og for et spesifikt hendelsesforløp.

Modellering av utfallsrommet

Risikokonturene summerer risikobidraget fra alle identifiserte (slutt)hendelser og strekker seg fra relativt små/hyppige til store/sjeldne. Dette gjør bildet komplekst og uoversiktlig og man bør derfor vise hvilke slutthendelser som er hovedbidragsyterne til risikokonturene.

Med utfallsrom menes alle mulige utfall en topphendelse kan ha. Eksempelvis er utfallsrommet av et terningkast lik {1, 2, 3, 4, 5, 6}. For et prosessanlegg vil utfallsrommet av en topphendelse være betydelig større; det er nærmest uendelig mange hendelser som kan inntreffe med bare små variasjoner i f.eks. lokasjon av lekkasje, retning på lekkasje, lekkasjerate, vindforhold, temperatur, atmosfæreklasse, mekaniske forhold (midlertidige obstruksjoner), tidspunkt for tenning, og så videre.

Med "å spenne ut et utfallsrom" mener vi å dekke hele eller så store deler av utfallsrommet som mulig med spesifikke scenarier slik at analysen i størst mulig grad er i stand til å fange opp alle relevante konsekvenser av topphendelsene på et anlegg.

Det er også viktig å være oppmerksom på at antallet scenarier man simulerer har stor betydning for risikokonturene (se kapittel 3.9).

2 Planlegging

En risikoanalyse skal være formålstjenlig og tilpasset graden av risiko som analyseobjektet representerer. Det er en målsetning at den utføres på en slik måte at de kan verifiseres og gjenskapes uavhengig av hvilke verktøy som er benyttet og hvem som har gjort risikovurderingen.

Gjennomføringen av en risikoanalyse følger trinnene definert i NS 5814:2008.

Risikoanalyseprosessen er ikke gjengitt i sin helhet i retningslinjene, men prosessen er oppsummert i Tabell 2.1.

Tabell 2.1 - Trinn i hovedprosessen for risikovurdering fra NS 5814:2008

	Trinn i prosessen for risikovurdering som dekkes av NS 5814:2008, ref. Figur 1 i standarden
<i>Dekkes ikke av NS 5814:2008</i>	Definere rammebetingelsene
<i>Dekkes ikke av NS 5814:2008</i>	Etablere risikoakseptkriterier
<i>Planlegging</i>	Igangsetting, problembeskrivelse og målformulering
<i>Planlegging</i>	Organisering av arbeidet
<i>Planlegging</i>	Valg av metode og datagrunnlag
<i>Planlegging</i>	Etablering av systembeskrivelse
<i>Risikoanalyse</i>	Identifikasjon av farer og uønskede hendelser
<i>Risikoanalyse</i>	Analyse av årsaker og sannsynlighet Analyse av konsekvenser
<i>Risikoanalyse</i>	Beskrivelse av risiko
<i>Risikoevaluering</i>	Sammenligning med risikoakseptkriterier
<i>Risikoevaluering</i>	Identifikasjon av mulige tiltak og deres risikoreducerende effekt
<i>Risikoevaluering</i>	Dokumentasjon og konklusjon
<i>Dekkes ikke av NS 5814:2008</i>	Risikohåndtering

2.1 Etablere kunnskap om anlegget

Vedlegg A (kapittel 1) kan benyttes ved kartlegging av anlegget og inneholder elementer ansett som viktig å få avklart i prosjektets innledende fase. Sjekkpunktene i listen vil normalt gi svar på hvilken dokumentasjon som er nødvendig for videre arbeid, samt gi føringer på forutsetninger og metodevalg.

Ved endringer og utvidelser av eksisterende anlegg er det viktig å hente inn drifts- og vedlikeholdserfaringer om anlegget. I tillegg vil dokumentasjon fra hendelser, ulykker, tilsyn, internrevisjoner etc. kunne være relevant. Den eller de som skal utarbeide analysen må ha god kjennskap til analyseobjektet og det bør gjennomføres en befaring ved oppstart av analysen, dersom de lokale forhold ikke er tilstrekkelig godt kjent.

2.1.1 Valg av tilnærming og metode

Basert på en innledende kartlegging av anleggets kompleksitet og omfang, omkringliggende forhold samt overordnede forutsetninger for oppgaven, planlegges videre aktiviteter, metode- og verktøyvalg. Alle forutsetninger og beslutninger som tas og som anses å ha konsekvens for metodevalg bør begrunnes og dokumenteres. Dette gjelder eventuelt også for senere faser i et prosjekt for å sikre sporbarhet til beslutninger som tas underveis og som har betydning for utfallet av analysen.

3 Risikoanalyse

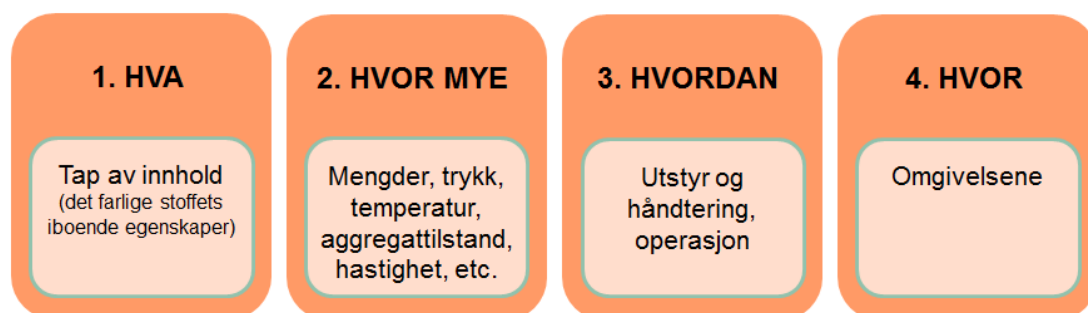
3.1 Identifikasjon av farer, uønskede hendelser og barrierer

Før det kan utføres en QRA må det gjennomføres en HAZID for å identifisere hendelsene som kan inntreffe ved virksomheten. Hendelsene behandles så i hendelsetreanalyser, bow-tie analyser eller lignende (ref. NS 5814 og ISO 17776). I tillegg til systemer og utstyr må også organisatoriske og operasjonelle forhold vurderes. Dårlig utført eller manglende vedlikehold, operatørfeil etc. kan være eksempler på årsaker og innledende hendelser som også kan være essensielle. En av risikoanalysens viktigste formål er å identifisere effektive barrierer, både forebyggende og beredskapsmessige. For å få til dette på en hensiktsmessig måte er det viktig at alle typer av årsaker og innledende hendelser er tilstrekkelig identifisert.

Eksempler på ledeord til bruk i HAZID er gitt i vedlegg A. I forberedelsesfasen vil man bryte anlegget ned i delsystemer og benytte et utvalg av relevante ledeord. Feiltreanalyser og HAZOP-rapporter eller lignende kan også benyttes som underlag i en HAZID-prosess.

3.2 Etablere topphendelser

Den som utfører risikoanalysen og HAZIDen må sammen med virksomheten bestemme hvilke topphendelser som skal omhandles i analysen. Valgene som blir gjort bør begrunnes og dokumenteres i analysen.



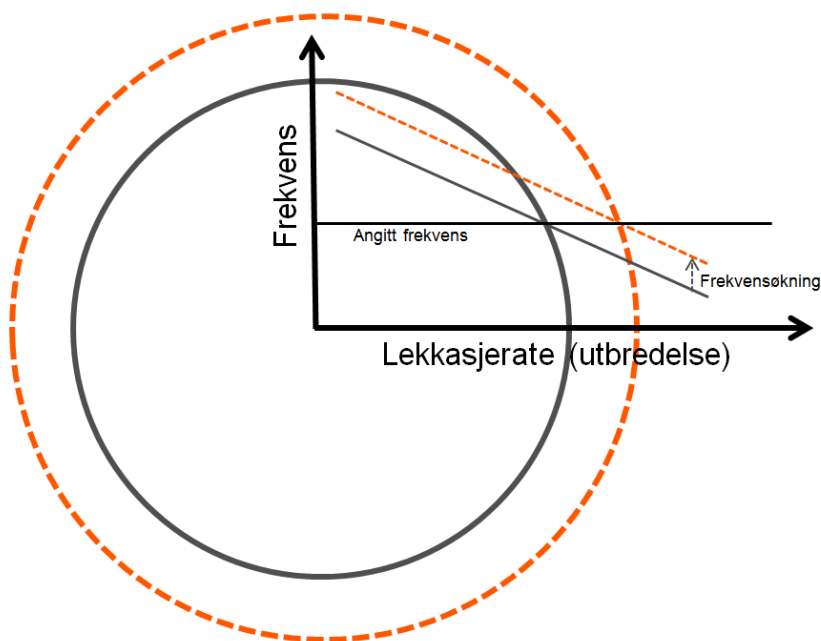
Figur 3.1 - Eksempel på spørsmål ved etablering av topphendelse

3.3 Analyse av hyppighet for topphendelser

3.3.1 Generelt

Valg av frekvens for topphendelsene vil påvirke de beregnede risikokonturene. For at risikokonturene skal bli gode, må de benyttede lekkasjefrekvensene være representative for den analyserte virksomheten. Hvis virksomheten har spesifikke og godt dokumenterte erfaringsdata for lekkasjefrekvenser som er mer relevante enn de generiske modellene bør disse benyttes. Hvis det er spesielle forhold i virksomheten som tilsier at lekkasjefrekvenser vil avvike fra de benyttede modellene kan lekkasjefrekvensene justeres forutsatt at justeringen kan dokumenteres. Menneskelige, operasjonelle og organisatoriske forhold kan påvirke forventningsverdi for hyppigheten av topphendelsene, og disse kan tas hensyn til så lenge effekten kan dokumenteres eller sannsynliggjøres.

Figur 3.2 illustrerer hvordan risikokonturene påvirkes av den estimerte frekvensen for topphendelsene. Den svarte sirkelen illustrerer risikokonturen som fremkommer ved en gitt frekvens. Her er frekvensen avtagende med økende lekkasjerate (og tilhørende representativ utbredelse). Dersom man øker frekvensen for alle lekkasjescenarioer med samme faktor, vil dette kunne representeres med den oransje stiplede linjen. Og den resulterende risikokonturen vil følgelig bli større (oransje sirkel).



Figur 3.2 - Illustrasjon på hvordan valg av frekvensmodell påvirker risikokonturer

Det finnes ulike modeller for utarbeiding av lekkasjefrekvenser. Disse kan benyttes til beregning av frekvenser for topphendelser, som normalt vil være lekkasjer med ulike klasser av lekkasjerater. Modellene gir enten frekvenser for ulike lekkasjestørrelser (rater, mengder) direkte eller frekvenser for ulike hullstørrelser og så beregnes lekkasjerater for hullstørrelsene på basis av prosessbetingelser for fluidet (væske, gass) som lekker.

Modellene skiller seg hovedsakelig på:

- Detaljgraden av informasjon om anlegget som er nødvendig for å benytte modellene. Det vil si om informasjonen kun omfatter hovedutstyr i anlegget (som f.eks. trykktanker, lagertanker, pumper og kompressorer, destillasjonskolonner) eller om det i tillegg benyttes informasjon på komponent-nivå (som flenser, ventiler, instrumenter, rør etc.).

- Hvilken form frekvensene presenteres på. Det må passe med oppløsningen i den påfølgende analysen, det vil si om modellen enten gir frekvens for ulike scenarier i form av rater og varigheter eller utsluppet mengde, eller om modellen gir frekvens for ulike hullstørrelser

Bruk av de mer avanserte modellene krever mer detaljert informasjon om lekkasjekilder. Eksempelvis i en tidlig fase av en designprosess - før P&ID er ferdig - vil man være avhengig av på en eller annen måte å justere tellingene (kvantifisering av lekkasjekilder), alternativt bruke erfaringstall fra tilsvarende større utstyrsenheter fra andre anlegg for å oppnå lekkasjefrekvenser som er representative for det planlagte anlegget. For et anlegg i drift er alt utstyret kjent.

Bruken av en enkel modell vil i liten grad reflektere designforholdene i anlegget og de tilhørende scenarioene blir tilsvarende forenklet. Ved bruk av modellene som gir hullstørrelsesfordelinger benytter man fluid type, trykk og temperatur til å beregne frekvensfordeling av utstrømningsrater og får topphendelser definert ved lekkasjerater som i større grad reflekterer designforholdene. For å utnytte dette kreves en mer detaljert påfølgende analyse.

Valg av lekkasjefrekvensmodell kan bestemmes ut fra:

- Hvor enkel eller omfattende analyse man ønsker å utføre. Behov for å undersøke effekt av risikoreducerende tiltak må vurderes, mer omfattende modeller gir generelt større muligheter for å kartlegge effekt av tiltak
- Hvor mye informasjon som er tilgjengelig om anlegget
- Hvor anleggsspesifikt analysen skal være. Oppløsningsgraden i lekkasjefrekvensmodellen må balanseres mot analysemodellen som den skal benyttes i

3.3.2 Modeller for lekkasjefrekvenser

Følgende lekkasjefrekvensmodeller relevante for analyser av landanlegg og omhandles videre i disse retningslinjene:

- RIVM
- HSE
- OGP
- PLOFAM

RIVM og HSE er de mest brukte av landbasert industrivirksomhet i Europa. OGP og PLOFAM stammer fra offshore industrien, men blir også benyttet for nedstrømsaktiviteter som f.eks. for terminaler og petrokjemiske industrianlegg. Pr i dag er datagrunnlaget fra offshore anlegg vesentlig bedre og mer omfattende enn for landbasert industri. Det er ønskelig at man på sikt skaffer større og bedre datagrunnlag fra landbasert industri.

For spesielle fluider som kan tenkes å påvirke muligheten og frekvensen for lekkasje bør det vurderes om standard lekkasjefrekvensene må justeres, eksempelvis som følge av kjente korrosjons- eller andre skademekanismer.

3.3.2.1 RIVM-modellen

RIVM (Reference Manual Bevi Risk Assessment) modellen (ref. /3/) er hovedsakelig basert på TNO Purple Book. Det er den enkleste av de nevnte metodene, da den gir lekkasjefrekvenser samlet for utstyrsgrupper og ikke for enkeltkomponenter (som flenser og ventiler), som er inkludert i utstyr og rørledninger. RIVM er derfor mest anvendbar på anlegg hvor det er et begrenset antall lekkasjekilder som faller utenfor utstyrsgruppene (uten at det nødvendigvis betyr at det er få lekkasjemuligheter i anlegget). Videre gis frekvensene for 3 ulike utslippsscenarioer som en blanding av mengde, rater og hullstørrelse:

- Momentant utslipp av hele innholdet
- Utslipp av hele innholdet med konstant rate over 10 min
- Kontinuerlig utslipp gjennom 10 mm hull
- For pumper og kompressorer oppgis frekvenser for hullstørrelser (10% av diameter)

Frekvensen er uavhengig av størrelsen på utstyret og rørdimensjoner for rør under bakken. For rør over bakken er frekvensen avhengig av rørdimensjon. Da det kun er stort utstyr som inngår, er det raskt å telle opp antall lekkasjepunkter. RIVM-modellen er egnet til enklere analyser hvor designspesifikke forhold som påvirker lekkasjefrekvensen tas hensyn til i begrenset grad.

En sammenligningsstudie mellom RIVM og HSE (ref. /4/) viser at en viktig forutsetning RIVM setter for bruk av lekkasjefrekvensene for trykketanker er at lekkasjene ikke skyldes ytre påvirkninger (kollisjon, støt), korrosjon, utmatting på grunn av vibrasjon eller operatørfeil da det forutsettes at anlegget har kontroll på dette. Hvis slike forhold finnes, må man gjøre spesielle vurderinger ved bruk av RIVM-frekvensene for trykketanker da disse i utgangspunktet er dominert av forhold som designfeil, aldning, slitasje etc., eller benytte HSE eller PLOFAM-modellene.

Bakgrunnen for frekvensene for slangebrudd er svært uklar (ref. /5/) og anbefales derfor ikke brukt.

3.3.2.2 HSE-modellen

HSE-modellen (Health and Safety Executive i UK, ref. /6/) er basert på data fra Storbritannia (UK). Det er en modell for feilfrekvenser på utstyr hvor lekkasje er feilmodusen. Den er mer detaljert enn RIVM-modellen ved at den også har data for komponenter som flenser og ventiler. HSE gir frekvenser for ulike hullstørrelser for tanker, stort sett fra 3-5 størrelser avhengig av utstyr, men ikke for ventiler, flenser og pumper. HSE-modellen er derfor bedre egnet enn RIVM om man ønsker mer designspesifikk og nyansert frekvens for topphendelser. Frekvensene for et utstyr er uavhengig av størrelsen på utstyret med unntak av store lagertanker (to størrelsesklasser) og rør hvor det er frekvenser for hullstørrelser på rør i ulike størrelsesklasser. For flenser er det ingen tilsvarende oppløsning med hensyn på rørdimensjoner. Merk at flenser på tanker (unntatt tilkobling til prosessen) og annet større utstyr er inkludert i frekvensene for utstyret, slik at de spesifikke frekvensene for flenser anvendes på frittstående flenser.

HSE-modellen er velegnet om man ønsker en noe mer detaljert analyse der designspesifikke forhold som påvirker lekkasjefrekvensene i større grad tas hensyn til, både ved at det er bedre oppløsning mht. antall lekkasjekilder og at effekten av prosessforhold (trykk, temperatur, fluid tetthet) tas hensyn til.

HSE-modellen har lekkasjefrekvenser for lasting/lossing med slanger til transporttanker basert på feiltreanalyse av operasjonen og tilhørende barrieresystemer, se ref. /7/.

I og med at det er vesentlig større oppløsning mht. lekkasjekilder vil tellingen av lekkasjekilder bli vesentlig mer omfattende enn ved bruk av RIVM-modellen. Fordelen er mer designspesifikke toppfrekvenser for hendelsestrærne.

3.3.2.3 OGP-modellen

OGP-modellen (ref. /8/) er også basert på et utvalg av HSE-data, men er bygget annerledes opp enn HSE-modellen. De primære forskjellene er:

- OGP modellen har data for vesentlig flere prosesskomponenter enn HSE men ingen data for tanker
- OGP skiller mellom:
 - full leaks (hele segmentinnholdet slipper ut fra initielt fullt trykk)
 - limited leaks (andel av segmentinnholdet lekker, trykket er lavere enn fullt, men er ikke neglisjerbart)
 - zero pressure leaks (trykket er i praksis 0, dvs. < 0,01 barg)
- For hver prosesskomponent er lekkasjefrekvensen gitt som funksjon av både hullstørrelse og utstyrsdimensjon i form av ulike klasser, mens HSE bare har en frekvens (ikke kontinuerlig som i PLOFAM).

3.3.2.4 PLOFAM-modellen

PLOFAM-modellen (Process Leaks for Offshore installations Frequency Assessment Model, ref. /9/) regnes pr. i dag for å være den mest omfattende, avanserte og best validerte modell for

beregning av lekkasjefrekvenser i prosessanlegg. Når det gjelder tanker, er den imidlertid mindre nyansert på typer enn f.eks. HSE. PLOFAM er basert på offshore erfaringsdata fra hele UK (data fra HSE) og NCS (norsk offshore sektor, data fra Petroleumstilsynet) fra 1992 til 2015. Med HSE- og Ptil-krav til format på rapportering av hendelser har det vært mulig å vurdere og klassifisere hver hendelse grundig.

Utstyrskomponentene som er inkludert er som i HSE, men med noen ytterligere klasser. Det som imidlertid skiller PLOFAM mest fra de andre modellene er:

- Frekvensene er avhengig av utstyrets dimensjon
- For hver utstyrsdimensjon er frekvensen en kontinuerlig funksjon av hullstørrelsen fra 1 mm til fullt brudd, med andre ord er det ingen klasser av hullstørrelser og man unngår derfor alle effekter knyttet til overgang mellom klasser. For beregning av risikokonturer er imidlertid kun større lekkasjer relevante
- PLOFAM er validert ved å anvende modellen på tellinger fra 62 plattformer på NCS og sammenliknet med observerte lekkasjefrekvenser på de tilsvarende plattformene

Selv om PLOFAM-modellen er basert på UK og NCS offshore data, viser en gjennomgang at det ikke er noen grunn til å anta at dataene er annerledes på landanlegg av tilsvarende størrelse, hvor krav til inspeksjon, testing, vedlikehold etc. er sammenlignbar og hvor prosessfluiden ikke er mer utfordrende enn for systemer med rene petroleumsprodukter. PLOFAM anses derfor som relevant å benytte også for petrokjemiske anlegg, raffinerier, større LNG-anlegg o.l.

PLOFAM er den lekkasjefrekvensmodellen som i størst grad gjenspeiler designforholdene på et anlegg, men også den som er mest omfattende å bruke. Arbeidet med å telle lekkasjekilder vil være på samme nivå som med HSE-modellen.

PLOFAM dekker omtrent de samme utstyrskomponentene som OGP, men har både et vesentlig bedre datagrunnlag og er metodisk mer korrekt. Det anbefales derfor å benytte PLOFAM framfor OGP der det er relevant.

