

Rapport

Retningslinjer for kvantitative risikovurderinger for anlegg som håndterer farlig stoff

Revidert utgave

Rapportinformasjon

Retningslinjer for kvantitative risikovurderinger for anlegg som håndterer farlig stoff: Revidert utgave

Rapportnummer: RMC0500914/R1	Dato: 12. august 2026	Revisjon: Rev 02
Utarbeidet av: for Adrian Madsen Lager Ingeniør	Gransket av: Joar Dalheim Sjefingeniør	Godkjent av: Benjamin Madsen Avdelingsleder

Preben Vu

Joar

B Madsen

Kundekontakt: Celin R. Tonheim T: +47 920 32 954 celin.tonheim@dsb.no	Kundeenhet- og adresse: Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) Rambergveien 9 3115 Tønsberg
Kontaktperson hos Vysus Group: Joar Dalheim Sjefingeniør T: +47 952 41 750 joar.dalheim @vysusgroup.com	Vysus Group enhet og adresse: Vysus Norway AS Drammensveien 169 0277 Oslo

Dokumentkontroll (for Vysus Group internbruk):

Revisjon	Utarbeidet av	Gransket av	Godkjent av	Dato	Kommentarer
00	JAP	JD	KDA	18. okt. 2017	Første utgivelse
01	JAP	JD	KDA	1. juli 2021	Revidering etter erfaring med bruk
02	AML	JD	BM	06. feb 2026	Revidering etter erfaring med bruk
02a	AML	JD	BM	28. juli 2026	Presisering om modellering av tankbrudd
02b	AML	JD	BM	12. aug 2026	Tekniske oppdateringer (ingen faglige endringer)

Vysus Group and variants of it are trading names of Vysus Group Holdings Limited, its subsidiaries and affiliates. Vysus Group Holdings Limited is a limited company registered in England and Wales, registered number 12912998. Registered office: Suite C, 105 Piccadilly, London, W1J 7NJ.

Vysus Group Holdings Limited, its subsidiaries and affiliates and their respective officers, employees or agents are, individually and collectively, referred to in this clause as 'Vysus Group'. Vysus Norway AS is a member of Vysus Group.

Vysus Group assumes no responsibility and shall not be liable to any person for any loss, damage or expense caused by reliance on the information or advice in this document or howsoever provided, unless that person has signed a contract with the relevant Vysus Group entity for the provision of this information or advice and in that case any responsibility or liability is exclusively on the terms and conditions set out in that contract.

This document includes personal data as defined by the General Data Protection Regulation (EU2016/679) ('Regulation'), and you (client) are obliged to process this data in accordance with the Regulation. This personal data is not to be disclosed to any other party outside the client group and not used for other purpose other than in connection with this project. No personal data is to be transferred outside the country of receipt.

Except as permitted under current legislation no part of this work may be photocopied, stored in a retrieval system, published, performed in public, adapted, broadcast, transmitted, recorded or reproduced in any form or by any means, without the prior permission of the copyright owner.

Enquiries should be addressed to Vysus Group, Kingswells Causeway, Prime Four Business Park, Kingswells, Aberdeen, AB15 8PU. © 2026 Vysus Group

Dokumentrevisjoner

Revisjon	Dato	Beskrivelse/Endringer	Endringer utført av
Rev. 00	18.10.2017	Første utgivelse etter møter, innspill og høringsrunde med industrien i Norge	Joar Dalheim / Jan Pappas / Jan Røed
Rev. 01	01.07.2021	Revidering etter erfaring med bruk	Joar Dalheim / Jan Røed
Rev. 02	06.02.2026	Revidering etter erfaring med bruk	Joar Dalheim / Celin Tonheim
Rev. 02a	28.07.2026	Satt inn nytt avsnitt i kapittel 3.4.4 med presiseringer vedr. modellering av tankbrudd	Joar Dalheim / Celin Tonheim
Rev. 02b	12.08.2026	Tekniske oppdateringer (ingen faglige endringer)	Joar Dalheim / Celin Tonheim

Oversikt over endringer fra rev. 01 til rev. 02:

Følgende kapitler har vesentlige endringer:

- Kapittel 3.4.2.3 Nytt avsnitt med modell for lekkasjer fra tankbil under transport
- Kapittel 3.4.2.6 Kort info om de nye SAFEN-modellene
- Kapittel 3.4.2.8 Lekkasje fra rørledninger (ny)
- Kapittel 3.4.4 Anbefalte data for lekkasjefrekvenser (endringer i oppsummering)
- Kapittel 3.6.4 MISOF oppdatert til å omfatte hydrogen
- Kapittel 3.6.5 Anbefaling for forsinket tenning innendørs utvidet til mindre romvolumer
- Kapittel 3.6.6 Tennsannsynlighet utenfor anleggets område (ny beskrivelse av samme modell)
- Kapittel 3.6.7 Anbefalte modeller for tennsannsynligheter (endringer i oppsummering)