3.3.3 Andre lekkasjeårsaker

Utilsiktete utslipp av brennbare eller giftige stoffer som kan representere en risiko for 3. part kan forekomme uten at det skyldes en lekkasje hvis frekvens er dekket av modellene i kapittel 3.3.2. Dette kan f.eks. være runaway reaksjoner eller andre unormale prosessituasjoner som medfører overtrykking med tilhørende brudd eller utslipp fra sikkerhetsventiler. Det kan også forekomme utslipp av giftige stoffer fra atmosfæriske lufteredninger fra prosessanlegg eller lagertanker, som følge av brann eller utilsiktet blanding av produkter eller mellomprodukter.

Det er derfor en forutsetning at HAZID og HAZOP er gjennomført i tilstrekkelig grad til å avdekke eventuelle muligheter for slike scenarier der dette er relevant.

3.3.4 Oppsummering

En oppsummering med anbefalinger er gitt i Tabell 3.1. Merk spesielt at RIVM modellen ikke nødvendigvis vil være konservativ.

Tabell 3.1 - Anbefalte data for lekkasjefrekvenser

Karakteristikk	Har/ønsker informasjon om	Anbefalte modeller
Informasjon om lekkasjekilder	Kun større utstyr og tilhørende mengder. Ikke relevant med trykk eller utstyrsstørrelse	RIVM/TNO (ikke for trykktanker, se kapittel 3.3.2.1)
	Begrenset informasjon om enkeltkilder, men ikke hullstørrelsesavhengighet, (ventiler, flenser pumper, slanger, rør- må telles) i tillegg til større enheter. Tar hensyn til trykk i prosessen/anlegget. Ikke relevant med avhengighet av utstyrsstørrelse (ventiler, flenser, pumper, slanger)	HSE
	Store anlegg (raffinerier, petrokjemiske anlegg, store LNG anlegg etc.) Informasjon om enkeltkilder, må telles. Gir frekvenser avhengig av utstyrsdimensjon og hullstørrelser (kontinuerlige fordelinger)	PLOFAM + HSE for spesielle tanker
Slanger	Slanger i prosess	PLOFAM
	Lasting/lossing med slanger til transporttanker	HSE

3.4 Analyse av lekkasje og spredning

3.4.1 Modellering av lekkasjen

En god beskrivelse av utslippet er en forutsetning for at den påfølgende spredningsanalysen og eventuelt eksplosjonsanalysen skal bli god nok.

Det er to trinn i lekkasjeforløpet frem til en kilde for spredningsanalysen. Første trinn er å bestemme selve lekkasjeraten ut av hullet, andre trinn er å bestemme fase og termodynamisk tilstand rett utenfor hullet som start for spredningsanalysen. Kilden i spredningsanalyser ved gasslekkasjer (uansett om man benytter CFD eller en empirisk modell) er ikke selve hullet, men vil være der hvor etterekspansjonen av gassen har brakt trykket ned til omgivelsestrykket, dvs. ved den såkalte Mach-disken (normalt ≤ 1 m fra hullet).

Disse forløpene krever anvendelse av ulike fysiske modeller, både i forhold til de to trinnene og i forhold til fasen (tilstanden) til fluidet før lekkasjen.

3.4.1.1 Lekkasjerate gjennom hullet

Fluidet kan strømme ut som en ren gass, ren væske eller en kombinasjon av væske og gass avhengig av hvilken type fluid/fase man har og hvor på segmentet lekkasjen er. Det som er avgjørende er fluidets termodynamiske tilstand i beholderen:

- Hvis fluidet har en temperatur $>$ kokepunktet til væsken ved beholdertrykket, vil fluidet være gass
- Hvis fluidet har en temperatur mellom kokepunktet til væsken ved beholdertrykket og omgivelsestrykk, vil trykkfallet under lekkasjen medføre at væsken vil koke. Avhengig av graden av overheting, vil kokingen (gassbobledannelse) starte i væsken før lekkasjehullet eller eventuelt i lekkasjehullet. Dette påvirker tettheten av fluidet i hullet og dermed lekkasjeraten. All fordamping krever varme som tas fra væsken, så hvor mye som faktisk koker av vil være avhengig av væsketemperaturen over kokepunktet, dvs. graden av overheting. Dette er kompliserte fysiske prosesser som kan tilnærmes med ulike beregningsmodeller. Hvis væsken har komponenter med ulike kokepunkt, må dette vurderes spesielt

- Hvis fluidet har temperatur lavere enn kokepunktet ved omgivelsestrykket, vil væsken dampe av uten koking ettersom trykket faller i lekkasjen. Andelen som damper av er bestemt av damptrykkskurven for væsken, men avdampingen tar noe tid

Empiriske verktøy har ulike enklere modeller for å håndtere de forskjellige termodynamiske scenariene. For mer kompliserte situasjoner bør mer avanserte modeller benyttes.

Hvis lekkasjen ikke er gjennom et hull i en beholder, men i et rør, vil det redusere lekkasjeraten avhengig av hullstørrelse og lengden av røret. Ved korte rør kan enkelte empiriske modeller benyttes, ved lange rør kan egnede beregningsmodeller for rørsystemer benyttes for å bedre presisjon på utslippsrate.

Lekkasjemodellene antar fri strømming ut av hullet. Spesielle forhold som stort temperaturfall og høy fuktighet som kan medføre isdannelse, kan delvis blokkere åpningen og redusere utslippsraten sammenlignet med det som lekkasjemodellene beregner. For fluider man ikke har erfaring med bør det undersøkes i litteraturen/ulykkes-databaser om det finnes erfaringer om hvordan en slik lekkasje arter seg. Vurder så om denne erfaringen kan overføres til det aktuelle scenariet.

3.4.1.2 Tilstand umiddelbart utenfor lekkasjen - Nærfeltet

Her er situasjonen avhengig av om det er en ren gasslekkasje eller en flerfaselekkasje.

Ved en gasslekkasje med kritisk strømming og overekspandert jet vil luft blandes inn i jetten før Mach-disken. Det er da viktig med god beregning av luftinnblandingen slik at startlekkasjen i en CFD-simulering får korrekt gass-luft konsentrasjon, temperatur og hastighet.

For di varmekapasitet for metan og naturgass er høyere enn for luft, vil enkelte lekkasjer kunne opptre som tung gass ved ett blandingsforhold med luft, og lett gass ved et annet blandingsforhold, noe som gjør at gassen initielt kan være lettere enn luft, men blir tyngre enn luft ved utblanding. Luftfuktighet og temperatur kan påvirke disse forholdene. Sikkerhetsdatabladet alene vil derfor ikke være tilstrekkelig for å vurdere hvordan en lekkasje vil spre seg.

Ved 2-fase eller rene væskelekkasjer vil væsken kunne rives opp i dråper eller danne en spray. Avhengig av dråpestørrelsene vil en større eller mindre del av væsken felles ut og danne en væskedam. Det er flere ulike mekanismer som bestemmer utslippets tilstand direkte utenfor lekkasjen:

- Mekanisk oppriving av væsken til dråper. Det er den dominerende mekanismen for væske med temperatur under kokepunktstemperaturen i omgivelsene. Oppbrytningen og dråpestørrelser er bestemt av hull diameter, væskens hastighet og tetthet, overflatespenning og viskositet. For små hull vil selv relativt lave trykk (størrelsesorden bar) kunne gi spraydannelse. Væske som renner ned vertikale flater og treffer horisontale profiler kan også medføre oppriving i dråper og dannelse av gasskyer, ref. /10/
- Oppriving av væsken grunnet koking og ekspansjon av gassbobler. Dette er den dominerende mekanismen for overhete de væsker (og BLEVE, se kapittel 3.8.1), jo større grad av overheting jo større andel rives opp til dråper. Det viktigste for den videre spredningsberegningen er hvor stor andel av væsken som faller ut og danner en væskedam, og hvor stor andel som blir spray som følger gassen i spredningen. Andelen av væsken som faller ut som store dråper er bestemt av dråpestørrelsesfordelingen som er vesentlig mer usikker enn den gjennomsnittlige dråpestørrelsen, så for problemstillinger hvor spray kontra væskedam er viktig bør det gjøres sensitiviteter i forhold til grad av væskeutfall. Ved nedkjøling av gassen vil også kondensasjon kunne bidra til dråpedannelse. På grunn av flashing vil temperaturen i 2-fase tåken synke og skyen (med eller uten tåkepartikler) vil normalt oppføre seg som tung gass
- For væsker med flere komponenter med ulike kokepunkt må spesielle vurderinger gjøres. Avhengig av komposisjon, trykk og temperatur vil slike utslipp kunne bli en kombinasjon av spray og væskedam hvor gasskomponenter koker av eller atomisert spray med ingen eller minimal rainout

- Ved utslipp fra trykksatte flerfasetanker kan trykkfallet som følge av utslippet medføre en betydelig fordamping, slik at gassmengden som lekker ut kan bli flere ganger større enn opprinnelig gassinnhold i segmentet
- Lokale vindforhold vil kunne påvirke fordampingsrate fra væskedammer, så for scenarier hvor fordamping er viktig bør forhold som påvirker de lokale vindforholdene vurderes
- Ved utslipp av LNG vil avdampingsraten være dominert av varmeoverføring fra grunnen som igjen er bestemt av temperaturforskjellen mellom væskedam og grunn. Avkjøling av grunnen vil etterhvert redusere avkokingen og dermed påvirke både spredningen av væskedammen (med mindre den ikke er begrenset av diker eller liknende) og avdampingsraten som kildestyrke for spredningen i fjernfeltet. Det vises til ref. /11/ og /12/ for modeller som beskriver avdampingsrater for LNG væskedammer
- Valg av modellparametere (for eksempel "Konstant entropi" eller "Konstant entalpi") vil også kunne påvirke resultatene av simuleringene. Det gis ikke detaljerte retningslinjer for bruk av modellparametere her, men dette må vurderes for modelleringen av det enkelte utslipp

3.4.2 Fjernfelt

For at risikokonturene skal representere virkeligheten best mulig er det avgjørende at modelleringen av de simulerte scenarioene er mest mulig fysisk realistiske. Det må derfor alltid vurderes om det er spesielle forhold ved anlegget som krever at man velger en gitt type modelleringsverktøy for å simulere lekkasje til fjernfeltet.

Det finnes i prinsippet to typer simuleringsverktøy for å beregne spredning i fjernfeltet fra en lekkasje; empiriske verktøy og CFD-verktøy:

- Empiriske verktøy (også kalt integralverktøy eller 2D verktøy) regner på forenklete fysiske modeller som er avstemt slik at de i best mulig grad gjensker eksperimentelle forsøk. Disse modellene er robuste og meget raske, men de tar i liten grad hensyn til de faktiske fysiske forholdene ved anlegget som blir analysert
- CFD-verktøy søker i større grad å simulere fysikken (Navier-Stokes ligninger) i utslippet, men også her brukes noen forenklete modeller for å gjøre simuleringene raskere. For eksempel benyttes ofte turbulensmodeller og subgrid geometrimodeller (porøsitetsmodeller) for å estimere effekten av fysikk som skjer på en mindre skala enn det som kan håndteres av den valgte oppløsningen på diskretiseringsmodellen

Ingen av disse to typene simuleringsverktøy kan betraktes som alltid å være konservative. Brukeren må derfor være godt kjent med begrensningene og usikkerhetene knyttet til hver av typene simuleringsverktøy og søke å alltid benytte den typen som er mest hensiktsmessig for det analyserte anlegg.

Empiriske verktøy og CFD-verktøy produserer svært like resultater for brennbarhet/giftighet i områder hvor fjernfeltet har ingen eller små obstruksjoner som kan påvirke gassspredningen (se ref. /13/). I anlegg hvor dette kan sies å være tilfelle, vil det være mulig å få gode estimater for gassspredning med begge typer modelleringsverktøy.

Dersom man skal analysere et anlegg hvor en av de følgende karakteristikkene gjelder bør CFD-verktøy vurderes:

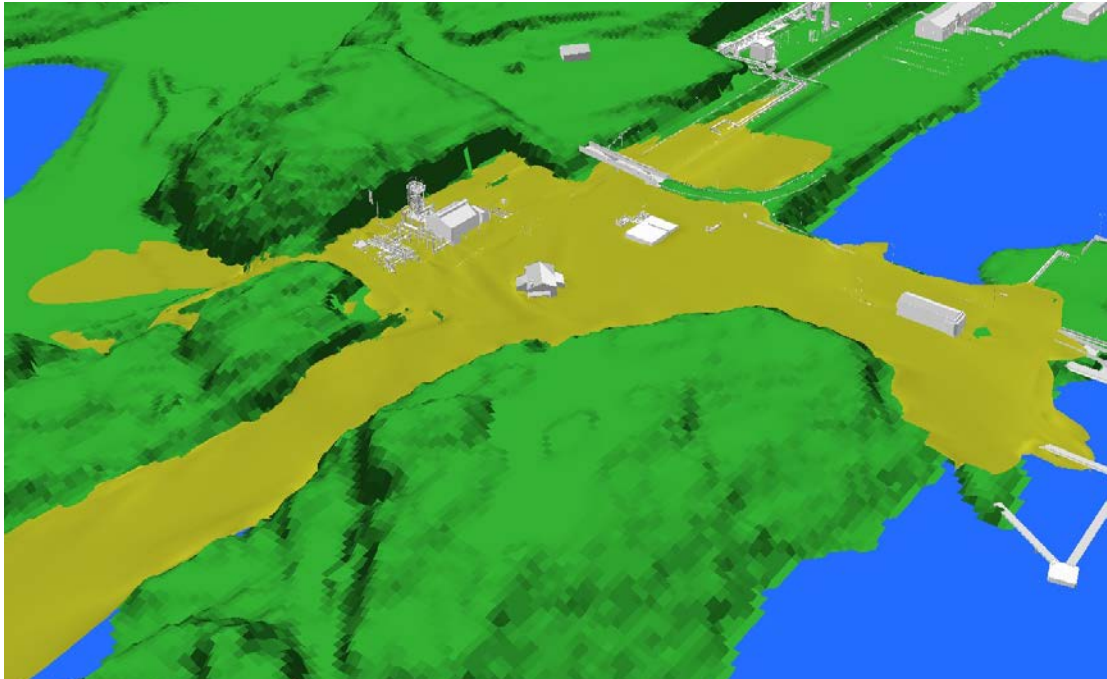
- **Terreng.** Dersom anlegget ligger så nære terreng at dette i betydelig grad vil påvirke spredningen av gass til fjernfeltet. Dette gjelder særlig dersom anlegget kan produsere utslipp av tung gass som kan bli fanget og ledet av terrenget, se Figur 3.3, for slike scenarier kan empiriske verktøy være ikke-konservative. Fjellskrenter og bratt terreng kan også utgjøre naturlige barrierer som i stor grad hindrer spredning av tung gass i visse retninger, om empiriske verktøy benyttes for slike scenarier vil det kunne resultere i for store risikokonturer
- **Store bygninger.** Dersom det finnes bygninger eller andre obstruksjoner som vesentlig påvirker spredningsbildet (som f.eks. endringer i lokale vindforhold, resirkulering, blokkeringer og retningsendringer i forhold til hva empiriske verktøy ville predikert)

- **Komplekse eller store diffusive utslipp.** Dersom utslippene kommer fra oppsamlingsbasseng med komplekse eller store arealer, så vil en tilnærming med punktutslipp kunne gi betydelig usikkerhet i resultatene
- **Utslipp i utstyrstette områder.** Dersom bevegelsesenergien i et utslipp i betydelig grad absorberes ved at gasstrømmen (jet) treffer prosessutstyr eller bygninger. Når bevegelsesenergien absorberes av prosessutstyr, vil innblandingen av luft reduseres (jetthastigheten stoppes mekanisk istedenfor gjennom friksjon med luft), og den brennbare eller giftige gassen vil dermed kunne nå lengre før den er tynnet ut. I slike tilfeller kan empiriske verktøy være ikke-konservative. Dersom et høyhastighetsutslipp treffer en liten flate (bygg eller lignende), vil impulsen bli endret betydelig i både retning og størrelse. I slike tilfeller vil empiriske modeller ikke representere fysikken tilstrekkelig, se Figur 3.4. I utstyrstette områder kan det også forventes at lokale vindhastigheter er betydelig lavere og annerledes enn vindfeltet ved nærmeste målestasjon, noe som må tas høyde for i analyser, særlig ved bruk av enklere empiriske verktøy
- **Spesielle scenarier.** I helt spesielle scenarier opererer man utenfor intervallet hvor de empiriske modellene er gyldige. Et eksempel på dette er utslipp av tung gass i lav vind (< 1m/s), hvor empiriske verktøy kan ha begrensede simuleringsmuligheter. Merk at det kan finnes områder hvor også CFD-verktøy opererer utenfor et domene hvor det er tilstrekkelig testet

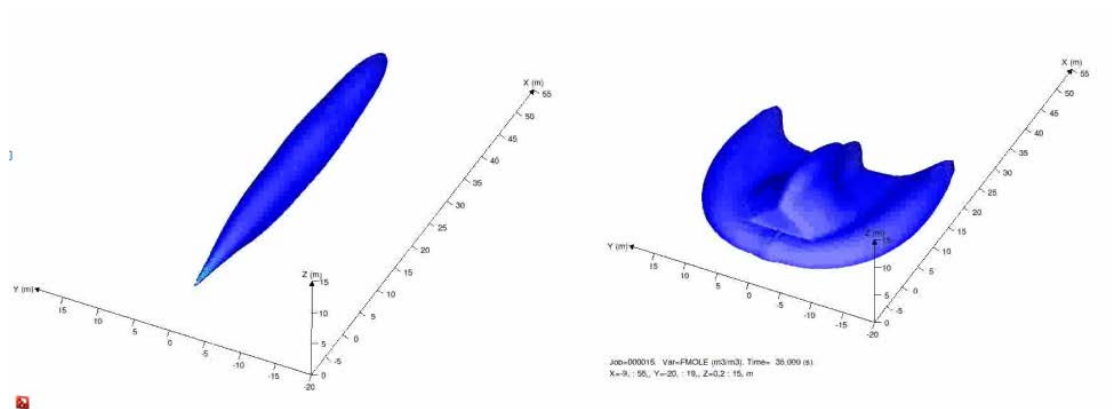
Alternativt - om empiriske verktøy benyttes - må man beskrive usikkerheter knyttet til antagelser om forhold som nevnt over, og eventuelt hvordan man har søkt å kompensere for slike forhold.

For beregning av giftige konsentrasjoner over lange avstander i fjernfeltet kan det være enkelte utfordringer ved bruk av CFD. På grunn av regnetid kan det være utfordrende både å modellere nærfeltet med god presisjon, og samtidig representere fjernfeltet på en bra måte. Ved modellering av slike scenarier bør den som utfører studiet kjenne til gyldighet/begrensninger, relevante valideringstester og retningslinjer for bruk av verktøyet for slike situasjoner. Turbulenseffekter som skyldes oppdrift som følge av lokal soloppvarming er vanskelig å gjenskape med CFD (Pasquill A, B, C-stabilitet), og CFD verktøy gir gjerne konservative fareavstander i slike situasjoner. Empiriske verktøy kan være mer robuste og enklere i bruk for slike situasjoner selv om disse heller ikke klarer å modellere de lokale effektene av for eksempel små obstruksjoner og varierende varmeovergangstall fra underlaget. Ved bruk av empiriske verktøy må man imidlertid forsikre seg om at det ikke er viktige elementer med modellering nær utslippet som utelates og at det ikke er scenarier med lav vind som ikke lar seg modellere. Empiriske verktøy gjenskaper med god nøyaktighet eksperimentene de er kalibrerte for, men så snart forutsetningene endres fra eksperimentene øker usikkerheten betydelig også for empiriske verktøy. For beregning av giftige konsentrasjoner i fjernfeltet er det derfor usikkerhet knyttet til resultatene både for CFD og for empiriske verktøy, og denne usikkerheten må derfor diskuteres i risikoanalysen (se også kapittel 3.10).

Valget av typen modelleringsverktøy til fjernfeltet vil kunne ha stor effekt på risikokonturene, og det må derfor dokumenteres at dette er vurdert i risikoanalysen.



Figur 3.3 - Lekkasje av tung gass (gul farge) i område med variert terreng. Figuren viser at resultatfeltet påvirkes sterkt av terrenget ved utslipp av tung gass



Figur 3.4 - Ikke-obstruert lekkasje (til venstre) og samme lekkasje med 3x3 meter obstruksjon (høyre). Figuren illustrerer at om lekkasjer treffer bygninger vil løsningsfeltet kunne endre seg betydelig

3.5 Analyse av tenning

3.5.1 Generelt

Tenning forutsetter at det er en brennbar konsentrasjon av gass, enten som følge av et gassutslipp eller som avdamping fra en væske, som eksponeres for en tennkilde. For væsker forutsetter dette at de har en temperatur som gir tilstrekkelig avdamping. Normalt vil væsker med høyt flammepunkt (over 60 °C) ikke ansees som brannfarlig uten å være oppvarmet. Merk imidlertid at spraylekkasjer av denne type væsker kan tenne ved lavere temperaturer enn 60 °C. Se kapittel 3.4.1.2 for diskusjon av spraylekkasjer.

Sannsynligheten for antennelse av en lekkasje er et produkt av to sannsynligheter:

- Sannsynligheten for at skyen som lekkasjen genererer eksponerer tennkilder. I realiteten vil lekkasjeraten avta med tid og i kombinasjon med vind eller ventilasjonsforhold vil skystørrelsen og dermed eksponeringssannsynligheten også variere i tid, dvs. være transient
- Sannsynlighet for antennelse gitt eksponering av tennkilder, normalt kalt tennintensiteten

Tenning kan enten skje umiddelbart etter lekkasjen og resulterer da i en brann, eller den kan skje etter en tidsforsinkelse og resulterer da i en eksplosjon eller flashbrann etterfulgt av en brann så lenge lekkasjen varer. De ulike tennsannsynlighetsmodellene håndterer forholdet mellom umiddelbar og sen tenning på forskjellige måter. Dette påvirker sannsynligheten for forsinket tenning i større grad enn for umiddelbar tenning, hvilket er vesentlig for eksplosjonsrisikoen men av mindre betydning for brannfrekvensen.

Det vil også være ulike typer tennkilder som må håndteres forskjellig:

- Tennkilder inne i anlegget. Dette er hovedfokus for alle modeller, det finnes historisk dataunderlag selv om det er noe begrenset, og er derfor dekket, men i ulik grad av detaljering. Tennsannsynligheten for spesielle tennkilder som f.eks. fyrte enheter, er såpass avhengig av detaljutformingen at de bør vurderes i hvert tilfelle. Ved selvantennelse settes tennsannsynligheten =1
- Tennkilder utenfor anlegget:
 - For beregning av risikokonturer til bruk ved arealplanlegging settes tennsannsynligheten = 1. Dette gjøres fordi tennsannsynligheten ellers vil være avhengig av aktivitetsnivå, tetthet av bebyggelse etc., og det er ikke formålstjenlig at utstrekningen av hensynssonene skal være avhengig av slike forhold. Tennsannsynligheten vil uansett være høy da det ikke er krav til tennkildek kontroll utenfor anleggets grenser. For å forhindre at skyer som ikke er antent inne i anlegget antennes umiddelbart når de spres ut av anlegget skal tennsannsynligheten på 1 benyttes på skyens største utstrekning. Dette innebærer også at en transient tennsannsynlighetsmodell ikke skal benyttes utenfor virksomhetsområdet
 - For hendelser hvor brennbar gass spres utenfor anlegget bør det for beregning av andre risikoforhold etableres en tennsannsynlighet ≤ 1 utenfor anlegget. Dette er imidlertid ikke dekket i alle modellene. Det er stor variasjon av type tennkilder, det er mangelfullt historisk underlag og samtidig er det ingen tennkildebekyttelse, noe som medfører en høy tennintensitet. Det må derfor gjøres egne vurderinger av slike tennkilder hvor det vesentlige er å se på sannsynligheten for å eksponere disse siden tennintensiteten uansett vil være høy

Lekkasje av væsker med temperatur over selvantennelsestemperaturen vil kunne tenne når de kommer i kontakt med luft. Dette er spesielt aktuelt på raffinerier hvor deler av prosessen har høye temperaturer.

Det er hovedsakelig 3 ulike tennmodeller som benyttes:

- RIVM
- OGP
- MISOF (revidert versjon av OLF-modellen)

Disse modellene håndterer eksponeringssannsynlighet og tenningsintensitet på ulike måter som krever ulike grad av informasjon og derfor medfører ulik grad av forenklet eller omfattende analysemodell for å anvende modellene. Valg av modell må derfor tilpasses nivået på risikoanalysen. For scenarier som involverer lettantennelige gasser som f.eks. hydrogen bør tennsannsynlighetene vurderes spesielt.

Det finnes også andre meget enkle modeller hvor tennsannsynligheten er bestemt av arealet av et område med tennkilder som eksponeres for en sky, men det anbefales da heller å benytte OGP modellen da den er like enkel å bruke, er bedre validert, og gir et mer nyansert bilde av tennsannsynligheten.

3.5.2 RIVM-tennmodell

RIVM-modellen (ref. / 3/) er meget enkel, men er likevel et produkt av en faktor som tar hensyn til eksponeringssannsynligheten og en faktor som representerer tennintensiteten:

- Eksponeringssannsynligheten er kun en faktor som brukeren selv må bestemme uten at det er gitt noen retningslinjer for hvordan dette bør gjøres
- Tennintensiteten er gitt som en faktor som øker omvendt eksponensielt som funksjon av tid fra 0 til 1. Ulike tennkilder karakteriseres ved ulike tennsannsynligheter ved eksponering i 1 min, noe som enkelt kan omregnes til en karakteristisk konstant i eksponensialfunksjonen

Tennintensiteten inne i et anlegg er kun gitt for kjeler og ovner og er derfor lite anvendelig for de fleste anlegg. Modellen gir også tennintensiteter for 3. parts tennkilder:

- Naboanlegg
- Hus og kontorer pr person
- Høyspentlinjer
- Skip
- Kjøretøy og tog

For beregning av risikokonturer til bruk ved arealplanlegging skal imidlertid sannsynligheten for tenning gitt eksponering utenfor anleggets grenser settes til 1.

3.5.3 OGP-tennmodell

OGP-modellen (ref. /14/) refererer til UKOOA modellen (ref. /15/) som ble utviklet av Energy Institute i UK i 2006 basert på HSE-data fra land og offshore anlegg og dekker derfor eksplisitt både landanlegg og offshoreanlegg. Tennsannsynligheten gis som kurver eller korrelasjoner som funksjon av lekkasjerate for:

- Ulike typer anlegg og områder på landanlegg (og offshore)
- For gass, olje og LNG
- Ulike ventilasjonsforhold i områdene
- I noen grad for ulik tetthet av utstyr

Korrelasjonene gir totale tennsannsynligheter, dvs. summen av umiddelbar og sen tenning. Den umiddelbare tennsannsynligheten er satt til 0,001 for alle utslipp slik at alle korrelasjonene starter på 0,001 for lekkasjerate 0 kg/s. Tennsannsynligheten avtar med tid hovedsakelig pga. at gasskyen ikke vil eksponere nye tennkilder når den har nådd sitt maksimum.

OGP/UKOOA modellen er enkel i den forstand at den ikke forutsetter en modell for eksponeringssannsynlighet men gir den totale tennsannsynligheten direkte.

I og med at OGP/UKOOA modellen ikke tar hensyn til de transiente forholdene ved en lekkasje er den velegnet til bruk i analyser som ikke inkluderer modeller for transiente skyforløp. Tennsannsynligheten for en gitt lekkasjerate kan derfor bestemmes uten å beregne noen skystørrelse, men for å beregne konsekvensene må nødvendigvis skystørrelsene som den gitte lekkasjeraten medfører beregnes.

OGP/UKOOA-modellen har blitt testet mot MISOF ved å analysere utvalgte offshoreanlegg med begge modellene. For relativt åpne områder uten spesielle tennkilder som gassturbiner, dieselmaskiner og pumper/roterende utstyr gir OGP/UKOOA-modellen generelt noe høyere totale tennsannsynligheter enn MISOF hvilket virker rimelig i og med at det er en enklere modell enn MISOF. Med slike spesielle tennkilder i området forventes det at OGP/UKOOA kan gi noe lavere tennsannsynlighet enn MISOF.

3.5.4 MISOF-tennmodell

MISOF (Modelling of Ignition Sources on Offshore Oil and Gas Facilities), ref. /16/, er en revisjon av den tidligere OLF-modellen. Den skiller seg fra de andre modellene ved at den er:

- Den mest omfattende modellen
- Den eneste som tar hensyn til det transiente forløpet av en gassky
- Basert på et omfattende statistisk underlag fra UK og NCS
- Er samkjørt med PLOFAM slik at kombinasjonen av PLOFAM og MISOF reproduserer den historiske frekvensen for antente prosesslekkasjer offshore
- Kan ta hensyn til spesifikke tennkilder som antall roterende utstyr, luftinntak til gassturbiner og dieselmotorer, varmt arbeid og ulik grad av Ex-beskyttelse
- Kan ta hensyn til nødavstengning og utkobling av tennkilder

MISOF gjelder for prosessområder med typisk utstyrstetthet som offshore, ikke for åpne relativt tomme områder mellom ulike prosessområder hvor tettheten av potensielle tennkilder er vesentlig lavere.

For eksponering av ikke-Ex-utstyr i uklassifiserte områder har MISOF en enkel korrelasjon mellom tennsannsynlighet og volumet av det eksponerte området. Den kan benyttes på alle områder som har sammenliknbar tetthet av elektrisk utstyr som et uklassifisert område offshore.

MISOF har ingen modell for tennkilder utenfor området, kun for standard prosessutstyr og varmt arbeid (unntatt luftinntakene til dieselmotorer og turbiner). Slike tennkilder må derfor vurderes spesielt.

Detaljeringsnivået i MISOF forutsetter en omfattende analyse hvor bl.a. transiente skyforløp modelleres. Fordelen er at den gir en vesentlig mer designspesifikk tennsannsynlighet enn spesielt RIVM, men også OGP/UKOOA. Dette gir vesentlig større mulighet til å undersøke effekten av ulike tiltak for eventuelt å redusere tennsannsynligheten i et anlegg.

3.5.5 Oppsummering

En oppsummering av anbefalinger er gitt i Tabell 3.2.

Tabell 3.2 - Anbefalte modeller for tennsannsynligheter

Internt i anlegget	Ikke beregning av eksponeringssannsynlighet Ikke tidsavhengig tennsannsynlighet, alternativt tidsavhengig for en konstant skystørrelse	OGP
	Beregning av eksponeringssannsynlighet Tidsavhengig eksponeringssannsynlighet Driftsregime som for store anlegg eller offshore	MISOF for prosessområder i anlegget
	Eksplisitt hensyn til spesielle tennkilder (gasturbiner, dieselmotorer, pumper)	MISOF (forutsetter beregning av eksponeringssannsynlighet)
	Fyrte enheter	Vurderes spesifikt for hver enhet, RIVM for enklere analyser
Utenfor anlegget	Tennsannsynlighet = 1	

3.6 Analyse av eksplosjoner

3.6.1 Generelt

Alle hendelser som kan lede til rask oppbygging av trykk bør vurderes. Både gass, væske (atomiserte dråper) og støv kan bidra til eksplosjoner. Normalt vil eksplosjonen være en

deflagrasjon, men ved høy utstyrstetthet og lange flammebaner kan den gå over til en detonasjon som gir trykk i størrelsesorden 15-20 barg i hele skyen. For detonasjoner i omgivelser som ikke har atmosfærisk trykk (for eksempel inni rør) vil detonasjonen gi en trykkøkning som er ca. 15-20 ganger høyere enn det initielle trykket.

Størrelsen av de eksplosive skyene er normalt vesentlig mindre enn avstandene til risikokonturene for 3. part, slik at det er trykkforplantningen utenfor den brennbare skyen som bestemmer risikokonturene. Trykket utenfor skyen er igjen bestemt av eksplosjonstrykket inne i skyen og størrelse og form på skyen. Imidlertid faller trykket utenfor skyen på en slik måte at når overtrykket inne i skyen øker utover ca. 0,5 - 1 barg (50-100 kPa) har ytterligere trykkøkning kun moderat innvirkning på trykket utenfor skyen (bortsett fra helt i nærheten av skyen). Det betyr at for vurdering av kraftige eksplosjoner er det viktig å ha kontroll på skystørrelsen ved antenning, fordi den avgjør hvor fort trykket avtar utenfor skyen.

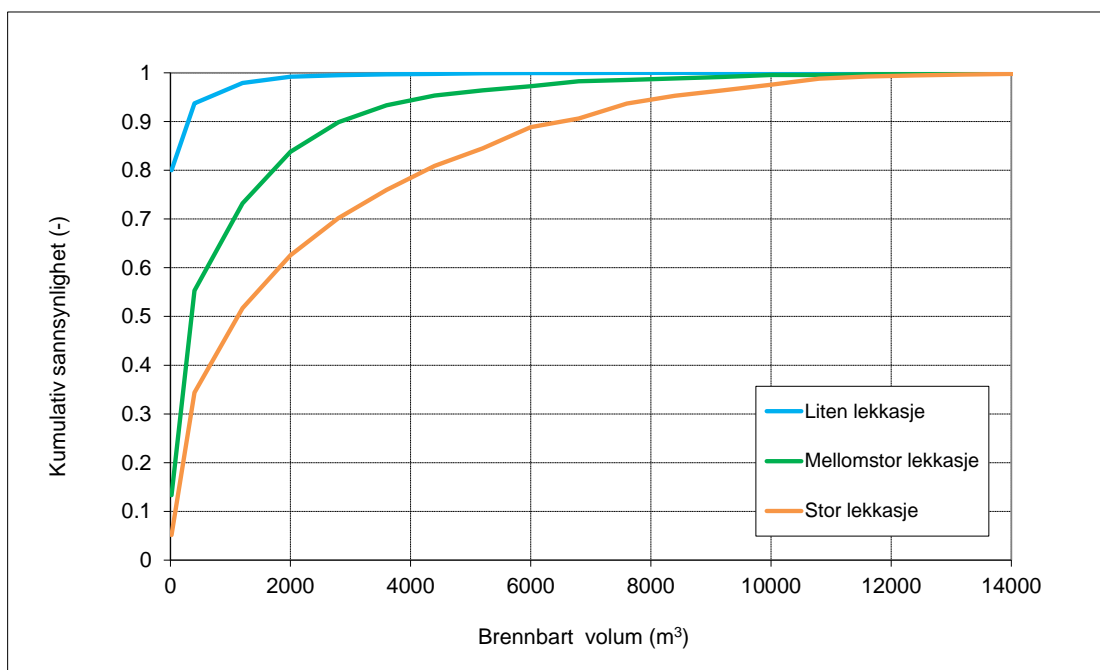
På anlegg hvor brudd på utstyr på grunn av eksplosjon kan medføre en vesentlig eskalering av ulykken ved for eksempel frigjøring av giftige stoffer eller store mengder hydrokarboner, må eksplosjonsanalysen inne i anlegget være tilstrekkelig til å vurdere i hvilken grad det kan bli brudd på utstyr. Nødvendig omfang og metodikk for en slik analyse er avhengig av forholdet mellom størrelsen på lastene som kan forventes og designstyrken på rør og annet relevant utstyr.

3.6.2 Skystørrelsens påvirkning på eksplosjonslaster

For en best mulig kvantifisering av risiko er det nødvendig å benytte et godt utvalg lekkasjerater, NORSOK Z-013, Annex F, anbefaler minst 9 lekkasjerater for analyser av prosessanlegg i petroleumsindustrien. For hver lekkasjerate må det beregnes en sannsynlighetsfordeling av antente skystørrelser som inkluderer alt fra små skyer som vil gi ubetydelige konsekvenser til de største skyene som kan forekomme. Målet med dette er å kunne estimere frekvenser for ulike eksplosjonsenergier. Figur 4.1 viser et eksempel på hvordan dette kan presenteres.

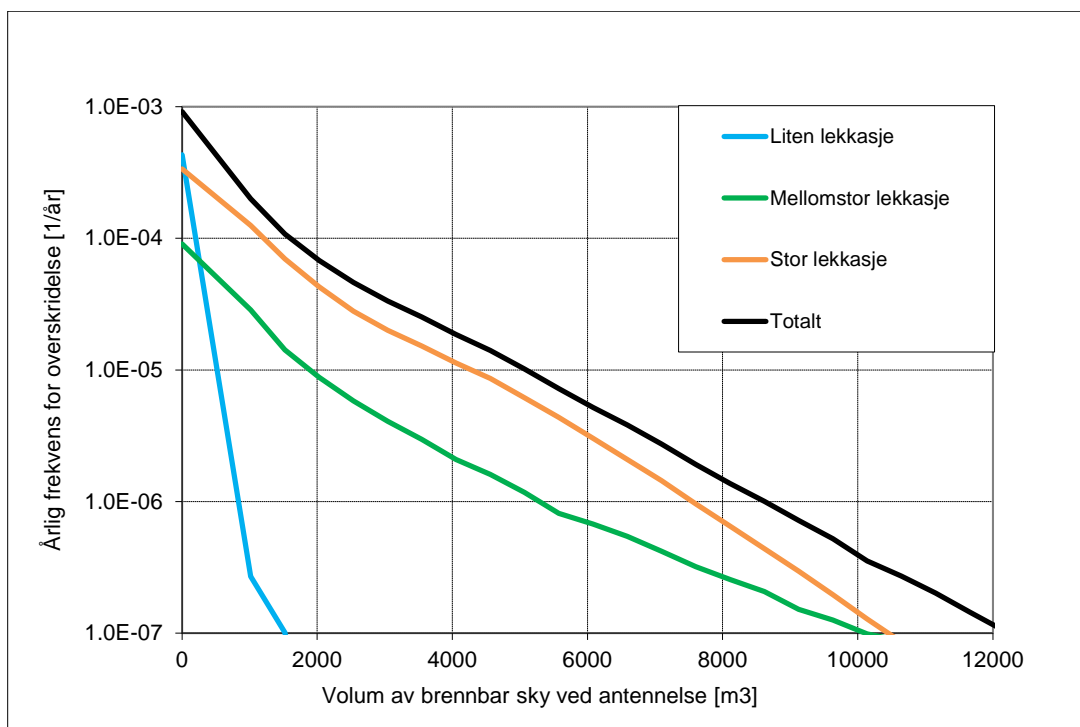
I den grad svært sterke eksplosjoner (detonasjoner) kan inntreffe inne i et anlegg er det ikke bare gassky inne i prosessanlegget som er av interesse, men også størrelsen og posisjon på brennbar sky utenfor det mest obstruerte området, da denne del av skyen for detonasjoner også vil bidra til trykkbølgeenergien. Detonasjoner inntreffer sjelden, og vil være mest relevant for de mest alvorlige hendelsene på større anlegg.

For hendelser inne i bygg eller prosessutstyr vil skystørrelse begrenses av størrelse på bygg eller utstyr. For slike scenarier vil det gjerne kreves betydelig mindre utslipp for å oppnå farlige gasskyer/støvskyer som vil gi betydelig lokal skade, noe som samtidig begrenser energi til trykkbølger i fjernfeltet.



Figur 3.5 - Eksempel på fordeling av brennbar skystørrelse gitt lekkasjestørrelse. Figuren viser som et eksempel at det er ca. 78% sannsynlighet for at en stor lekkasje vil gi en brennbar skystørrelse som er 4.000 m³ eller mindre (og 90% sannsynlighet for skystørrelse 6.500 m³ eller mindre)

Ved å kombinere informasjon om brennbare skystørrelser med tennkilder (se kapittel 3.5) etableres informasjon av antente skystørrelser som funksjon av frekvens, se Figur 3.6.



Figur 3.6 - Eksempel på sammenhengen mellom antente skystørrelser og kumulativ frekvens. Figuren viser som et eksempel at den totale frekvensen for å antenne en sky som er større eller lik 5.000 m³ er 1E-5 ganger pr. år. Total brannfrekvens er 1E-3 ganger pr. år

Valg av eksplosjonsmodell må sees i sammenheng med valg av modell for tennsannsynlighet, se kapittel 3.5. Mer avanserte tenmodeller (MISOF) forutsetter en transient eksplosjonsmodell hvor lekkasjeratene og skystørrelser vil variere med tid. De enklere tennsannsynlighetsmodellene (RIVM og OGP) forholder seg til en gitt skystørrelse eller lekkasjerate som da må bestemmes.

3.6.3 Beregning av eksplosjonstrykk inne i brennbar sky

Med tanke på risikobildet utenfor den brennbare skyen kan trykket i skyen (kildetrykket) estimeres ved enklere modeller, for eksempel som beskrevet som source strength i ref. /19/. Dette gir trykk uavhengig av skyens størrelse og form og benyttes i den såkalte multienergimetoden for trykkforplantning utenfor skyen.

Alternativt kan kildetrykket inne i den brennbare skyen bestemmes mer nøyaktig ved å ta hensyn til mulige skystørrelser og tilhørende frekvenser. En anbefalt standard for å etablere en trykkfrekvens fordeling inne i en sky er NORSOK Z-013 (ref. /17/), denne forutsetter bruk av CFD-simuleringer for både gassspredning og eksplosjon. Denne metodikken vil gi et estimat på sammenhengen mellom skystørrelse og eksplosjonstrykk. Ved bruk av CFD for input til Multienergimetoden anbefales det å benytte et representativt kildetrykk fra hvert simulerte CFD-scenario tilsvarende 50% av det høyeste trykket målt i et kontrollvolum for det scenarioet.

Ved bruk av CFD for å beregne eksplosjonstrykk er det svært viktig med en god 3D beskrivelse av geometri, dersom detaljeringsgrad av geometrimodell er for lav, vil dette ikke-konservativt gi for lave eksplosjonstrykk. Det er i tillegg viktig å vurdere et utvalg scenarivariasjoner (skyplassering og tenningspunkt) for å spenne ut utfallsrommet på en god måte.

3.6.4 Beregning av eksplosjonstrykk i fjernfelt

Når frekvensen for ulike antente skystørrelser og tilhørende trykk er kjent, kan man etablere de tilhørende eksplosjonslastene i fjernfeltet ved å beregne trykkforplantningen utenfor skyen. Dette kan enten simuleres ved CFD eller beregnes med enklere modeller som multienergimetoden (se f.eks. ref. /24/, /19/ og /18/).