I tillegg er det foretatt en del redaksjonelle endringer som ikke påvirker innholdet i retningslinjene

Innholdsfortegnelse

Dokumentrevisjoner	3
Forkortelser	6
1 Innledning	7
1.1 Forord	7
1.2 Formål	7
1.3 Overordnede prinsipper	9
1.4 Utvalg av innhold	9
1.5 Definisjoner	10
2 Planlegging	11
2.1 Kompetanse	12
2.2 Etablere kunnskap om anlegget	12
2.3 Valg av tilnærming og metode	13
2.4 Eksterne forhold	13
2.5 Design og barrierer	13
3 Risikoanalyse	13
3.1 Identifikasjon av farer, uønskede hendelser og barrierer	13
3.2 Etablere tophendelser	13
3.3 Utvikling av hendelsen / hendelsestre	14
3.4 Analyse av hyppighet for tophendelser	14
3.4.1 Generelt	14
3.4.2 Modeller for lekkasjefrekvenser	16
3.4.3 Andre lekkasjeårsaker	23
3.4.4 Oppsummering	23
3.5 Analyse av lekkasje og spredning	24
3.5.1 Modellering av lekkasjen	24
3.5.2 Fjernfelt	26
3.5.3 Største utbredelse av lekkasjer	28
3.6 Analyse av tenning	29
3.6.1 Generelt	29
3.6.2 RIVM-tennmodell	30
3.6.3 IOGP-tennmodell	30
3.6.4 MISOF-tennmodell med tillegg for hydrogen	31
3.6.5 Forenklet tennmodell for hydrogen	32
3.6.6 Tening utenfor anlegget	34

3.6.7	Oppsummering	37
3.7	Analyse av eksplosjoner	38
3.7.1	Generelt	38
3.7.2	Skystørrelsens påvirkning på eksplosjonslaster	38
3.7.3	Beregning av eksplosjonstrykk inne i brennbar sky	40
3.7.4	Beregning av eksplosjonstrykk i fjernfelt.....	40
3.8	Analyse av branner	40
3.9	BLEVE og andre hendelser.....	42
3.9.1	BLEVE.....	42
3.9.2	Roll-over og boil-over	43
3.9.3	Intern eskalering av hendelser.....	43
3.10	Etablere risikokonturer.....	43
3.11	Beskrivelse av usikkerheter	45
4	Tålegrenser	45
4.1	Betydningen av tålegrenser for risikokonturene	45
4.2	Anbefalte tålegrenser	47
4.2.1	Generelt	47
4.2.2	Giftighet.....	47
4.2.3	Branner	48
4.2.4	Eksplosjoner.....	50
4.2.5	Spesielle stoffer	50
5	Forenklet metodikk	51
6	Presentasjon av resultatene	51
6.1	Kommunikasjon av små frekvenser	51
6.2	Resultater og mellomresultater	52
6.3	Hvor høyt over bakken gjelder hensynssonene?.....	54
6.4	Hensynssoner og individuell risiko	55
7	Scenarier for beredskapshensyn.....	55
8	Referanser	56

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

Vedlegg B – Etablering av risikokurver

Forkortelser

BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion
CFD	Computational Fluid Dynamics
FFI	Forsvarets forskningsinstitutt
HAZID	Hazard Identification
HAZOP	Hazard and operability study
HSE	Health and Safety Executive
HyRAM	Hydrogen Risk Assessment Models
IOGP	The International Association of Oil & Gas Producers
LEL	Lower Explosive Limit (nedre eksplosjonsgrense)
LFL	Lower Flammable Limit (nedre brennbarhetsgrense)
LH2	Liquid hydrogen
LNG	Liquified Natural Gas
LPG	Liquified Petroleum Gas (i Norge flytende propangass)
MISOF	Modelling Ignition Sources on Offshore oil and gas Facilities
NCS	Norwegian Continental Shelf
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram
PLOFAM	Process leak for offshore installations frequency assessment model
RIVM	National Institute for Public Health and the Environment (NL: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu)
SIL	Safety Integrity Level
UFL	Upper Flammable Limit (øvre brennbarhetsgrense)
SAFEN	Safe Energy Carriers Joint Industry Project
TNO	The Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (NL: Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek)
QRA	Quantitative risk assessment (kvantitativ risikoanalyse)

1 Innledning

1.1 Forord

Denne rapporten er tredje utgave av DSBs retningslinjer for kvantitative risikovurderinger for anlegg som håndterer farlig stoff. Første og andre utgave av retningslinjene ble utgitt henholdsvis i oktober 2017 og juli 2021. Rapporten er utarbeidet av Vysus Norway AS for DSB.