Multienergimetoden forutsetter at skyen har form som en halvkule. Hvis forholdene tilsier at skyene vil få vesentlig annerledes former (for eksempel avlange som sigarer eller flate "pannekakeskyer"), vil de reelle fjernfelttrykkene kunne avvike vesentlig fra de som multienergimetoden beregner. I slike situasjoner anbefales det å benytte CFD-simuleringer også for fjernfelttrykkene.

En avgjørende parameter i Multienergimetoden er effektivitetsfaktoren ("Efficiency factor" i ref. /19/). Denne indikerer hvor stor andel av forbrenningsenergien i skyen som i praksis bidrar til generering av en ideell trykkbølge og brukes til å redusere skystørrelsen tilsvarende. Denne faktoren er derfor vesentlig for hvor raskt trykket avtar utenfor skyen. Veiledning på valg av effektivitetsfaktor kan finnes i ref. /19/ basert på ref. /20/. Effektivitetsfaktoren vil i prinsippet øke med trykket, og for detonasjoner er den 1.

I og med at trykket i fjernfeltet blir mindre avhengig av kildetrykket i den brennbare skyen dersom det er over ca. 1 barg, bestemmes fjernfelttrykket i slike situasjoner kun av skystørrelse og effektivitetsfaktor. Det betyr at man kan gjøre konservative estimater av eksplosjonslaster i fjernfeltet uten å kjøre eksplosjonssimuleringer ved å anta at kildetrykket i skyen er > 1 barg og benytte en høy effektivitetsfaktor.

Det vil imidlertid være et nærområde rett utenfor skyen hvor trykket fremdeles kan holde seg høyt eller øke ved kildetrykk over 1 barg. Hvis risikokonturene for 3. part faller i dette området, er det derfor viktig at kildetrykket beregnes med tilstrekkelig nøyaktighet.

Se kapittel 3.6 for tålegrenser for eksplosjonslaster.

3.7 Analyse av branner

Når det gjelder simulering av branner, vil valg av scenarioer i stor grad definere utstrekningen av risikokonturene. Når scenarioene er definert, vil energien i forbrenningen også være definert og

resultatene er mindre avhengig av valget av simuleringsverktøy enn det som er tilfelle med eksponering av brennbar gass, se kapittel 3.4.2. Som følge av dette, er det i dette kapitlet kun gitt en summarisk beskrivelse av analyse av branner.

Branner kan sorteres i tre ulike typer, og alle typene må vurderes i risikoanalysen dersom de er relevante:

- **Flashbranner.** Dersom en brennbar gass, brennbare væskedråper eller brennbart støv blandes med luft og deretter tennes vil store mengder brennbart materiale kunne forbrennes på kort tid. Forbrenningen i en flashbrann vil i hovedsak foregå der stoffet finnes i brennbar konsentrasjon, men på grunn av temperaturstigning ved forbrenning vil luften i flammen utvide seg og kan skyve den uforbrente brennbare skyen utover til ca. dobbelt størrelse. Konsekvensene fra en flashbrann kan derfor oppleves godt utenfor den opprinnelige brennbare skyen. Dersom den brennbare skyen er i et område med høy utstyrstetthet vil dette akselerere forbrenningen og dermed også trykkoppbyggingen. En flashbrann kan da gå over til å regnes som en eksplosjon (deflagrasjon). Flashbranner har kort varighet, og har derfor mindre evne til å overføre store mengder varmeenergi til strukturer men kan skade personell. Forventningsrette modeller av flashbranner krever forventningsrette modeller av den brennbare skyen
- **Diffusive branner (pølbranner).** Dersom en væskelekkasje samles i et oppsamlingsbasseng hvor væsken kan fordampe (enten ved koking eller ved damptrykkdrevet fordampning), kan den fordampede gassen nå brennbare konsentrasjoner som kan antennes. I slike tilfeller vil brannen være styrt av tilgangen på brennbar gass, og på arealet av oppsamlingsbassenget. Geometriske forhold rundt oppsamlingsbassenget annet enn arealet (som bestemmer flammehøyden) er normalt av mindre betydning, men det bør likevel vurderes om det er forhold ved anlegget som kan fungere som skjerming av varmelast mot omgivelsene. Diffusive branner vil brenne så lenge det tilføres ny brennbar gass og de kan derfor ha lang varighet og avgi mye varme til omgivelsene. Normalt vil pølbranner generere mye røyk som vil maskere og dermed i stor grad redusere stråling til omgivelsene. Sterk vind vil imidlertid redusere maskeringen oppvinds og øke strålingen i den retningen
- **Jetbranner.** Dersom gass eller væske lekker ut ved høyt baktrykk, vil dette danne en jet med høy hastighet og høyt impuls. Denne jeten vil effektivt blande gass eller væskedråper med luft og kan derfor brenne med svært høy intensitet og avgi store mengder varme til omgivelsene. Jet-branner kan fortsette å brenne så lenge det tilføres nytt brennbart stoff, og de kan derfor ha lang varighet. Det skilles vanligvis ikke mellom varmelast fra gassbranner og spraybranner

Typiske varmelaster for ulike branner er gitt i NORSOK (ref. /21/) og FABIG (ref. /22/).

Hydrokarboner har høyere forbrenningsenergi enn de fleste andre brennbare stoffer og representerer derfor normalt en større brannrisiko. For brannegenskaper for andre stoffer enn hydrokarboner vises det til ref. /23/.

I tillegg til varmelasten må det tas hensyn til røykgassene fra brannen der disse kan ha betydning for utrekningen av risikokurvene. Dette er spesielt viktig der stoffene som brenner avgir giftig røykgass. Eksempelvis vil en brann i klorerte hydrokarboner avgi saltsyre. Et annet eksempel er brann i kunstgjødsel som medfører utvikling av nitrøse gasser.

Merk at brannberegninger i mindre grad enn eksplosjonsberegninger og spredningsberegninger er avhengige av valg av simuleringsverktøy (se kapittel 3.4.2), men dersom de analyserte brannene vesentlig endrer karakter og konsekvens ved at de treffer hindringer, bør CFD vurderes (se retningslinjer i kapittel 3.4.2). Spesielt gjelder dette vurdering av barrierer mot eskalering og eksponering av 3. part rett utenfor anlegget.

3.8 BLEVE og andre hendelser

3.8.1 BLEVE

BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) opptrer normalt når en trykktank med væske lagret betydelig over kokepunktstemperaturen går til brudd. Dette kan resultere i ulike scenarier

og vil kunne generere betydelige varmelaster, flygende fragmenter og eventuelt trykkbølger til omgivelsene. I og med at begrepet BLEVE ofte brukes noe upresist er det imidlertid viktig å vurdere hva som faktisk kan skje ved brudd på en tank.

Brudd kan enten skje ved svekkelse av tanken på grunn av branneksposering eller svikt av tanken av andre grunner uten ytre brannpåvirkning, for eksempel godstogavsporing og kollisjon. En BLEVE karakteriseres ofte som fysisk hvis eksplosjonen kun er fysisk (ekspansjon av gass som følge av faseovergang ved trykkfall) eller som kjemisk hvis kjemiske reaksjoner (brann eller eksplosjon) ytterligere bidrar til konsekvensbildet. De ulike forholdene ved et tankbruddscenario må derfor vurderes separat for å få et fullstendig konsekvensbilde, se f.eks. ref. /24/ Chapter 6.5.7, ref. /25/ og /26/. Formlene i ref. /24/ gjelder for LPG, for fluider med annen molvekt kan tilsvarende formler i ref. /27/ benyttes.

Trykkbølger vil genereres av flere ulike årsaker som må vurderes separat:

- I en tank med trykksatt gass vil ekspansjonen av gassen ved brudd sette opp en trykkbølge i omgivelsene. Denne første trykkbølge regnes normalt ikke med som en del av BLEVE fenomenet, men den kan være største bidragsyter til trykkbølger dersom gassfasen har et betydelig volum i kombinasjon med høyt trykk og det er kort avstand til 3. part eller det er betydelig grad av innelukkethet omkring tanken
- Hvis væsketemperaturen ved brudd er over kokepunktet ved omgivelsene, men ikke overhetet, dvs. $T_{\text{koking}} \text{ ved omgivelsestrykk} < T_{\text{væske}} \text{ ved brudd} < T_{\text{overhetet}}$ hvor $T_{\text{overhetet}} \sim 0,89 T_{\text{kritisk}}$, vil væske koke ved bruddet, men ikke spontant nok til å sette opp en sterk trykkbølge (såkalt "kald" BLEVE). Ved brennbar væske kan imidlertid brannball dannes, men denne vil i så fall ikke brenne like intenst eller stige like høyt som for "varm" BLEVE eller sette opp noen trykkbølge
- Hvis væsken ved bruddtidspunktet er overhetet, dvs $T_{\text{væske}} \text{ ved brudd} > T_{\text{overhetet}}$, vil man få spontan homogen koking som grunnet momentan ekspansjon vil sette opp en sterk sjokkbølge ("varm" BLEVE) i tillegg til en full brannball hvis væsken er brennbar og tar fyr. Denne trykkbølge nummer to kan ofte komme samtidig med eller raskt etter trykkbølgen fra gasskappen. Dette er scenariet som oftest forbindes med BLEVE og som standard formler for høyde, diameter og varighet av brannball er ment å gjelde for, som f.eks. i ref. /24/. Hvis trykk fra BLEVE beregnes, må man ta hensyn til både trykk, temperatur og volum av væsken i tanken og størrelse av eventuell gasskappe

Legg merke til at det er væsketemperaturen ved brudd som avgjør om det blir kald eller varm BLEVE. F.eks. vil brudd på en tank med propan med omgivelsestemperatur gi kald BLEVE, men hvis en brann rundt tanken varmer opp propanen til mer enn ca. 50 °C blir den overhetet og gir varm BLEVE.

I tillegg til trykk og varmestråling fra BLEVE vil også større og mindre fragmenter av tankskallet fly som prosjektiler og kunne utgjøre et betydelig risikomoment for 3. part, for data se f.eks. ref. /26/.

Normalt forutsetter BLEVE et spontant brudd på hele trykktanken, men sprekker eller større lekkasjer i trykktanker har også vist seg å kunne medføre fullt brudd med konsekvenser som BLEVE (BLCBE - Boiling Liquid Compressed Bubble Explosion), selv om væsken ikke er helt overhetet (ref. /28/). Merk at dette ikke forutsetter en ytre brann som svekker skallet.

For tanker med væskeblandinger uten veldefinert kokepunkt må det gjøres et estimat av hvor stor andel av væsken som blir revet opp i dråper og ikke vil falle ut ved brudd på tanken. Dette kan estimeres ved å beregne hvor stor volumandel av væsken som kan koke ved brudd. Multiplisert med tanktrykket gir dette en ekspansjonsfaktor E. Analyse av RELEASE-forsøkene med ulike væsker, ref. /29/, viser at andelen væske som blir revet opp i dråper grovt sett er proporsjonal med E, hvor all væske kan antas omgjort til væskedråper ved $E \sim 100$. En eventuell trykkbølge kan beregnes med utgangspunkt i brudd i en tank med totalt gassvolum = opprinnelig gassvolum + volum av frigjort gass, alt ved tankens trykk.

3.8.2 Roll-over og boil-over

I tanker med lavtemperatur væsker som LNG og ammoniakk vil det pga. avdamping eller påfylling av væske med annen tetthet kunne oppstå en lagdeling. Varmelekkasjer inn i tanken vil varme opp det nederste laget, tettheten reduseres og etter hvert vil lagene kunne blandes. Avdampingsraten vil da øke til langt ut over det normale, og hvis dette ikke er tatt tilstrekkelig hensyn til i dimensjonering av tankens sikkerhetsventiler, vil tanken kunne overtrykkes.

Risikoen forbundet med roll-over er vanskelig å fastsette, men bør kontrolleres ved å ha operasjonell kontroll på faktorer som medfører stratifisering i tanker; primært sammensetning, temperatur og tetthet av væske som fylles, samt aldri (tetthetsendring gjennom avdamping). For operasjonell støtte finnes det flere modeller for å overvåke væskens tilstand og predikere roll-over med tilhørende fordampingsrate, se f.eks. ref. /30/.

Frekvensen på roll-over er vanskelig å definere, men litteraturen viser til 20-30 talls kjente hendelser av ulikt omfang. Alle hendelsene viser til trykkavlastning over lengre tid, med tilhørende spredning av brennbar gassky som konsekvens. Videre er problemet i hovedsak knyttet til atmosfæriske eller nær-atmosfæriske tanker.

Boil-over er et fenomen som kan skje ved brann i lagertanker med oljeprodukter hvor det er et lag vann på bunnen av tanken. Oljen vil varmes opp av brannen og ved langvarig brann vil til slutt vannet nå koketemperatur, spontant koke, ekspandere og rive med seg oljen over. Resultatet er en voldsom økning i brannintensitet ofte i form av en brannball og økning i tilhørende fareavstander. Risikoen for boil-over styres best ved til enhver tid å minimalisere eller fjerne vann i bunnen av lagertanker. En omfattende oversikt over fenomenet og tilhørende beregningsmodeller for tid til boil-over og gjenværende væskemengde er gitt i ref. /31/. Lignende problemstillinger vil kunne oppstå i trykksatte separatortanker (vann, olje, gass) dersom innholdet varmes til over atmosfærisk kokepunkt for vann før et eventuelt brudd på tank.

Sannsynlighet for roll-over og boil-over reduseres normalt gjennom etablering av dedikerte driftsprosedyrer. Hendelsene må derfor gis oppmerksomhet i HAZID gjennomgangen.

3.8.3 Eskalering av hendelser

Normalt vil mindre hendelser, som f.eks. mindre branner eller eksplosjoner, ikke ha direkte innvirkning på risikokonturer for 3. part. Det er imidlertid viktig å vurdere om en liten hendelse kan eskalere til en større som kan påvirke omgivelsene. Typisk kan dette være en begrenset brann eller eksplosjon som medfører brudd på utstyr som frigjør giftige stoffer eller større mengder brennbar materiale. Viktige momenter som må vurderes er i hvilken grad det finnes tilstrekkelige barrierer, enten ved beskyttelsessystemer eller designstyrke, som kan forhindre slik eskalering.

3.9 Etablere risikokonturer

En risikoanalyse bør settes opp slik at risikokonturene representerer et godt estimat på «alle» ting som kan skje – med deres innbyrdes sannsynlighet (frekvens). Dette betyr at uansett hva som eventuelt skjer på et anlegg så bør risikoanalysen ha vurdert et tilsvarende scenario.

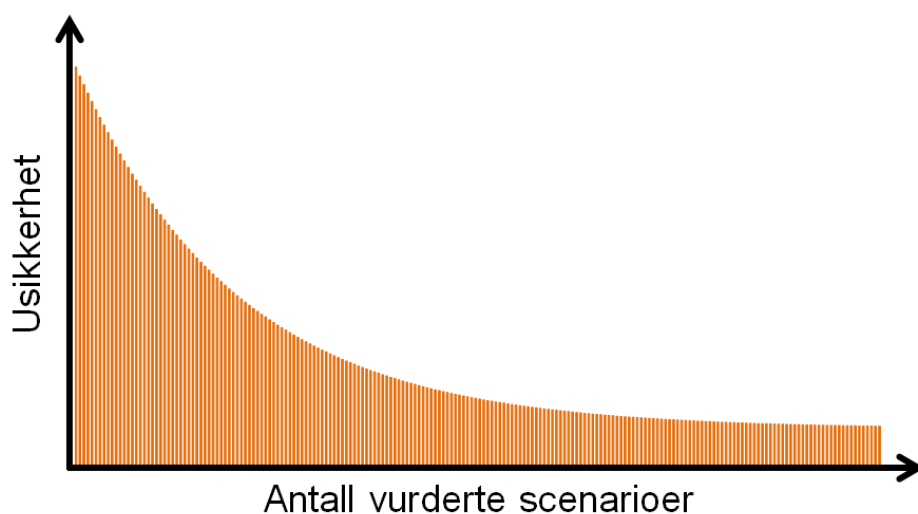
I virkeligheten er det uendelig mange forskjellige scenarioer (slutthendelser) som kan inntreffe på et anlegg, og man må i praksis diskretisere utfallsrommet for topphendelsene (ref. kap. 3.2) slik at man vurderer et tilstrekkelig antall variasjoner av disse topphendelsene. Dette må gjøres med å velge et endelig antall lekkasjepunkter, lekkasjerater, lekkasjeretninger, vindretninger og vindhastigheter. I tillegg må man velge et begrenset antall tenntidspunkter og tennsteder siden alle variasjoner av dette vil gi ulike konsekvenser. Dette vil kunne ende i svært mange ulike scenarioer. Som eksempel nevnes at om man antar 100 lekkasjepunkter, 10 lekkasjerater, 6 lekkasjeretninger, 12 vindretninger, 10 vindhastigheter, 10 tenntidspunkter og 5 tennsteder for hvert tidspunkt vil man ende opp med 36 millioner scenarioer, og det vil derfor være behov for å skille på simulerte og vurderte scenarioer.

Ved å bruke symmetribetraktninger og forenklete fysiske modifiseringer på allerede simulerte scenarier kan man redusere betydelig antall vurderte scenarier man faktisk trenger å simulere. Det er således anledning for å vurdere et stort antall scenarier basert på et betydelig redusert antall simulerte scenarier.

Dersom det gjøres symmetribetraktninger for å redusere antall simulerte scenarier, er det viktig at man samtidig vurderer godheten i fysikken i scenarioene, etter prinsippene diskutert i kapittel 3.4.2. Det er således mulig å simulere noen av scenarioene med empiriske verktøy og andre med CFD-verktøy, avhengig av hvor mye av fysikken i scenarioene det er nødvendig å fange opp (og dermed være i stand til å beregne representative risikokonturer).

Selv om lekkasjefrekvensfordelingen kan vurderes å være representativ for anlegget (se kapittel 3.3.2) og de simulerte scenarioene er utførte med riktig simuleringverktøy i forhold til retningslinjene i kapittel 3.4.2, er det fortsatt avgjørende at det vurderes et tilstrekkelig antall hendelser til at utfallsrommet spennes ut med tilstrekkelig nøyaktighet. Dette er nødvendig for at risikokonturene skal bli representative for det gitte anlegg og dets omgivelser. En risikoanalyse må derfor diskutere om antallet vurderte scenarier er tilstrekkelig, og i hvilken grad antallet påvirker de beregnede risikokonturene.

En risikokontur (f.eks. 10^{-7} -konturen) vil være svært usikker dersom den er basert på for få scenarier. Man vet ikke om denne er konservativ eller ikke-konservativ med mindre man vet om de simulerte scenarioene er mer eller mindre alvorlige enn de som ligger rundt den "faktiske" risikokonturen. Feilen mellom den beregnede risikokonturen og den "faktiske" risikokonturen blir mindre med økende antall vurderte scenarier, se Figur 3.7. Merk at selv om man simulerer mange scenarier at i praksis "alle mulige" hendelser er simulert, så forsvinner ikke usikkerheten rundt frekvensbildet (hvor sannsynlig er de ulike hendelsene).



Figur 3.7 - Usikkerhet som funksjon av antall vurderte scenarier - illustrasjon

Antallet scenarier som må vurderes for å etablere tilstrekkelig nøyaktige risikokonturer vil variere for ulike anlegg avhengig av størrelse og kompleksitet. Tilsvarende vil behovet for antall beregninger for de forskjellige konsekvensvurderingene (brann, spredning, eksplosjon) også variere.

Ved topphendelse brann i oppsamlingskar i forbindelse med pølutslipp, vil det for eksempel ikke være behov for å variere antall utslippsposisjoner eller benytte mange store lekkasjerater, og ved bruk av et empirisk verktøy kan det være tilstrekkelig med noe få forskjellige vindstyrker for å spenne ut utfallsrommet for topphendelsen. Ved bruk av CFD vil det derimot kunne være mer behov for, for eksempel, å vurdere forskjellige vindretninger.

For vurderinger av topphendelse gasseksplosjon vil det normalt være behov for et større antall beregninger, med forskjellige utslippsrater, utslippsretninger, vindstyrker og vindretninger, tenningspunkter og tidspunkt. Fordi det er urealistisk å vurdere så mange scenarier i detalj, kan det være behov for å bruke lite innsats på scenarier og scenariovariasjoner med liten innvirkning på risiko, eksempel på forenklinger:

- For lekkasjerater som ikke danner skystørrelser som kan gi eksplosjonstrykk av betydning, er det ikke behov for å vurdere en rekke vindretninger og vindstyrker, alle disse scenariene kan representeres av beregningen for vindstille
- Det kan være behov å forenkle analysene ved dekobling av sprednings- og eksplosjonsstudiene slik at spredningsstudiet med påfølgende transient tennvurdering gir frekvens for antente skystørrelser (ekvivalent støkiometrisk skymetodikk), og eksplosjonsstudiet gir eksplosjonslaster som funksjon av antent skystørrelse
- La visse vindretninger representere scenarier for vindretninger som kan forventes å gi lignende strømningsfelt inne i området

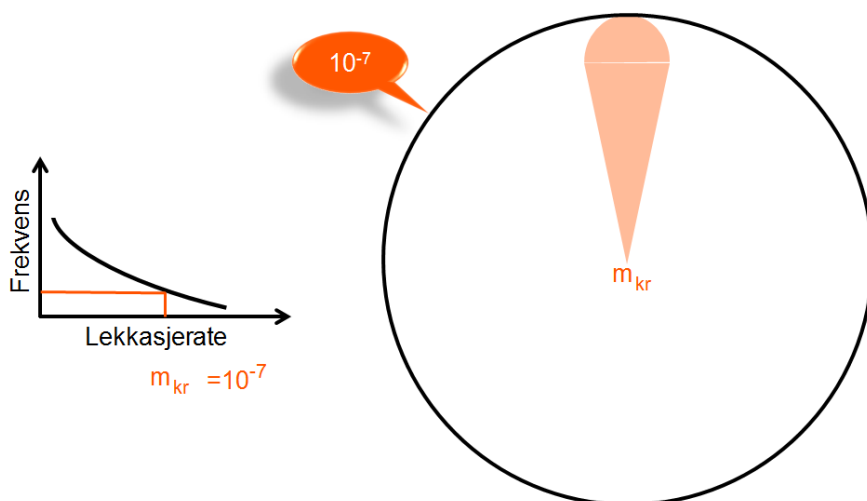
På denne måten kan et case med et stort antall scenarier reduseres til et overkommelig antall, samtidig som det vil være mulig å simulere ekstra scenarier med de lekkasjeratene som bidrar mest til risikokonturene.

En risikoanalyse må analysere tilstrekkelig antall mulige scenarier for at resultatene skal bli hensiktsmessige. Dette betegnes ved at risikoanalysen må spenne ut en tilstrekkelig del av utfallsrommet til at risikokonturene blir representative for det analyserte anlegg. Nedenfor belyses viktige faktorer som påvirker risikokonturene. Metoder for bearbeiding av risikokonturene er også beskrevet.

3.9.1 Effekt av antall retninger

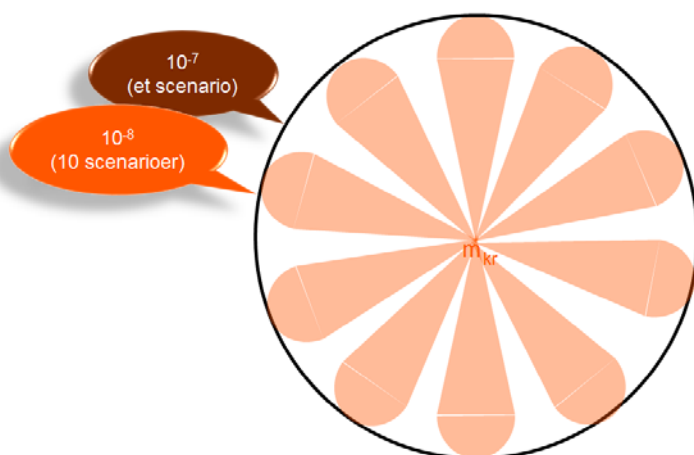
Antall retninger som vurderes, både lekkasjeretninger og vindretninger for et gitt lekkasjepunkt, har betydning for hvor risikokonturene vil ligge. Dette kan illustreres med følgende idealiserte eksempel for variasjon av lekkasjeretning (hvor vindforhold er idealisert til å alltid være vindstille):

Dersom alle mulige lekkasjer sorteres etter lekkasjestørrelse, vil man kunne identifisere en lekkasjerate som har en gitt frekvens, for eksempel 10^{-7} pr. år (eller mindre). Om man simulerer en slik kritisk lekkasjestørrelse (m_{kr}) vil man få et resultatfelt med en gitt kritisk lengde og bredde til brennbar (eller giftig) konsentrasjon, se Figur 3.8.



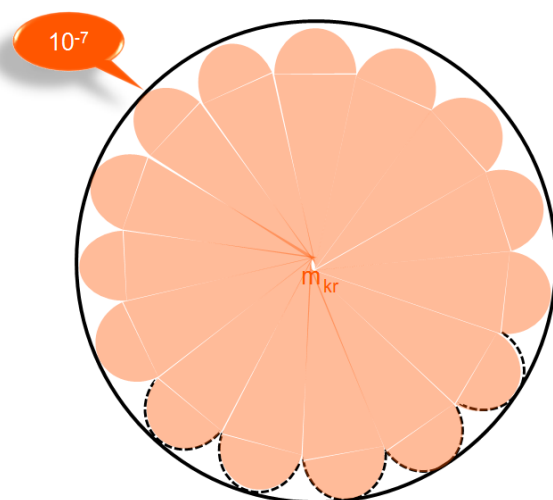
Figur 3.8 - Risikokontur fra å spenne en sirkel rundt et enkelt scenario med kritisk lekkasjerate (m_{kr}). Figuren indikerer at alle punkter innenfor sirkelen har lik frekvens for eksponering ($> 10^{-7}$ pr. år)

Den kritiske lekkasjeraten kan inntreffe i flere lekkasjeretninger og frekvensen kan derfor fordeles på hver av disse retningene. Om den kritiske raten f.eks. deles inn i 10 retninger og frekvensen antas fordelt på disse i like retningsintervaller, vil hver av disse representere 1/10 av den opprinnelige frekvensen, altså 10^{-8} . Dersom man nå tegner en risikokontur ved å tegne en sirkel rundt tuppene av disse scenarioene, vil man få et annet resultat. Scenarioene har samme lengde og bredde som tidligere, men de har en frekvens som er 1/10 av det senarioet som representerte alle 10 retningene i en retning. Den samme risikokonturen som i Figur 3.8 representerte et estimat på 10^{-7} vil nå representere et estimat på 10^{-8} , se Figur 3.9.



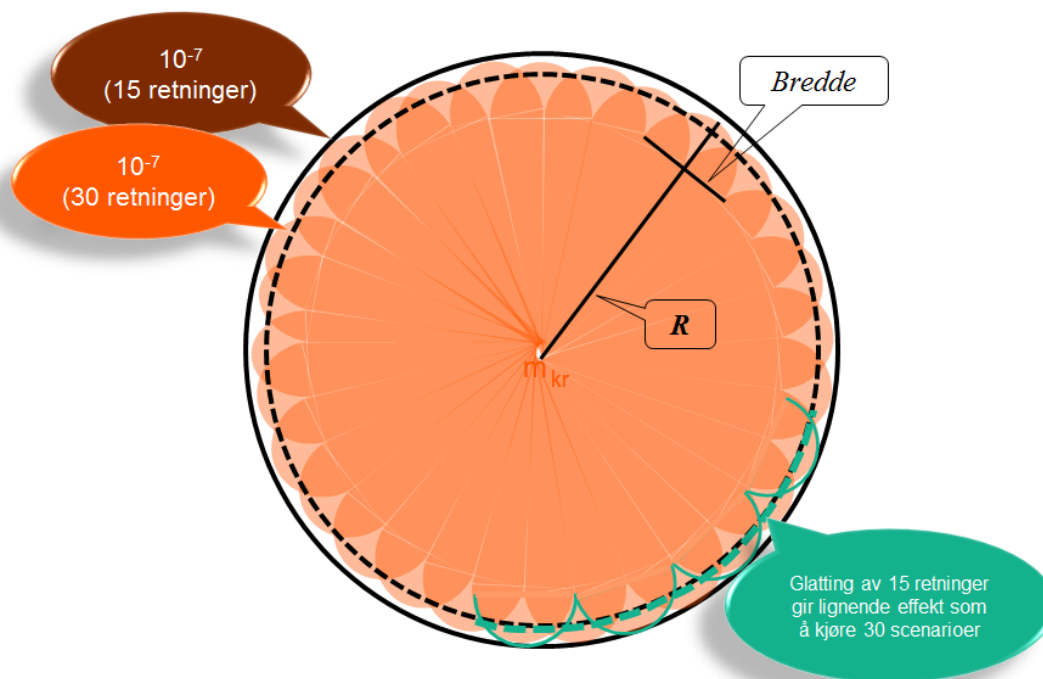
Figur 3.9 - Risikokontur fra å fordele kritisk rate på 10 like retninger. Figuren indikerer at alle punkter innenfor sirkelen har lik frekvens for eksponering ($> 10^{-8}$ pr. år)

Om man fortsetter å fordele det kritiske scenarioet på flere retninger, vil man få enda lavere frekvens pr. scenario, men før eller siden vil retningene bli så mange at scenarioene begynner å overlape hverandre. Da begynner man å se en konvergens i risikokonturen. Dette kan illustreres ved et eksempel hvor 15 retninger akkurat overlapper hverandre, og man antar at hver av disse har en frekvens på 10^{-7} pr. år. Dette betyr at innenfor tangentkurven vil man ha en eksponering på 10^{-7} i hvert eneste punkt, og tangentkurven representerer en 10^{-7} -kurve.



Figur 3.10 - Risikokontur med frekvens 10^{-7} estimert med total 15 forskjellige lekkasjeretninger. Merk at isokonturen ofte defineres som randen langs scenarioene (stiplet linje), men i dette eksempelet som skal illustrere effekten av å kjøre flere retninger er isokonturen definert som sirkelen som tangerer ytterpunktene av scenarioene

Hvis man nå velger å fordoble antall vurderte retninger (til 30), så vil hvert av scenarioene få halve frekvensen, men de vil begynne å overlape hverandre slik at hoveddelen av feltet fortsatt vil få en akkumulert frekvens på 10^{-7} pr. år i "alle punkter". Helt ytterst i feltet vil man se at de overlappede tuppene vil ha litt kortere utstrekning enn de ikke overlappende tuppene, se Figur 3.11, men forskjellen er betydelig mindre enn det vi så tidligere (Figur 3.9) der man ikke hadde overlappende scenarier. Vi ser nå at vi har fordelt kritisk rate på nok retninger til at isokurven begynner å konvergere.



Figur 3.11 - Risikokontur med frekvens 10^{-7} estimert med total 30 forskjellige lekkasjeretninger

Figur 3.11 viser at det er simulert nok scenarier når antall nødvendige retninger er proporsjonal med $Bredde/2\pi R$.

En risikokontur som er midlet eller glattet vil være mer representativ enn om man benytter den ytterste "taggen" i en taggete kontur.

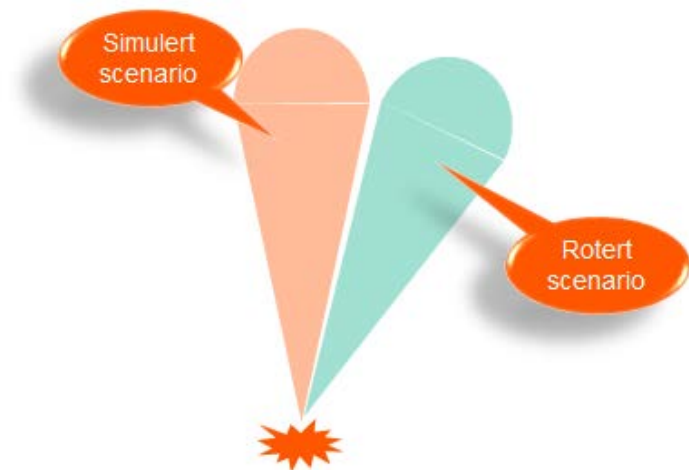
I en reell risikoanalyse vil det være mulig å variere flere faktorer (lekkasjeretning, vindretning) slik at de glatter ut feltet. I slike tilfeller vil det være glattheten på feltet, samt samspill med dominerende bygg eller terreng, som indikerer om man har kjørt nok scenarier.

Fra figurene over kan man også konkludere at det å benytte få scenarier vil kunne medføre større risikokonturer, enn ved bruk av flere scenarier.

3.9.2 Interpolasjon av simulerte scenarier

Dersom man har simulert en rekke scenarier for å få med den fysikken man vurderer som vesentlig for utfallsrommet av en tophendelse, kan man estimere konsekvensen av scenarier som er relativt like de simulerte ved å benytte seg av symmetri, rotasjon, og interpolasjon. Frekvensen må da fordeles på det totale antall vurderte scenarier. Rotasjon kan benyttes for eksempel når man forventer at en liten endring i vindretning vil gi samme fareavstand, men bare i en litt annen retning. I slike tilfeller kan man rotere det simulerte resultatfeltet rundt utslippspunktet for å vurdere det nesten like scenarioet, se Figur 3.12. Usikkerheten ved å rotere blir større jo mer man roterer, men noen typer scenarier kan likevel roteres mye og fortsatt vurderes som forventningsrett. Et eksempel på et scenario som kan roteres mye og fortsatt vurderes som forventningsrett er fordampning fra et oppsamlingsbasseng som ligger i et flatt

område uten betydelige obstruksjoner. Motsatt kan man si at et scenario med høyhastighetsutslipp i et område hvor både vind og jettens momentum påvirkes av objekter (bygg terreng etc.) ikke kan roteres mye før fysikken blir svært forskjellig.



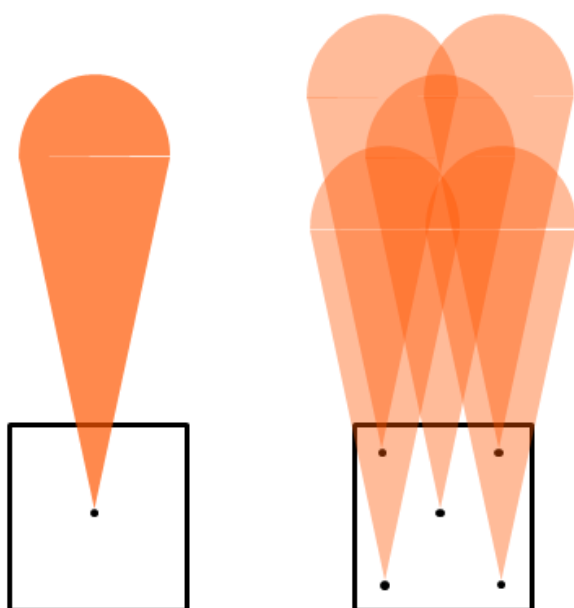
Figur 3.12 - Rotasjon av et simulert scenario for å vurdere et lignende scenario

Interpolasjon er en annen metode som kan benyttes til å vurdere scenarioer med litt forskjellige lekkasjerater eller vindhastigheter enn de som er simulerte. I en interpolasjon av type "frost sky" (frozen cloud) kan man justere konsentrasjonen i hvert kontrollvolum for å vurdere hvordan et scenario med en litt annen utslippsrate kan se ut. For eksempel, om man dobler gasskonsentrasjonen i alle kontrollvolumer i resultatfeltet kan dette representere et utslipp som er dobbelt så stort (dobbel masserate) som det simulerte. Metodikken er unøyaktig og må brukes med forsiktighet, det anbefales ikke å bruke denne interpolasjonsmetodikken for rater som er mer enn det dobbelte eller halve av det simulerte.

Felles for alle typer interpolasjoner og rotasjoner er at man ikke bør benytte dette for å vurdere scenarioer som er svært forskjellige fra de simulerte.

3.9.3 Antall lekkasjepunkter

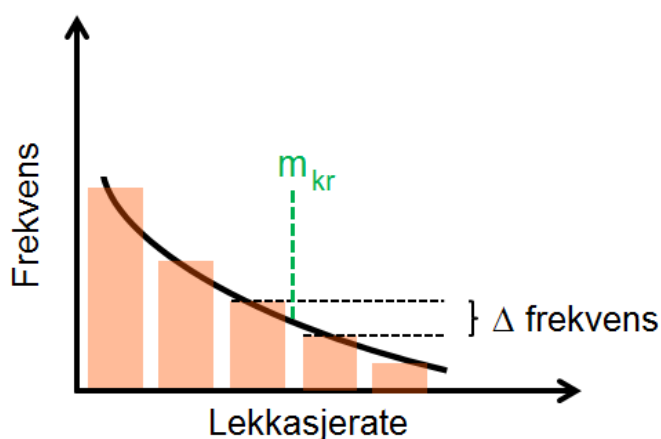
En lekkasje kan i prinsippet oppstå på svært mange steder i et prosessanlegg. I risikoanalysen må man velge et endelig antall scenarioer, og dermed også et endelig antall lekkasjepunkter, for å modellere "alt" som kan skje i et område. Antallet lekkasjepunkter man velger, vil kunne påvirke hvor de beregnede risikokonturene blir liggende. Men, feilen man gjør ved å velge for få lekkasjepunkter kan estimeres til maksimalt å være i størrelsesorden lik dimensjonen på prosessområdet, se Figur 3.13 (hvor prosessområdet er markert med en sort firkant).



Figur 3.13 - Effekten av å velge et lekkasjepunkt i forhold til 5 lekkasjepunkter i et område

3.9.4 Antall simulerte rater

Om inndelingen av simulerte rater er for grov, vil ratene som representerer kritisk modellert lekkasje (f.eks. 10^{-7} frekvens) kunne være enten litt for små eller litt for store i forhold til de ratene som representerer den reelle kritiske raten. Risikokonturene vil dermed få en tilsvarende feil i frekvensen på de beregnede risikokonturene. Feilen på disse frekvensene vil imidlertid være begrenset til forskjellen i frekvens på raten som representerer den virkelige kritiske raten, og den raten som representerer den beregnede kritiske raten. Denne feilen er begrenset av frekvensforskjellen mellom den simulerte raten som ligger over og under den reelle kritiske raten, se Figur 3.14.

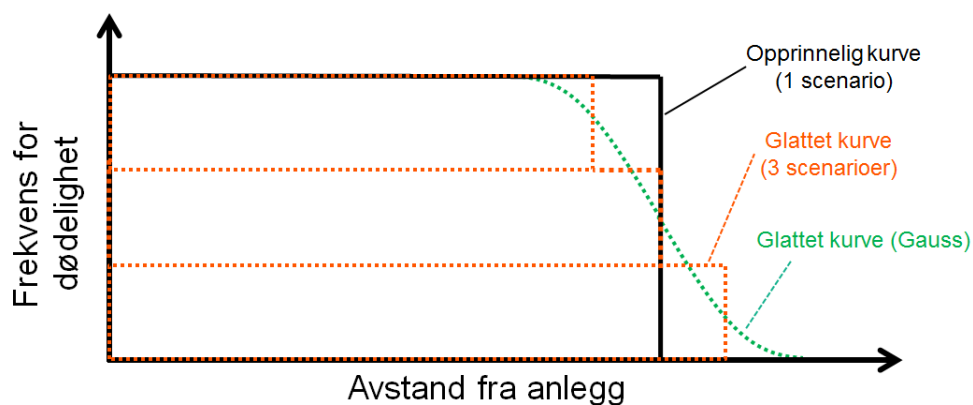


Figur 3.14 - Estimert feil i isokonturer er proporsjonal med forskjellen i frekvens mellom de ratene som ligger over og under den kritiske raten (betinging at man vet kritisk rate før man kan vurdere feil). Simulerte rater er markert i oransje

3.9.5 Glatting av risikokonturene

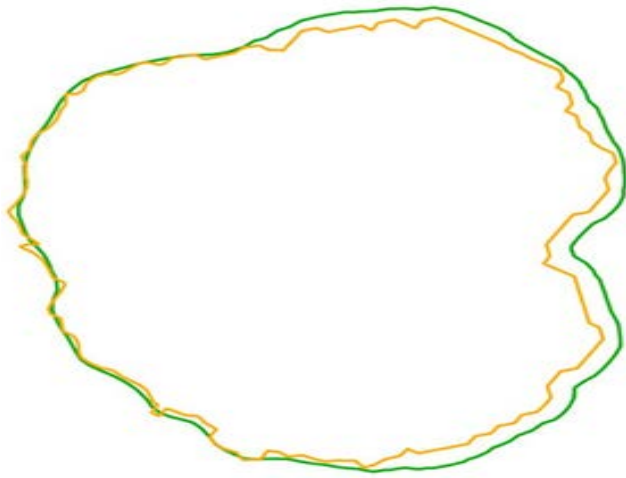
Om en beregnet risikokontur er taggete uten at dette kan forklares med spesifikke forhold knyttet til anlegget, er dette trolig fordi konturene er basert på for få scenarier. Fra Figur 3.11 kan man se at en glatting av konturene må antas å gjøre disse mer forventningsrette, og det er derfor anbefalt å glatte kurver som er taggete uten at dette kan knyttes til anlegget.

Glattning av en taggete kurve har en tilsvarende effekt for resultatfeltet som å kjøre flere scenarier med litt ulike inputparametere. I Figur 3.15 er dette illustrert ved å fordele frekvensen til et scenario over 3 ulike scenarier med litt ulik lekkasjerate. Dette er sammenlignet med effekten av å glatte det ene scenarioet med en normalfordelt glattefunksjon. Merk at formen på den glattede kurven (grønn kurve) bestemmes av det valgte standardavviket i den normalfordelte glattefunksjonen (Gauss). Formen på den oransje glattningen er bestemt av hvor mye de parameterne som bestemmer scenarioene varierer.