De viktigste endringene i rapporten, sett opp mot 2021-utgaven, listes opp innledningsvis i dokumentet.

Arbeidet med revisjon av retningslinjene har bestått av tre faser; identifisering av endringsbehov, høring og vurdering av høringsinnspill. Med utgangspunkt i egen erfaring med bruk av retningslinjene, tilbakemeldinger fra brukerne og ny kunnskap om metoder og datakilder, satte Vysus Norway AS og DSB innledningsvis i revisjonsarbeidet opp en liste over endringsbehov i 2021-utgaven, og implementerte disse i dokumentet. Forslaget til reviderte retningslinjer lå deretter ute til høring på DSBs nettsider i perioden fra 29.04.2025 til 15.06.2025. Relevante aktører (konsulentselskaper, myndigheter, bransjeforeninger og utvalgte virksomheter som håndterer farlig stoff) mottok direktevarsel om høringen, og av disse ga åtte høringsinstanser ett eller flere innspill til dokumentet. Høringsinnspillene er så vurdert, og nødvendige endringer implementert i dokumentet.

Rapporten er tilgjengelig på www.dsb.no.

1.2 Formål

Formålet med retningslinjene er å redusere tilfeldige variasjoner som følge av datagrunnlag og metode ved utarbeidelse av kvantitative risikovurderinger for anlegg for håndtering av farlig stoff. Med farlig stoff menes i denne sammenheng brannfarlig, reaksjonsfarlig og trykksatt stoff, jf. definisjonene i forskrift om håndtering av farlig stoff¹ § 4. Det er dessuten en målsetning at retningslinjene skal bidra til at risikovurderingene blir utført på en slik måte at de blir forstått og kan verifiseres, gjenskapes og sammenlignes, uavhengig av hvilke verktøy som er benyttet og hvem som står bak beregningene.

Retningslinjene er i utgangspunktet utarbeidet med henblikk på storulykkeanlegg, men kan også benyttes ved utarbeidelse av kvantitative risikovurderinger for mindre anlegg for håndtering av brannfarlig, reaksjonsfarlig og trykksatt stoff.

Som vi er inne på over, kan det være betydelige usikkerheter knyttet til utarbeidelse av kvantitative risikovurderinger. Selv om det foreligger standarder og internasjonalt anerkjente metoder for denne typen beregninger, har vi derfor vurdert det som nødvendig å publisere detaljerte retningslinjer for hvordan risikovurderingene skal utarbeides.

Retningslinjene legger opp til beregning av lokasjonsspesifikk individuell risiko, som presenteres i form av risikokonturer. Risikokonturene kan benyttes direkte som underlag for fastsettelse av hensynssoner i arealplaner. DSB har en målsetning om at det skal etableres hensynssoner rundt alle landets ca. 200 storulykkeanlegg med farlig stoff.

Retningslinjene må ses i sammenheng med *temarapport om sikkerheten rundt anlegg som håndterer brannfarlige, reaksjonsfarlige, trykksatte og eksplosjonsfarlige stoffer* (2013), ref. /1/, og *veileder om sikkerheten rundt storulykkevirksomheter* (2019), ref. /2/, som begge er utgitt av DSB.

Temarapporten redegjør for det forvaltningsmessige grunnlaget for arealplanlegging rundt anlegg med farlig stoff og gir kriterier for akseptabel risiko for befolkningen i områdene rundt anleggene. Retningslinjene for kvantitative risikovurderinger er utarbeidet i tråd med prinsippene som fremgår av temarapporten. Merk at risikoakseptkriteriene som fremkommer av rapporten er knyttet opp mot tilstedeværelse av tredjepart, og at

¹ Forskrift 8. juni 2009 nr. 602 om håndtering av brannfarlig, reaksjonsfarlig og trykksatt stoff samt utstyr og anlegg som benyttes ved håndteringen

risikokonturer utarbeidet etter retningslinjene skal baseres på hendelsene som kan påvirke befolkningen i området rundt anlegget.