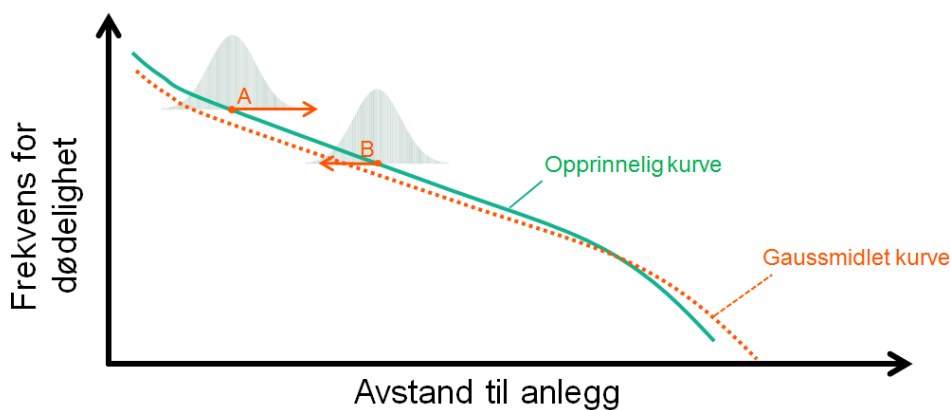


Figur 3.15 - Illustrasjon som viser at dersom man kjører kun et scenario som representerer all frekvens for dødelighet (hvor dødelighet er fastsatt ved terskelverdi, se kapittel 0), så kan frekvensfeltet enten glattes ved å kjøre flere scenarier (den oransje kurven viser den samme frekvensen fordelt over 3 litt ulike scenarier) eller ved å benytte en normalfordelt glattefunksjon (Gaussglatting, se grønn kurve)

Figur 3.16 viser en risikokontur som er glattet ved å benytte en normalfordelt glattefunksjon (Gaussfordeling med standardavvik 1,0). En slik glattefunksjon glatter frekvensfeltet ved at hvert punkt justeres ut fra verdien i omliggende punkter i alle retninger med en vektning i henhold til normalfordelingen basert på avstand til det vurderte punkt. Standardavviket avgjør hvor mye vekt punkter skal få i justeringen som funksjon av avstand til det glattede punkt. Den glattede kurven (grønn kurve) følger hovedtrendene fra risikokonturen, men glatter ut de små ujevnheterne. Merk at selv om en slik glattning vil gjøre risikokonturene mer forventningsrette i de tilfellene hvor de små ujevnheterne (taggene) ikke kan knyttes til forhold ved det analyserte anlegget, vil en slik glattning også medføre at den flytter frekvens fra de høye frekvensverdiene mot de lavere verdiene (i praksis flyttes frekvens fra selve anlegget og utover i alle retninger), se Figur 3.17. En Gauss glattning med standardavvik 1,0 – 4,0 vurderes å være akseptabelt for å ta bort små ujevnheter (tagger).



Figur 3.16 - Eksempel på risikokontur (oransje) som er glattet ved en normalfordelt (Gauss) glatting med standardavvik = 1,0 (grønn kurve)



Figur 3.17 - Illustrasjon som viser at en glattefunksjon vil flytte frekvens fra høye frekvensverdier mot lave frekvensverdier. Når frekvens flyttes gjennom normalfordelingen, vil flere scenarier flyttes mot lavere verdier (A) enn høye verdier (B) – rett og slett fordi punkt A har høyere frekvens

Merk også at i et reelt utslipp vil vindforholdene normalt være dynamiske (i konstant endring). Dette vil påvirke hvordan utslippet sprer seg og hvor brennbare og giftige konsentrasjoner vil oppstå. Dynamiske vindforhold ("meandering") vil normalt ikke benyttes i spredningsberegningene som utføres i en risikoanalyse selv om dette til dels er tatt med i kalibreringen av simuleringsverktøyene, og da særlig i kalibreringen av empiriske verktøy. En glatting av resultatfeltet vil også kunne sies å representere de samme effektene som man ville oppnådd ved å bruke dynamiske vindfelt i simuleringene.

3.9.6 Raffinere risikokonturer i kritiske områder

Risikokonturer kan detaljeres i enkelte områder av spesiell interesse. Gjennom en raffinering er formålet at konturene skal bli mer forventningsrette i et gitt område, for eksempel et område hvor man forventer interessekonflikter.

En risikokontur kan raffineres i et område uten å påvirke andre områder ved å kjøre flere simuleringer kun der hvor scenarioene eksponerer området man ønsker raffinering (målområdet).

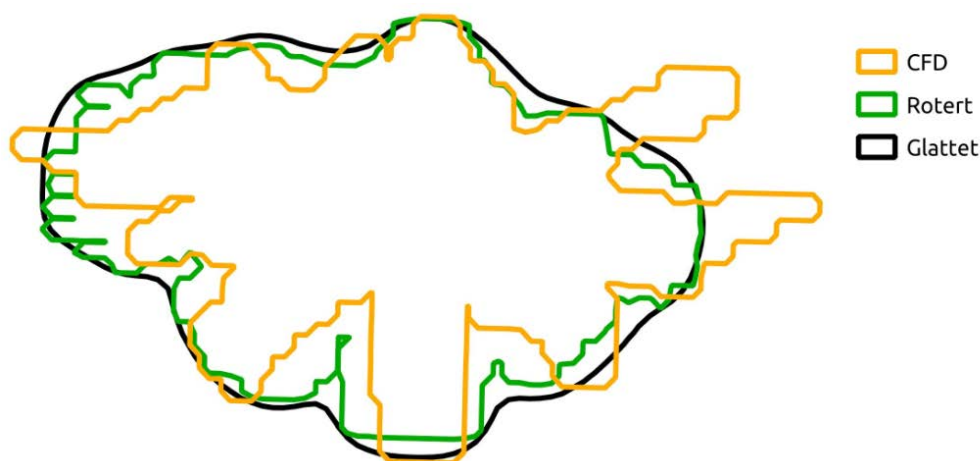
For å vurdere om det er kjørt tilstrekkelig med tilleggssimuleringer i målområdet vises det til prinsippene diskutert i kapittel 3.9.

3.9.7 Oppsummering – risikokonturer

Dersom risikokonturene skal bli forventningsrette må analysen spenne ut en tilstrekkelig del av utfallsrommet for topphendelsene. Følgende tre steg anbefales som en robust måte å oppnå forventningsrette risikokonturer:

- Først kjøres tilstrekkelig med simuleringer/beregninger til at hovedfysikken i alle relevante scenarier blir fanget opp. Dette må gjøres med en rekke enkeltscenarier, og det må gjøres med modelleringsverktøy som er i stand til å fange opp relevant fysikk i scenariene, se kapittel 3.4.2
- Dersom risikokonturene bærer tydelig preg av at for få scenarier er simulert (typisk ved at konturene har tagger/armer knyttet til de simulerte enkeltscenariene), kan man benytte de simulerte scenarier til å estimere scenarier som vurderes som tilstrekkelig like de som er simulert. Her vil man typisk rotere eller manipulere konsentrasjonsfeltet for å estimere lignende scenarier som de som er simulerte. En slik interpolasjon/ekstrapolasjon vil miste noe av fysikken i de simulerte scenariene (for eksempel vil strømming rundt store objekter ikke fanges opp riktig), men de vil ha den effekten at de glatter ut frekvensen på flere hendelser
- Dersom risikokonturene fortsatt har små ujevnheter etter at interpolasjon/ekstrapolasjon er utført, kan man glatte resultatfeltet (f.eks. med en Gaussglatting som vist i Figur 3.16). En slik glatting vil ikke ivareta fysikken direkte, men kun representere en glatting av resultatfeltet. En glatting som jevner ut små ujevnheter i resultatfeltet (som ikke er knyttet til forhold knyttet til anlegget) vil gjøre risikokonturene mer forventningsrette, se Figur 3.11

Et eksempel på prosessen over er vist i Figur 3.18. Den oransje risikokonturen representerer en gitt frekvens basert på kun CFD-simuleringer av brennbar gass. Fra taggene på konturen kan man se at det er simulert for få vindretninger (12 retninger er simulert – og man kan telle 12 tagger på kurven). I den grønne kurven er hver CFD-simulering brukt til å vurdere 3 ekstra scenarier med vindretning nær de simulerte ved å rotere de simulerte scenariene rundt lekkasjepunktet. Lekkasjefrekvensen for det simulerte scenariet er fordelt på de 4 representative vurderte scenariene. Dermed kan en ny risikokurve lages basert på 48 retninger istedenfor 12. Den grønne risikokurven representerer resultatene for de interpolerte resultatene. Den grønne kurven er glattere og må vurderes som mer forventningsrett enn den oransje. Den sorte kurven er fremkommet ved å glatte den grønne kurven (glattingen er foretatt ved en Gauss glatting med standardavvik 2.0). Merk at det ikke er den grønne kurven som blir glattet direkte, men hele 3D frekvensfeltet. Men, når hele 3D frekvensfeltet glattes så flytter isokonturene for en gitt frekvens seg tilsvarende. Den glattede kurven forventes å være en mer forventningsrett kurve enn både den oransje kurven (12 retninger uten glatting) og den grønne kurven (48 retninger uten glatting).



Figur 3.18 - Eksempel på simulerte (CFD), vurderte (roterte) og glattede risikokurver

3.10 Beskrivelse av usikkerheter

Alle vurderinger som vesentlig påvirker hvor risikokonturene blir liggende, skal beskrives og diskuteres i risikoanalysen. Som et minimum, skal følgende faktorer beskrives og vurderes i forhold til om de bidrar til forventingsrette risikokonturer:

- Vurderinger av frekvens. Hyppigheten av topphendelsen skal representere det analyserte anlegget med alle relevante fysiske attributter og barrierer for å redusere lekkasjer, se kapittel 3.3. Det må gis en vurdering av om valgte frekvensmodell er representativ for det anlegget som skal analyseres og på hvilken måte eventuelle avvik er kompensert for
- Fysisk modellering. De fysiske modellene må vurdere tilstrekkelig av fysikken som inngår til at resultatene kan sies å bli forventningsrett for det analyserte anlegg, se kapittel 1.2. Valg av fysiske modeller og regneverktøy skal diskuteres i forhold til om de i tilstrekkelig grad ivaretar fysikken i hendelsene
- Modellering av utfallsrommet. Det skal diskuteres om det er vurdert og simulert tilstrekkelig antall scenarier til at risikokonturene kan vurderes som forventningsrette, se kapittel 3.9. Dersom det er vurdert så få scenarier at konvergens ikke kan dokumenteres, skal det diskuteres hvordan dette vil påvirke risikokonturene

Sensitivitetsanalyser bør benyttes for å identifisere de parametere eller antagelser hvor usikkerheten har størst betydning for risikokonturene, ref. kapittel 3 i Temarapporten "Sikkerheten rundt anlegg som håndterer brannfarlige, reaksjonsfarlige, trykksatte og eksplosjonsfarlige stoffer" (ref. /1/). Valg av sensitiviteter bør sees i lys av behovet for nøyaktighet i analysen. I probabilistiske analyser vil variasjonene i en rekke parametere og forhold bli ivarettatt, sensitiviteter velges derfor blant de parametere og antagelser som ikke har vært gjenstand for variasjoner i analysen.

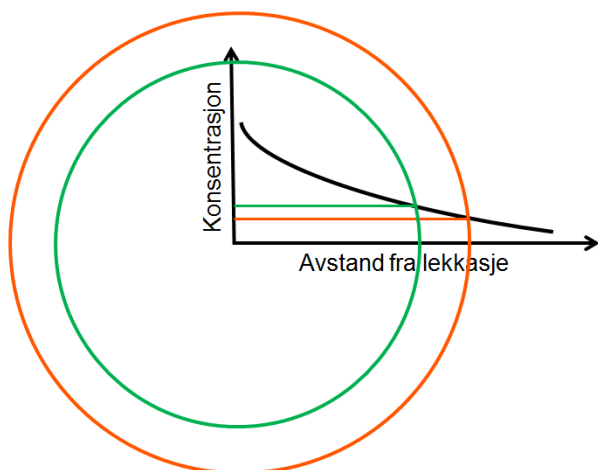
I tillegg til frekvens, fysisk modellering og utfallsrom skal spesielle vurderinger som kan forventes å gi usikkerhet i risikokonturene diskuteres. Et eksempel på dette er tenmodell, se kapittel 3.5. Dersom denne bidrar betydelig til risikokonturene, bør usikkerheten rundt denne også diskuteres i risikoanalysen. Det er i midlertid ikke hensiktsmessig å kvantifisere usikkerheter knyttet til de presenterte risikokonturene. Sensitivitetsanalyser og usikkerhetsvurderinger bør i utgangspunktet beskrives kvalitativt. Men sensitivitetsanalyser rundt alternativ anleggsutforming eller risikoreduserende tiltak ved anlegget, eksempelvis sikkerhetssystemer eller fysiske barrierer, vil være nyttig å beskrive kvantitativt dersom disse medfører endrede risikokonturer. Dette vil kunne gi et bedre informasjonsgrunnlag ved fastsettelse av hensynssoner og kan eventuelt brukes til å knytte vilkår eller rekkefølgebestemmelser til gjennomføring av tiltaket eller planen.

4 Tålegrenser

4.1 Betydningen av tålegrenser for risikokonturene

Når et tilstrekkelig antall scenarier er vurdert med valgte lekkasjefrekvenser og fysisk modellering, vil man i prinsippet ha en modell av "alle" hendelser som kan inntreffe og hvilken eksponering disse har (konsentrasjon av giftige stoffer, brennbarhet, varmelast og eksplosjonslast). Men før man kan etablere en realistisk risikokurve for dødelighet må man ha en modell som angir hvilken eksponering som skal regnes som dødelig. Valg av tålegrenser for dødelighet vil påvirke risikokonturens utstrekning. Under følger anbefalinger for valg av tålegrenser (grenseverdier).

Figur 4.1 illustrerer hvordan valg av tålegrense (for giftighet) påvirker risikokonturene for samme hendelse. Konsentrasjonen av giftig stoff vil reduseres med avstanden fra lekkasjepunktet, og om man setter en lav konsentrasjon (oransje kurve) som tålegrense eller en litt høyere konsentrasjon (grønn kurve) som tålegrense får man ulike risikokonturer for de samme simulerte scenarioene.

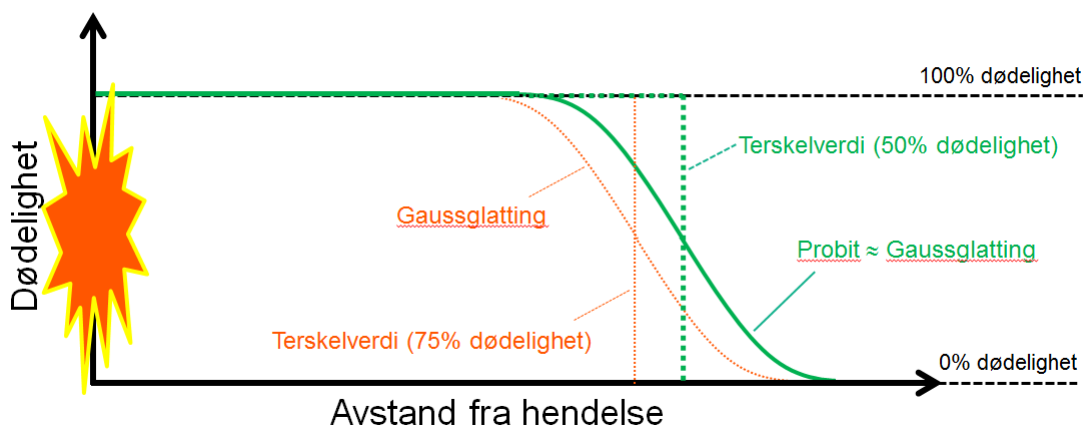


Figur 4.1 - Illustrasjon på hvordan valg av tålegrense for giftighet påvirker risikokonturene

Det finnes to typer tålegrenser, terskelverdier og probiter. Terskelverdier er binære på den måten at de sier at for verdier under terskelverdien er det ingen dødelighet, mens det for verdier over terskelverdien antas 100% dødelighet. For probiter antar man en gradvis overgang hvor dødelighet for konsentrasjoner eller doser under en lavterskel settes til null, og deretter er det gitt en økende sannsynlighet for dødelighet ved økende doser eller konsentrasjoner. For konsentrasjoner eller doser over en høyterskel antas 100% dødelighet. En fordel ved å benytte probiter er derfor at et enkelt scenario vil få en gradvis overgang mellom 0% dødelighet og 100% dødelighet, og dette vil gi glattere risikokurver når man legger sammen frekvensene for alle simulerte og vurderte scenarioer. Dette gjør risikokonturene mindre følsomme for valg av hvilke scenarioer man simulerer. Det anbefales derfor å benytte probitfunksjoner i så stor grad som mulig når man beregner risikokonturer.

Dersom terskelverdier benyttes til å beregne konsekvenser av hvert simulerte scenario, så skal probiten for 50% dødelighet legges til grunn for å bestemme terskelverdi. Dette følger av målet om å være forventningsrett i risikokonturene, og forventningsverdien til en probit som er normalfordelt er lik den 50% persentilen (som også er lik middelveidien). Brukes en terskelverdi som er basert på en probitfunksjon med over 50% dødelighet så vil resultatene bli ikke-konservative, og tilsvarende vil terskelverdier basert på en probitfunksjon med under 50% dødelighet føre til konservative risikokonturer.

Bruker man probitfunksjonen for 50% dødelighet som terskelverdi for å estimere dødelighet for et enkelt scenario, oppnår man i tillegg at en Gaussglating av dette scenarioet vil resultere en lignende dødelighetsfordelingen som man ville fått om man brukte probitfunksjonen til å regne dødelighet. Grunnen til dette er at både probitfunksjonen og Gaussglating er normalfordelt. Dette er illustrert i Figur 4.2.



Figur 4.2 - Illustrasjon som viser at ved glatting av en dødelighetskurve som er fremkommet ved bruk av terskelverdi som tilsvarer probit for 50% dødelighet, så vil den glattede kurven få lignende form som om probit ble benyttet for å beregne dødelighet for det simulerte scenarioet (se også Figur 3.15). Benyttes en terskelverdi med en annen dødelighet enn 50% vil den glattede kurven forskyve seg i forhold til probitfunksjonen (oransje kurve)

4.2 Anbefalte tålegrenser

4.2.1 Generelt

For tålegrenser anbefales det å benytte TNO, ref. /32/, som standard. Dette for at risikokonturene skal bli sammenlignbare for ulike anlegg med tilsvarende farlige stoffer, og for at risikokonturene skal bli mest mulig sammenlignbare og uavhengige av hvem som utfører analysen.

Det anbefales å benytte probitfunksjoner i så stor grad som mulig når man beregner risikokonturer, se kapittel 4.1. Bruk av probitfunksjoner innebærer maksimal eksponeringstid for ulike sannsynligheter for død. I og med at det ikke skal tas hensyn til hvor lenge eventuelle personer måtte befinne seg i området, dvs. at de kan rømme, ref. definisjon av risikokontur i kapittel 1.5, vil eksponeringstiden i probitfunksjonen dermed bli en grense for scenariets varighet.

Dersom terskelverdier benyttes til å beregne konsekvenser av hvert simulerte scenario, så skal probiten for 50% dødelighet legges til grunn for å bestemme terskelverdi, se kapittel 4.1.

4.2.2 Giftighet

For giftighet bør TNO probitfunksjoner benyttes for stoffer der slike finnes. Oversikt over gjeldende funksjoner og deres status finnes på www.RIVM.nl. For stoffer som ikke finnes hos TNO/RIVM anbefales det å benytte terskelverdier for dose iht. AEGL-3, ref. /33/.

Inerte gasser som N_2 er ikke giftige i toksikologisk forstand men kan likevel være dødelige ved at de fortrenger O_2 . Ref. /34/ gir følgende probitfunksjon for lavt O_2 nivå basert på data i ref. /35/:

$$Pr = -65.7 + \ln(C^{5.2} \cdot t)$$

hvor C er konsentrasjonen i ppm og t tiden i minutter.

CO_2 fortrenger O_2 men er i tillegg giftig ved høyere konsentrasjoner og vil derfor kunne være dødelig selv om O_2 nivået i seg selv ikke tilsier det. På grunnlag av data i Ref /36/ gir Ref /37/ følgende probitfunksjon for CO_2 i luft:

$$Pr = -90.8 + 1.01 \ln(C^8 \cdot t)$$

hvor C er konsentrasjonen i ppm og t tiden i minutter.

4.2.3 Branner

Bekledning vil gi beskyttelse mot varmestråling avhengig av grad og type av bekledning, og TNO oppgir en probitfunksjon for antennelse av klær som vurderes å medføre død. Det vil imidlertid være stor usikkerhet forbundet med hvor stor andel av 3. part som vil være tilstrekkelig beskyttet med dekkende klær. Videre vil det komplisere risikoberegningene betraktelig om det skal regnes med probitfunksjoner eller grenseverdier for både ubeskyttet og beskyttet 3. part. I tillegg vil risikokonturene også bli avhengige av antagelsen om grad av beskyttelse, noe som ikke er formålstjenlig. Det skal derfor legges til grunn at 3. part alltid er ubeskyttet mot varmestråling fra branner.

For branner som følge av antent gassky settes grenseverdien for død til nedre eksplosjonsgrense (LEL). Denne grenseverdien gjelder for beregning av risikokonturer. I beredskapssammenheng kan det i noen tilfeller være ønskelig å benytte avstanden til ½ LEL.

For varmestråling har TNO, ref. /24/, Chapter 1, Eq 3.5, gitt følgende probitfunksjon for død ved eksponering av bar hud:

$$Pr = -12.8 + 2.56 \ln(D)$$

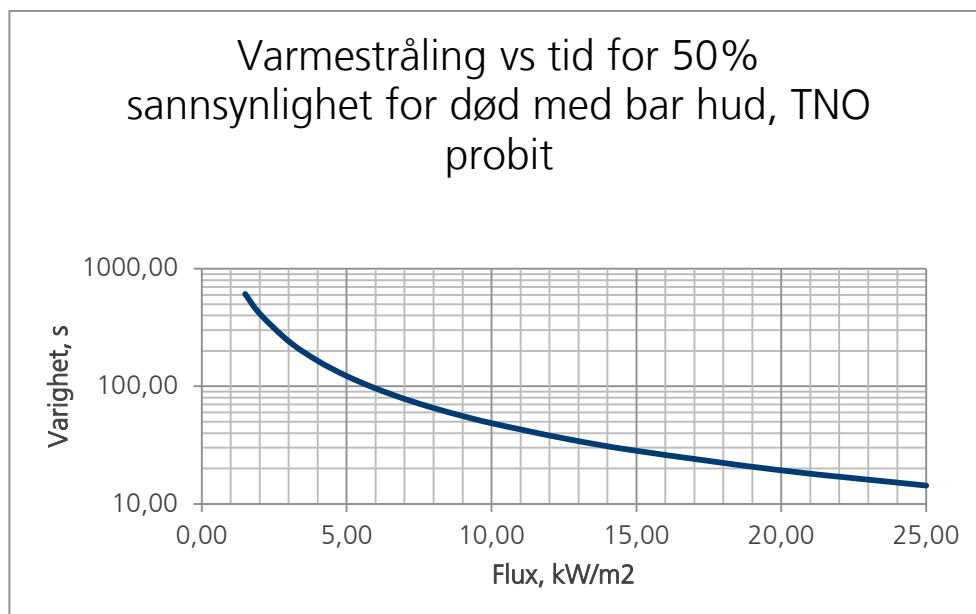
hvor den mottatte dose er

$$D = t q^{4/3}, \quad q \text{ (kW/m}^2 \text{)}$$

Sammenhengen mellom varmefluks og varighet som tilsvarer 50% dødelighet (dvs. $Pr = 5$) er vist i Figur 4.3. Det er satt en nedre grense på $1,5 \text{ kW/m}^2$ som tilsvarer terskelen for uhåndterlig smerte i TNO (ref. /32/, Chapter 1, Section 2.6).

Dersom man benytter terskelverdier til å vurdere konsekvensen av de simulerte scenarioene, skal man vurdere brannvarigheten (t) som er assosiert med de simulerte brannene og deretter finne varmelasten som tilsvarer 50% sannsynlighet for død fra probiten og benytte dette som terskelverdi. Terskelverdiene for ulike varigheter vil da være som angitt i Tabell 4.1 (tallene kan også leses av Figur 4.3).

Merk at høyeste varmefluks i Tabell 4.1 er 15 kW/m^2 med en tilsvarende eksponering på 28 sekunder. Det frarådes å benytte høyere terskelverdi enn 15 kW/m^2 eller kortere eksponeringstid enn 30 sekunder når man vurderer dødelighet av varmestråling.



Figur 4.3 - Sammenheng mellom varmefluks og tilhørende varigheter som gir 50% sannsynlighet for død ved ubeskyttet eksponering (bar hud)

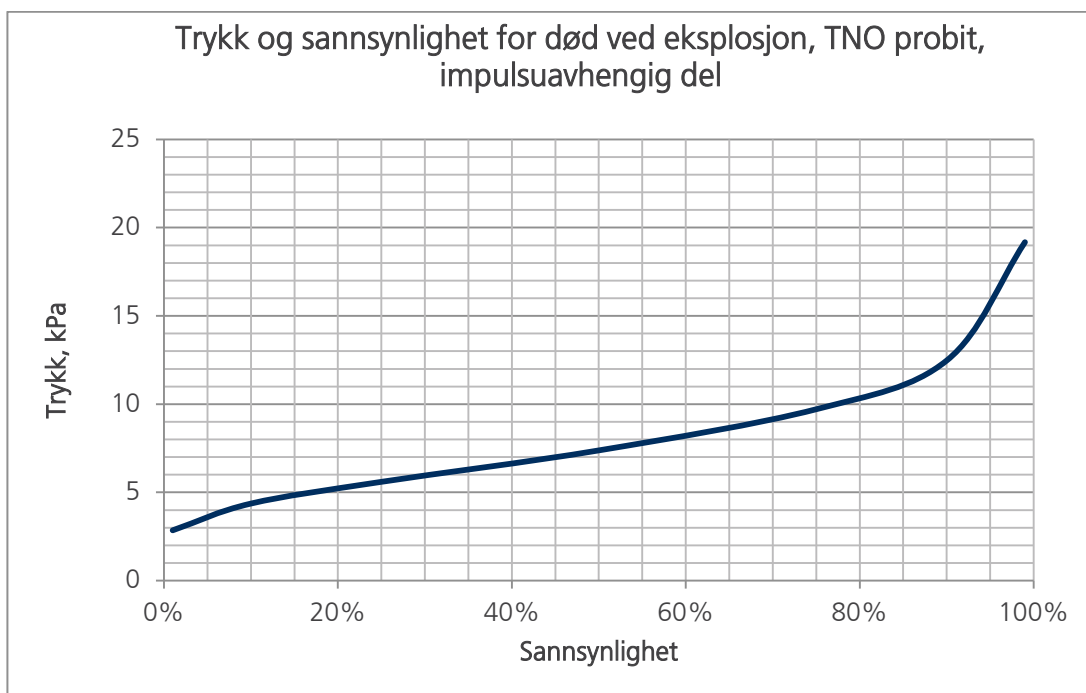
Tabell 4.1 - Terskelverdi for død som funksjon av brannvarighet (TNO probit for 50% dødelighet)

Varighet på branneksposering	Terskelverdi for død som følge av varmefluks
610 sekunder	1,5 kW/m ²
415 sekunder	2 kW/m ²
242 sekunder	3 kW/m ²
165 sekunder	4 kW/m ²
122 sekunder	5 kW/m ²
49 sekunder	10 kW/m ²
28 sekunder	15 kW/m ²

4.2.4 Eksplosjoner

Tålegrensen for eksplosjon er avhengig av mange faktorer som ikke enkelt lar seg sammenfatte; effekt av prosjektiler, kollaps av bygninger, personer som kastes mot hardt underlag etc. Disse indirekte virkningene av eksplosjon kan derfor medføre død for langt lavere trykk enn det som gir direkte død. Fordi de lokale forholdene mht. prosjektiler, kollaps av bygninger, harde flater etc. varierer sterkt er det særdeles vanskelig å etablere entydige probitfunksjoner for død som følge av eksplosjonstrykk. For direkte død som følge av overtrykk (skade på lunger) finnes det imidlertid veletablerte probitfunksjoner. TNO oppgir en nedre grense for direkte død på 1 barg, og 50% sannsynlighet for død ved 4 barg (for en voksen person). Disse tålegrensene vurderes som lite relevante for å vurdere dødelighet i områdene rundt et anlegg. I stedet skal TNOs probitfunksjoner for helkroppsskade ("Whole body impact") benyttes, ref. /32/, Chapter 3, Eq 19. Dødeligheten her antas som følge hodeskader at sjokkbølgen fra eksplosjonen kaster personen i bakken. Denne probitfunksjonen er avhengig av både trykk og impuls. Det er imidlertid ikke vanlig praksis å ta hensyn til impuls da det øker kompleksiteten av analysene vesentlig. Det anbefales derfor å benytte den impulsuavhengige delen av probitfunksjonen (grenseverdi ved stor impuls).

Dersom man benytter terskelverdier til å vurdere konsekvensen av de simulerte eksplosjonsscenarioene, skal man i henhold til prinsippet om forventningsretthet benytte en terskelverdi på 7,4 kPa (som tilsvarer 50% dødelighet). Dette kan synes som en lav verdi, men er sammenliknbar med terskelverdiene som DSB benytter for beregning av hensynssoner for eksplosiver gitt i kapittel 5.1.



Figur 4.4 - TNO probitfunksjon for helkroppsskade (whole body impact), impulsuavhengig del som grenseverdi ved stor impuls

Tabell 4.2 - Terskelverdi for dødelighet som følge av eksplosjon (basert på TNO probit for 50% dødelighet)

Varighet på trykkbølger	Terskelverdi for død som følge av eksplosjonslast
Benyttes for alle varigheter	7,4 kPa (74 millibarg)

5 Konsekvensbaserte hensynssoner

I noen tilfeller kan det være hensiktsmessig å definere hensynssoner basert på konsekvensvurderinger i stedet for å basere seg på risikokonturer. Dette kan typisk være for enkle anlegg hvor det er en unik hendelse som definerer all risikoeksponering til 3. part.

Et eksempel på dette kan være lagring av eksplosiver hvor mengden med eksplosiver er avgjørende for sikkerhetsavstander. Et annet eksempel kan være tankanlegg med lagring av diesel og fyringsoljer hvor brannens størrelse kan være gitt ut fra størrelsen og formen til oppsamlingsbassenget rundt tankene.

5.1 Hensynssoner basert på eksplosjonslaster

For lagring av eksplosiver skal det beregnes sikkerhetsavstander ut fra mengden eksplosiver som er lagret. Dette reguleres gjennom DSBs regelverk for QD (quantity – distance) og er ikke videre drøftet i denne rapporten (Forskrift 26. juni 2002 nr. 922 om håndtering av eksplosjonsfarlig stoff). Konsekvensbaserte hensynssoner basert på eksplosjoner kan estimeres fra terskelverdiene gitt i Tabell 5.1.

Tabell 5.1 - Konsekvensbaserte hensynssoner estimert fra trykklaster

Hensynssone	Terskelverdi
Indre sone	---
Midtre sone	5 kPa
Ytre sone	2 kPa

5.2 Hensynssoner basert på brannlaster

For anlegg hvor kun et, eller svært få, brannscenarier definerer risikobildet for 3. part kan hensynssoner estimeres ved å følge samme prinsippene som er fremlagt i temarapporten (ref. /1/). Det betyr at hensynssonene kan defineres på bakgrunn av dødeligheten for det definerte scenarioet. Tabell 5.2 viser anbefalte strålingsnivåer som kan benyttes til å estimere hensynssoner.

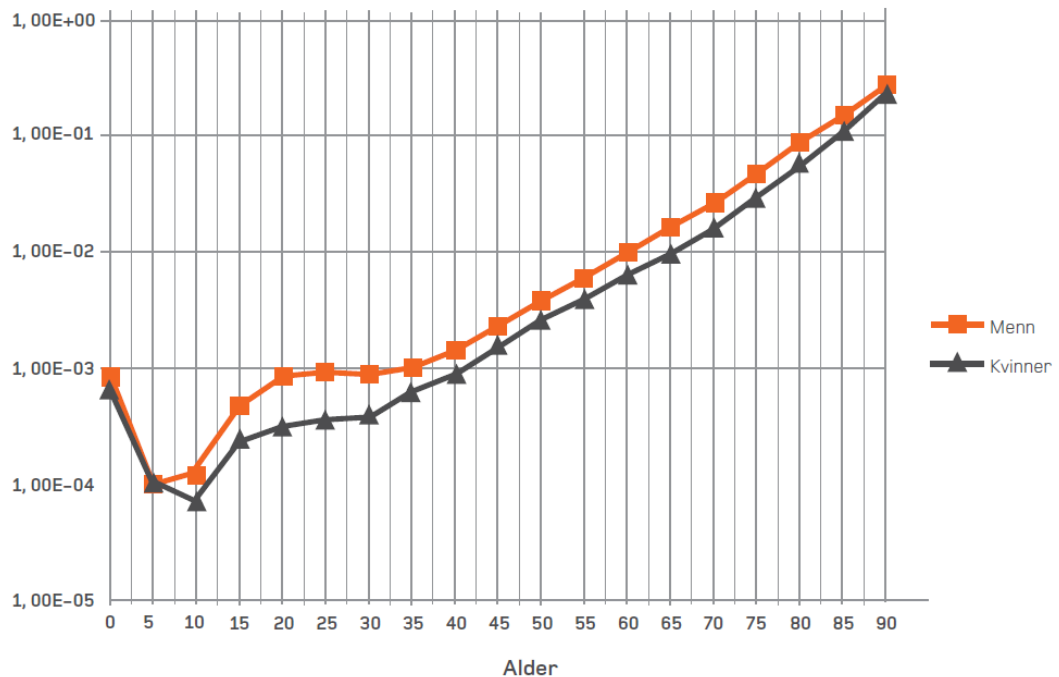
Tabell 5.2 - Konsekvensbaserte hensynssoner estimert ved strålingsintensiteter

Hensynssone	Terskelverdi
Indre sone	8 kW/m ²
Midtre sone	5 kW/m ²
Ytre sone	1,5 kW/m ²

6 Presentasjon av resultatene

6.1 Kommunikasjon av små frekvenser

Det anbefales at man i alle risikoanalyser forsøker å gi leseren et perspektiv på hvordan risikotallene skal forstås og hvordan man kan vurdere anleggets beregnede risikoeksponering mot annen risikoeksponering i samfunnet. En måte å gjøre dette på, er å knytte dødelighetsfrekvensen i områdene rundt en risikovirksomhet mot den generelle dødeligheten i samfunnet, se Figur 6.1. Denne figuren viser at for den minst dødsutsatte aldersgruppen i Norge (5-åringer til 10-åringer) er den gjennomsnittlige dødeligheten 1,0E-4 pr. år, som betyr at i gjennomsnitt vil omtrent en pr. 10.000 dø i denne gruppen hvert år. Om man sammenligner dette med frekvenskravet i ytre hensynssone (hvor eksponeringssannsynlighet for dødelige laster er mindre enn 1,0E-6 pr. år), betyr dette at anlegget representerer en tilleggsdødelighet på under en prosent for 3. part. For områder utenfor hensynssonene (frekvenskrav under 1,0E-7 i dødelighet) vil anlegget altså representere en tilleggsdødelighet på under en promille.



Figur 6.1 - Aldersavhengig dødssannsynlighet i Norge, 5-årsgrupper (2006-2010). Figuren er hentet fra Temarapporten (ref. /1/), mens tallene er fra Statistisk sentralbyrå

6.2 Resultater og mellomresultater

Alle resultater og mellomresultater som kan bidra til arbeidet med arealplanleggingen skal presenteres. I tillegg skal resultater og mellomresultater som øker sporbarheten og muligheten til å etterprøve og kvalitetssikre resultatene også presenteres.

Som et minimum, skal følgende resultater og mellomresultater presenteres:

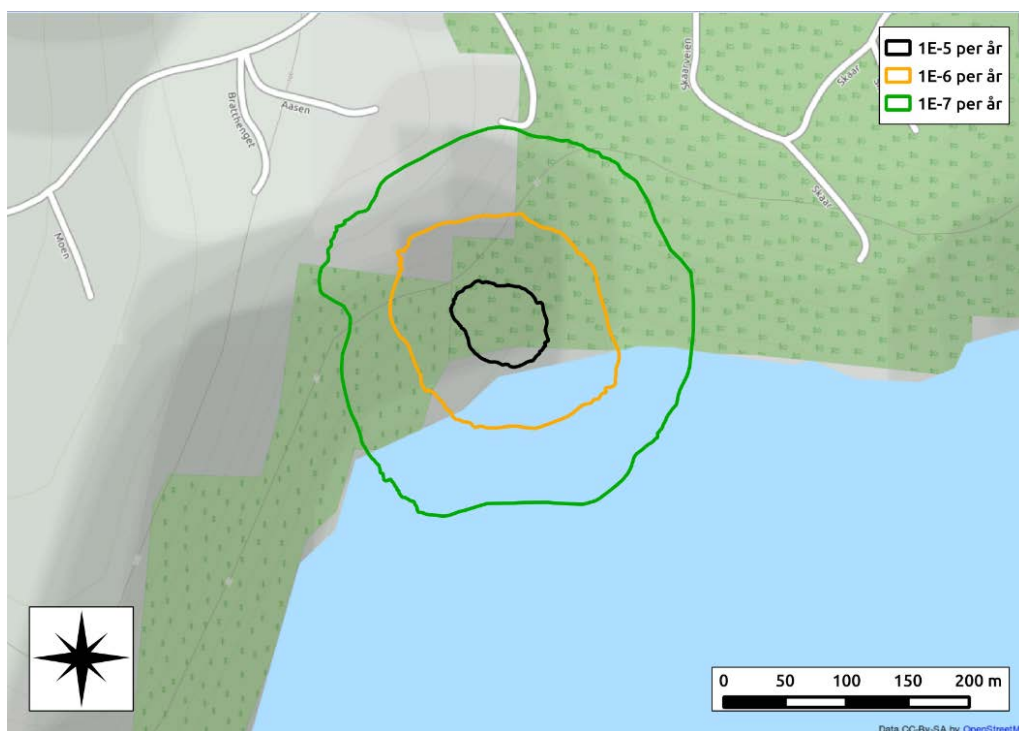
- Frekvensfordeling av topphendelsene. Skal presenteres både som frekvens som funksjon av lekkasjestørrelse og som frekvens som funksjon av område (trenger ikke isokurver, men som minimum en tabell som viser i hvilke områder lekkasjepunktene ligger)
- Tennsannsynligheter, både som funksjon av lekkasjestørrelse og område
- Risikokonturer for total dødelighet
- Eksempler på alle store hendelser som vurderes som relevante i forhold til ytre beredskaps hensyn, se kapittel 7

I tillegg vurderes følgende mellomresultater som nyttige for å kommunisere risikobidragstyper og beredskaps hensyn (i beredskapsplanleggingen kan det for eksempel være av interesse å vite hvor store områder som er eksponert for dødelighet av giftighet, varmelast og eksplosjonslast hver for seg og ikke bare hvor stor den totale eksponeringen for dødelighet er):

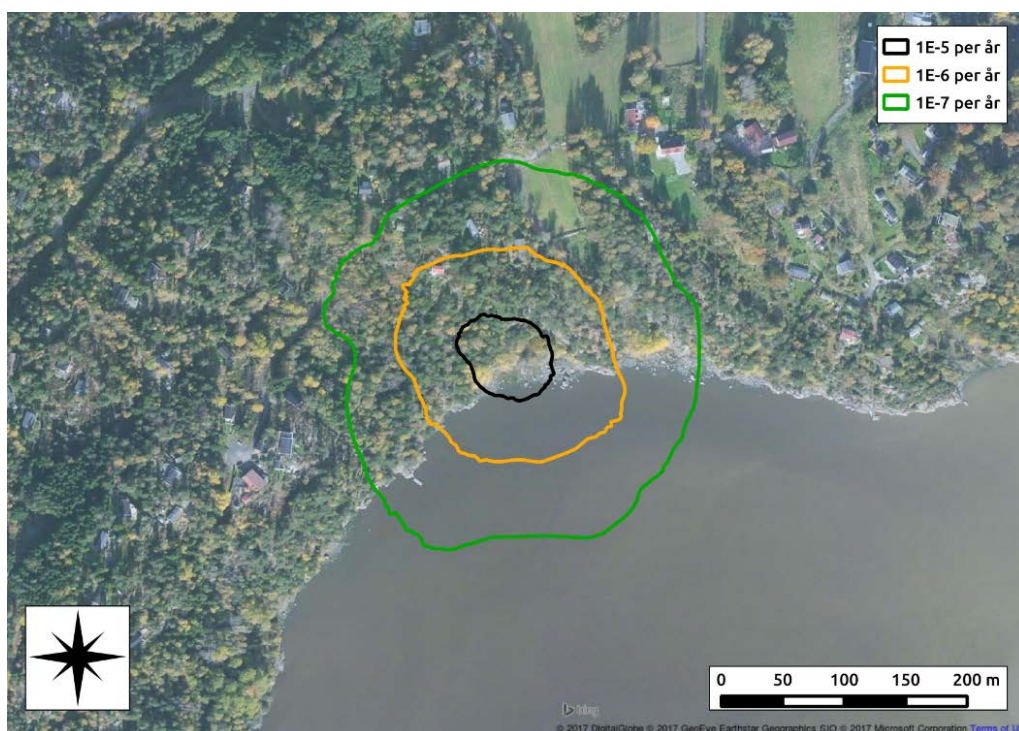
- Risikokonturer for eksponering av brennbar eller giftig stoff
- Risikokonturer for brannlast
- Risikokonturer for eksplosjonslast

For økt lesbarhet bør risikokonturene plottes på et kart eller foto. Figur 6.2 viser et eksempel på risikokonturer plottet på et kart, mens Figur 6.3 viser samme risikokonturene som er plottet på et flyfoto. Figur 6.4 viser samme risikokonturer på et 3D kart. Felles for alle figurene er at risikokonturene blir plottet inn i samme koordinatsystem som kartene slik at usikkerhet rundt manuell optegning av beregnede konturer på kart elimineres.