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

- når det er behov for å opprettholde forsvarlig avstand til befolkningen rundt storulykkevirksomheter
- når det etableres nye tiltak (endringer) i omgivelsene rundt storulykkevirksomheter
- når det etableres ny storulykkevirksomhet eller det gjøres endringer i eksisterende storulykkevirksomheter

Storulykkeforskriften² stiller krav om at virksomhetene, på forespørsel, skal gi kommunen informasjon om sin risiko. Det fremgår ikke pr. august 2026 eksplisitt av kravene i gjeldende regelverk at virksomhetene skal beregne risikokonturer, men både temarapporten og veilederen baserer seg på bruk av risikokonturer som grunnlag for etablering av hensynssoner rundt storulykkevirksomheter. Til informasjon trer revidert forskrift om håndtering av farlig stoff, og med det krav om at storulykkevirksomheter må beregne og presentere virksomhetens risiko i form av risikokonturer (§ 14), i kraft 01.01.2027.

Hensynssoner benyttes som et styringsverktøy i planprosesser etter plan- og bygningsloven³, blant annet for å sikre at risikoen for befolkningen i områder rundt anlegg med farlig stoff er akseptabel. Det fastsettes bestemmelser til hensynssonene, som beskriver hvilke restriksjoner som gjelder innenfor sonen, mens selve hensynssonen angir hvilke områder bestemmelsene gjelder for og hvilken type fare det er snakk om. Aktuelle typer bestemmelser kan for eksempel være vilkår for arealbruk (forbud mot eksempelvis boligbebyggelse), rekkefølgebestemmelser, krav om detaljregulering og krav om nærmere undersøkelser før gjennomføring av tiltak.

Risikostyring i omgivelsene rundt anlegg med farlig stoff ivaretas altså primært gjennom kommunens praktisering og håndheving av bestemmelser til hensynssoner i gjeldende arealplaner. Risikostyring inne på anleggene reguleres av bestemmelsene i brann- og eksplosjonsvernloven⁴ med underliggende forskrifter, herunder storulykkeforskriften og forskrift om håndtering av farlig stoff. Regelverket for håndtering av farlig stoff stiller krav om at virksomhetene innfører nødvendige tekniske og organisatoriske tiltak, eventuelt i kombinasjon med arealmessige begrensninger (for eksempel hensynssoner), slik at håndteringen av farlig stoff ikke medfører uakseptabel risiko.

Det er viktig å merke seg at det kan være nødvendig å ta hensyn til flere faktorer enn risikokonturene alene når det skal tas beslutninger om hensynssoner med tilhørende planbestemmelser. Risikokonturene utgjør imidlertid et viktig kunnskapsgrunnlag for arbeidet med arealplaner der storulykkeanlegg eller andre anlegg med farlig stoff inngår i planområdet, og kan som nevnt benyttes direkte som underlag for fastsettelse av hensynssoner. I praksis blir virksomhetenes risikovurderinger ofte benyttet som sakkyndige utredninger, som inngår som underlag for de mer generelle ROS-analysene som følger selve planarbeidet.

DSB forventer at denne siste utgaven av retningslinjene blir benyttet ved utarbeidelse av nye kvantitative risikovurderinger med risikokonturer, samt ved oppdatering (endring) av eksisterende risikovurderinger, for eksempel som følge av vesentlige endringer i virksomheten.

² Forskrift 3. juni 2016 nr. 569 om tiltak for å forebygge og begrense konsekvensene av storulykker i virksomheter der farlige kjemikalier forekommer

³ Lov 27. juni 2008 nr. 71 om planlegging og byggesaksbehandling

⁴ Lov 14. juni 2002 nr. 20 om vern mot brann, eksplosjon og ulykker med farlig stoff og om brannvesenets redningsoppgaver