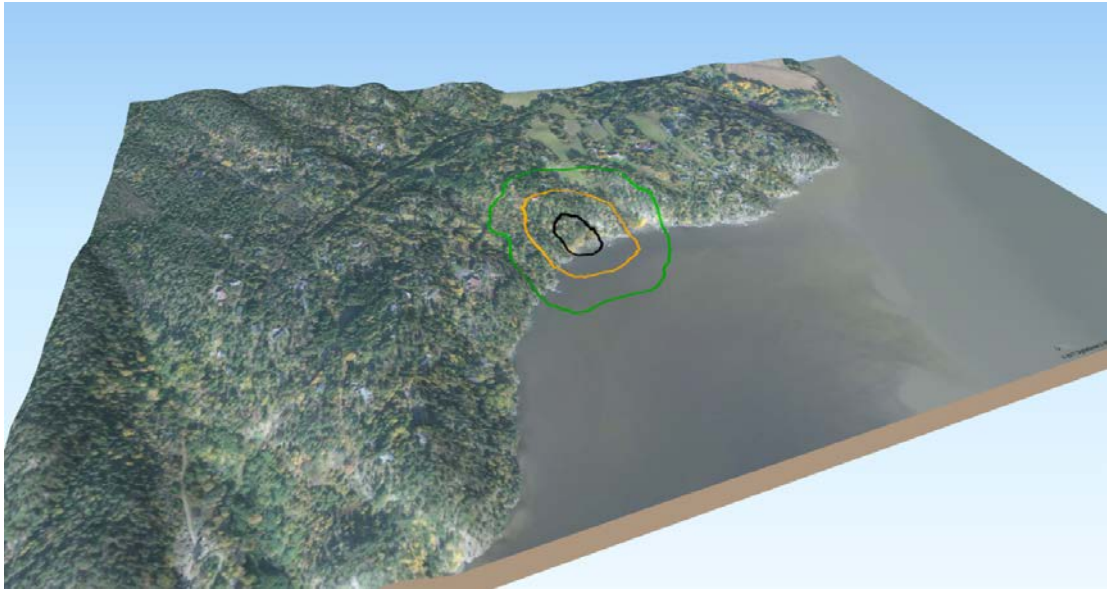
For planer om etablering av nye anlegg bør risikokonturene vises som plot i en kopi av gjeldende reguleringsplan (eller kommuneplankartet dersom området ikke er regulert). Dette gjelder også for berørte reguleringsplaner ved utvidelser eller andre vesentlige endringer i eksisterende anlegg.



Figur 6.2 - Illustrasjon av risikokonturer som er projisert på kart (plasseringen er tilfeldig valgt)

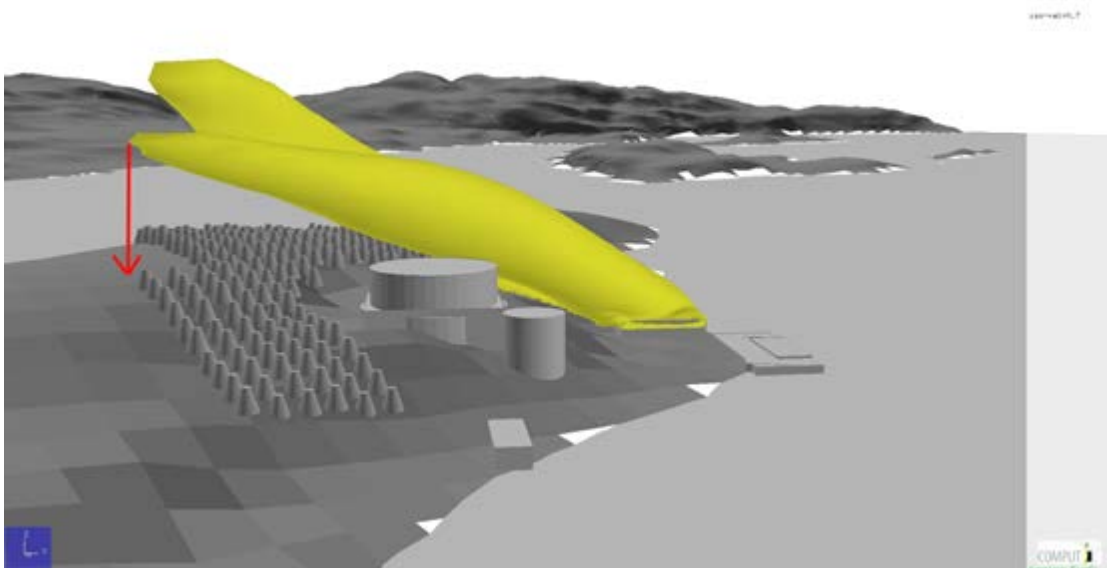


Figur 6.3 - Illustrasjon av risikokonturer som er projisert på bilde (plasseringen er tilfeldig valgt)



Figur 6.4 - Illustrasjon av risikokonturer som er projisert på 3D kart (plasseringen er tilfeldig valgt)

Risikokonturer kan presenteres som; projisert maksimum eller konturer som varierer med høyden over bakken. Den projiserte konturen fremkommer ved å ta den verste verdien i alle høyder (z-verdier) for hver posisjon i (x,y) planet. I en projisert fremstilling vil man ikke få med informasjonen om at risikoeksponeringen er forskjellig for ulike høyder over bakken, men fordelene med dette er at alle høyder konservativt kan presenteres i et enkelt plott. Alternativet til en projisert fremstilling er å plote risikokonturer for ulike høyder. Fra Figur 6.5 kan man som et eksempel se at eksponeringen av brennbar gass er forskjellig for ulike høyder. Om man ønsker å få frem denne effekten kan man lage risikokonturer for eksponering for ulike høyder over bakken. Om dette ikke er av betydning, kan man projisere den høyeste verdien i z-retningen ned til bakkeplan.



Figur 6.5 - Eksempel som viser at eksponering av brennbar gass er forskjellig for ulike høyder

6.3 Hensynssoner og individuell risiko

Temarapporten (ref. /1/) definerer hensynssoner til bruk i arealplanleggingen, og det presiseres derfor at risikoeksponeringen i hensynssonene skal knyttes til eksponering av dødelighet knyttet til de spesifikke koordinatene, og ikke til de enkelte mennesker som eventuelt måtte oppholde seg i hensynssonene. Dette betyr at man ikke kan redusere frekvenser for dødelighet i hensynssonene basert på en vurdering av hvor stor andel av tiden personene som er i området faktisk oppholder seg der.

Eksponeringstid kan imidlertid vurderes dersom man beregner individuell risiko for en gitt gruppe mennesker. Dette diskuteres ikke videre i denne rapporten.

7 Scenarier for beredskapshensyn

Det er ingen krav om at scenarier for eksterne beredskapshensyn skal knyttes til kriteriene for akseptabel risiko, jf. temarapporten fra DSB, ref. /1/. Men, risikoanalysen gjør det mulig å velge beredskapsscenarier som samsvarer med beregnede risikokonturer. Det anbefales å gi eksempler på scenarier til bruk i beredskapssammenheng som samsvarer med risikokonturene nedenfor (alle relevante typer av ulykker bør presenteres):

- Risikokontur 1E-5 pr. år
- Risikokontur 1E-6 pr. år
- Risikokontur 1E-7 pr. år
- Verste-falls scenarier kan vises som plot for eksponerte områder ved verste mulige hendelse/konsekvens

8 Referanser

- /1/ "Sikkerheten rundt anlegg som håndterer brannfarlige, reaksjonsfarlige, trykksatte og eksplosjonsfarlige stoffer", DSB 2013, ISBN: 978-82-7768-310-2.
- /2/ "Veileder om sikkerheten rundt storulykkevirksomheter", DSB 2017, ISBN 978-82-7768-420-8.
- /3/ "Reference Manual Bevi Risk Assessment", National Institute of Public Health and the Environment (RIVM) in Netherland.
- /4/ "Failure frequencies for major failures of high pressure storage vessels at COMAH sites: A comparison of data used by HSE and the Netherlands", Clive Nussey, December 2006.
- /5/ "Searching for the source of a house leak frequency", DNV-GL O&G Safety Blog, John Spouge, 11.08.2015.
- /6/ "Failure rate and Event data for use within Land Use Planning Risk Assessments (HSE LUP Data Dossier HID C15)", 28/06/2012).
- /7/ "Hose and Coupling Failure Rates and the Role of Human Error", M. Trainor, J. Gould and M. Anderson, Health and Safety Laboratory Report HSL/2000/09.
- /8/ "Process release frequencies", OGP report 434-1, 2010.
- /9/ "Process leak for offshore installations frequency assessment", Lloyds Register Consulting, Report No 105586, 2016.

- /10/ "Vapour Cloud Development in Over-filling Incidents", FABIG Technical Note TN 12.
- /11/ "LNG Source Term Models for Hazard Analyses", Health and Safety Laboratories, 2010.
- /12/ J. L. Woodward and R. M. Pitblado: "LNG Risk Based Safety Modeling and Analysis", AIChE and John Wiley, 2010.
- /13/ Scandpower: "Comparative study on gas dispersion", Report No. 101368/R1, 24 January 2012.
- /14/ "OGP Risk Assessment Data Directory", Report No. 434-6.1, March 2010.
- /15/ UKOOA/HSE: "IP Research Report. Ignition Probability Review, Model Development and Look-Up Correlations", January 2006.
- /16/ Lloyds Register Consulting: "Modelling of ignition sources on offshore oil and gas facilities", Report No. 106364, 2016.
- /17/ "NORSOK Z-013, vedlegg F".
- /18/ Gary A. Fitzgerald, "A Comparison of Simple Vapour Cloud Explosion Prediction Methodologies", Second Annual Symposium, Mary Kay O'Connor Process Safety Centre, Texas, October 30-31, 2001.
- /19/ "Obstructed Region Explosion Model", PHAST Theory, Rev. 2, 2015.
- /20/ "GAMES final report", W.P.M. Mercx, A.C. van den Berg, D. van Leeuwen, TNO Report PML, 1998-C53.
- /21/ "NORSOK S-001".
- /22/ "Design Guidance for Hydrocarbon Fires, Fire and Blast Information Group (FABIG) Technical Note 13".
- /23/ "Handbook of Fire Protection Engineering", SFPA/NFPA.
- /24/ TNO: "Methods for Calculation of Physical Effects (TNO "Yellow Book")", CPR 14E.
- /25/ TNO: "Guidelines for Quantitative Risk Assessments (TNO "Purple Book")", CPR 18E.
- /26/ Frank P. Lees: "Loss Prevention in the Process Industries", 3rd Edition, Elsevier 2005.
- /27/ D.A. Lihou and J.K Maud: "Thermal Radiation from Fireballs", I. Chem. Eng Symposium Series No. 71, The Institute of Chemical Engineers, 1982.
- /28/ Xie Mengmeng: "Thermodynamic and gas dynamic aspects of a BLEVE", Delft University of Technology, Report 04-200708, 2007.
- /29/ Johnson, D.W., and Woodward, J.L., "A model with data to predict aerosol rainout in accidental releases", Centre for Chemical Process Safety (CCPS), New York (1999).
- /30/ "Rollover in LNG storage tanks", Summary Report by The International Group of LNG Importers (GIIGNL), 2012-2015.
- /31/ A. Buang: "Boilover in liquid hydrocarbon fires", Ph.D Thesis Loughborough University, 2014.
- /32/ TNO: "Methods for the Determination of Potential Damage (TNO "Green Book")", CPR 16E.
- /33/ <https://www.epa.gov/aegl>.
- /34/ Lubos Kotek, Leisan Mukhametzinovaa, Michal Holubb, Petr Blechac: "Low Concentration of Oxygen in External Environment -Modeling the Consequences of Accident", Chem. Eng. Trans. Vol. 36, 2014.

- /35/ "Hazards of inert gases and oxygen depletion: IGC Document 44/09/E", European industrial gases association, Brussels, Belgium, 2009.
- /36/ "Comparison of risks from carbon dioxide and natural gas pipelines", HSE Research Report RR749, 2009.
- /37/ "Risk and Emergency Preparedness Analysis", Statoil Guideline GL 0282, Ver. 3, 20127.

Vedlegg A

Kartlegging av virksomheten i tidligfase og ledeord for bruk i HAZID-gjennomgang

1 Tabeller for bruk i innledende kartlegging av virksomheten

1.0	Formålet med analysen	Referanser
	Innmelding av nybygg, nyetablering	
	Innmelding av endringer ved eksisterende virksomhet.	
	Granskning av ulykke i virksomhet eller i nabovirksomhet	
	Oppdatering av eksisterende analyse og/eller sikkerhetsrapport, ref. Storulykkeforskrift § 9	
	Endringer i arealplanlegging, virksomheten selv eller nabovirksomhet, kommunen	
	Spesielle krav fra myndigheter	
	Annet	

2.0	Hva slags farligstoff håndterer virksomheten	Referanser
	Trykksatt stoff	
	Brannfarlig gass	
	Oksiderende gass	
	Giftig gass	
	Brannfarlig aerosolbeholder	
	Vanndamp eller hetvann under trykk	
	Brannfarlig stoff	
	Brannfarlig væske	
	Diesel og fyringsoljer	
	Oppvarmet flytende stoff, oppvarmet til en temperatur lik eller høyere enn flammepunktet	
	Brannfarlig fast stoff	
	Stoff som utvikler brannfarlig gass i kontakt med vann	
	Selvantennende væske	
	Selvantennende fast stoff	
	Selvopphetende stoff	
	Oksiderende fast stoff	
	Oksiderende væske	
	Selvreaktivt stoff	
	Organisk peroksid type	
	Reaksjonsfarlig stoff	
	Stoff som utvikler giftig gass	
	Annet	

3.0	Tilgjengelig dokumentasjon, graden av nøyaktighet	Referanser
	Plantegninger eller situasjonskart	
	Prosessbeskrivelse (blokkdiagram)	
	Detaljerte rør, instrument og utstyrsdiagram (P&ID), massebalanse	
	Risikoanalyser	
	Avvik, rapport fra tilsyn, beste praksis, erfaringsoverføring fra bransjen etc.	
	Annet	

4.0	Lagrede mengder farlig stoff	Referanser
	Meldepliktig iht. Forskrift om farlig stoff	
	Storulykkeforskrift § 6, § 9	
	Annet	

5.0	Håndtering av farlig stoff	Referanser
	Lasting/lossing via faste rør/slanger/lastearm	
	Lasting/lossing fra/til tankbil/tog/båt/bil	
	Oppbevaring i atmosfæriske tanker/trykk tanker	
	Tilvirking/prosessering	
	Behandling/lagring/mellomlagring	
	Intern transport	
	Blanding/omtapping/overføring	
	Utslipp til grunn, vann, luft	
	Annet	

6.0	Omgivelser - Hvor ligger virksomheten	Referanser
	Tettbebygget, by/bygd, strøk med/uten havn	
	Åpent landskap, spredt bebyggelse med/uten havn	
	Kupert landskap, spredt bebyggelse med/uten havn	
	<i>Naboer?</i>	
	Særskilte sårbare objekt: Skole, barnehage, sykehus, sykehjem, nærmiljøanlegg, idrettsanlegg	
	Hotell, overnattingssteder, forretning, restauranter	
	Ekstern beredskap, Utrykningsetater	
	Vil utilsiktede/ukontrollerte hendelser som kan inntreffe i nærliggende <i>virksomheter</i> (industriforetak etc.), utgjøre en risiko for virksomheten (dominoeffekt)? - finnes det potensielle sabotasje-/terror mål i nærheten?	
	Annet	

7.0	Infrastruktur nær virksomheten	Referanser
	Trafikkerte veier; private veier, fylkesvei, riksvei etc.	
	Buss, tog, trikk, bane ferje, fly	
	Turstier, gang- og sykkelveier	
	Kraftforsyning	
	Annet	

8.0	Naturgitte forhold nær virksomheten	Referanser
	Vegetasjon; skog, allé, tett skog, kratt	
	Finnes det terrengformasjoner som bratte stup, høye fjellvegger etc.	
	Utsatt for flom, springflo, skogbrann	
	Værdata tilgjengelig?	
	Annet	

9.0	Beredskap	Referanser
	Medfører bortfall av tilgang på følgende tjenester ulemper for virksomheten? -elektrisitet, teletjenester, vannforsyning	
	Vanntilførsel? Har området utilstrekkelig brannvannforsyning (mengde og trykk)?	
	Tilgang på eksterne brannmannskaper, uttrykings tid etc. Adkomstrute for brannbil?	
	Automatisks brannslukking ute/inne, deluge anlegg, vannkanon, skumanlegg, vanngardin etc.	
	Brannalarm, gassalarm	
	Ulovlig sabotasje og terrorhandlinger: er virksomheten i seg selv et sabotasje-/terrormål?	
	Industrivern – grunnleggende krav/ forsterket	
	Annet	

2 Ledeord for bruk i HAZID-gjennomgang

Tabell 2.1 - Eksempel på ledeord for bruk i HAZID

Kategori	Ledeord
Tap av innhold - lekkasjer/søl eller krysskontaminering. Prosessfartøy svikt. Varmevekslerrør lekkasje eller brudd. Prosesslinje svikt	<ul style="list-style-type: none"> • Farlige kjemikalier (inkludert hydrokarboner) • Andre kjemiske farer • Sprengstoff • Uventede reaksjoner • Inkompatible materialer • Termisk ukontrollert reaksjon (runaway) • Luft ingress • Korrosjon • Erosjon • Sprøhet (kjemikalier, lav temperatur) • Ekstern sammenstøt • Tretthet • Unormal vibrasjon • Mekanisk sammenstøt
Høy/lav trykk Høy/lav temperatur systemer	<ul style="list-style-type: none"> • Varm prosess/super varme • Damp • Kondensat • Kalde prosesser /kryogene • Termisk forbrenning • Sikkerhetsventiler • Fakler
Bygninger	<ul style="list-style-type: none"> • Virkningen av eksterne farer

Kategori	Ledeord
Eskalering	<ul style="list-style-type: none"> • BLEVE • Konsekvens av andre hendelser • Brann og gassdeteksjon, brannslukningsutstyr, vann gardiner etc. • Evakueringsruter
Transportering	<ul style="list-style-type: none"> • Hendelser med jernbane/jernbanevogn • Dokk/marine hendelser • Kjøretøy trafikkhendelser • Tankbiler
Mobilt Utstyr	<ul style="list-style-type: none"> • Tungt maskineri • Lette kjøretøy
Løfte utstyr	<ul style="list-style-type: none"> • Fallende/svingende last • Kollaps av løfteutstyr, kraner etc. • Sviktende rigging
Security	<ul style="list-style-type: none"> • Terrorisme • Ildspåsettelse • Sabotasje • Sivil uro • Hacking • Innbrudd
Drift	<ul style="list-style-type: none"> • Samtidige operasjoner • Skifte av personell • Innleid personell/vikarer • Start/stopp, vedlikehold og inspeksjon • Nødstop
Marine fartøy	<ul style="list-style-type: none"> • Skips sammenstøt med kai • Lasting/lossing • Utslipp
Fabrikasjon og installasjon	<ul style="list-style-type: none"> • Kompleksitet • Modulisering • Transport • Oversjøisk produksjon
Spesielle mekaniske eller elektriske ting	<ul style="list-style-type: none"> • Overdreven vibrasjon • Roterende utstyr (for eksempel kompressor svikt) • Sterke magnetiske felt • Støy • Lagret energi • Elektrisk sjokk • Høy spenning/lav spenning, elektriske farer • Statistiske elektriske farer

Kategori	Ledeord
	<ul style="list-style-type: none"> • Ioniserende stråling • EX soner/utstyr
Strukturelle feil	<ul style="list-style-type: none"> • Jordskjelv • Fundamentering (innsynkning, skure) • Korrosjon • Tretthet • Vekt kontroll • Primær struktur • Sekundære konstruksjoner • Midlertidige konstruksjoner
Hjelpesystemer svikt	<ul style="list-style-type: none"> • Kjølevann • Kjøletårn brann • Nedkjøling • Strøm • Damp • Luft • Inert gasser • Oppvarming, ventilasjon og aircondition systemet • Kommunikasjonssystem • Brannslukkingssystem • Internett • Avløpsvann fjerning / behandling • Vakuum • Tett fangdam/oppsamling
Natur og miljø	<ul style="list-style-type: none"> • Seismisk aktivitet • Vær: <ul style="list-style-type: none"> ○ Sterk vind ○ Oversvømmelse ○ Ekstrem kulde eller varme ○ Høy eller lav luftfuktighet, tåke ○ Jordskjelv/tsunami ○ Orkan/tornado ○ Lyn • Marint miljøes påvirkning på utstyr • Innsynkning /ustabilt terreng/jord og sn skred • Geologiske forhold for strukturell støtte
Organisasjon	<ul style="list-style-type: none"> • Prosedyrer • Ansvar og myndighet • Kultur og adferds forståelse • Opplæring, kompetanse • Planlegging

Kategori	Ledeord
	<ul style="list-style-type: none">• Kommunikasjon• Beredskap• Industrivern• Vaktordning