1.3 Overordnede prinsipper

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

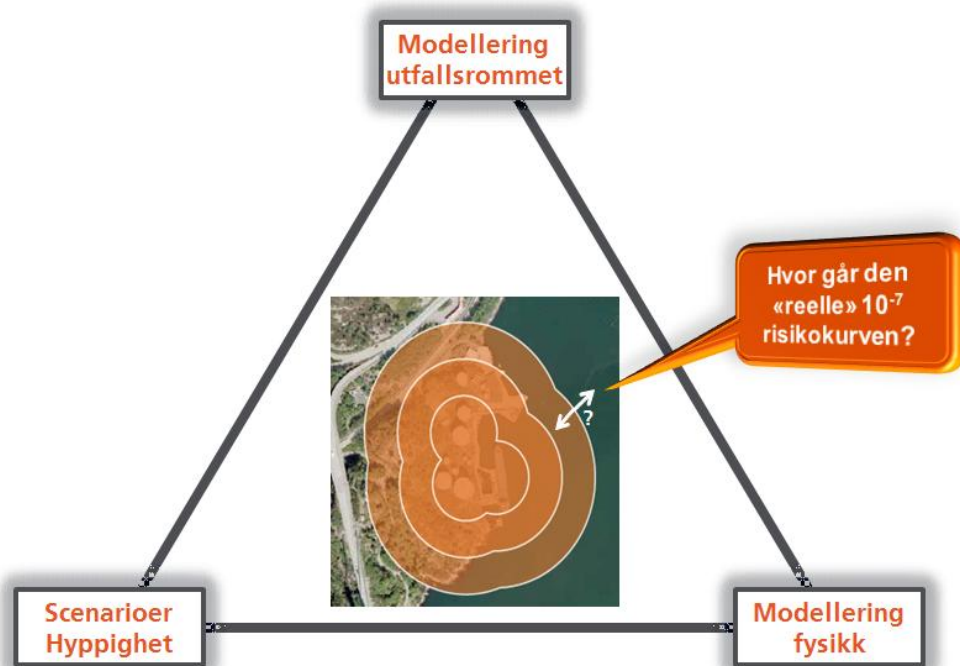
- Risiko for omgivelsene skal vurderes ut fra den samlede aktiviteten på anlegget eller virksomheten, dvs. at alle relevante anleggsdeler, aktiviteter og hendelser skal inngå i risikovurderingene. Likeledes skal kilder til ekstern påvirkning (naturhendelser, dominoeffekter fra annen virksomhet mv.) inngå 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. 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 tredjeperson vil oppføre seg eller være beskyttet ved en hendelse. Det legges derfor til grunn at tredjeperson 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 er uavhengige av usikre antakelser enn at all konservatisme skal fjernes. Den samme vurderingen gjelder for antagelser om hvordan aktivitetsnivået i omgivelsene påvirker sannsynligheten for antenne av en gassky som når ut i områder rundt et anlegg. Det er for eksempel ikke formålstjenlig at hensynssoner er avhengig av trafikk tettheten, tettheten av hus eller fritidsaktiviteter i området. Det skal derfor legges til grunn at en brennbar gassky som eksponerer arealer utenfor anleggets grenser, hvor det ikke er krav til tennkildekontroll, 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 omtalt i kapittel 3.11.

1.4 Utvalg av innhold

NS 5814:2021 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 av risikoen 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 – De viktigste driverne 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 5814:2021.

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

Retningslinjene legger opp til bruk av isokonturer for å uttrykke risiko for tredjepart i området rundt anlegg som håndterer farlig stoff, såkalte risikokonturer. Risikokonturene fremkommer ved å trekke en linje mellom punkter med samme individuelle risiko. Individuell risiko er den statistiske frekvensen for å omkomme for en tenkt person som til enhver tid befinner seg på et gitt sted utenfor anlegget. Den individuelle risikoen beregnes ved å kombinere den statistiske frekvensen for at en dødelig hendelse skal oppstå med sannsynlighet for å omkomme i aktuell posisjon utenfor anlegget. Risikokonturene påvirkes altså ikke av hvor mange personer som faktisk oppholder seg i anleggets omgivelser.

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 mv. 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 å i analysen miste oversikt over hvilke hendelser som bidrar mest til risikoen og over effekten av barrierer, herunder hvilke barrierer som er kritiske. Man mister med andre ord presisjon på 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 hendelser. 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 scenarioer, 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 scenarioer man simulerer har stor betydning for risikokonturene (se kapittel 3.10).

Brennbar gass

En brennbar gass er en brannfarlig gass med konsentrasjoner innenfor brennbart område.

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 den 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 5814:2021. 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 5814:2021

	Trinn i prosessen for risikovurdering som dekkes av NS 5814:2021, ref. figur 1 i standarden
<i>Trinn 1</i> <i>Rammer for risikovurderingen</i>	Formål, krav og avgrensing
	Verdier som skal beskyttes
	Sikkerhetsmål og evalueringskriterier
	Objekt- og systembeskrivelse
	Metode
<i>Trinn 2</i> <i>Identifisere uønskede hendelser</i>	Kartlegge farer og trusler
	Spesifisere uønskede hendelser
<i>Trinn 3</i> <i>Risikoanalyse</i>	Vurdere sårbarhet
	Vurdere sannsynlighet
	Vurdere konsekvenser
	Beskrive usikkerhet
	Beskrive risiko
<i>Trinn 4</i> <i>Risikoevaluering</i>	Vurdere oppnåelse av sikkerhetsmål
	Foreslå håndtering av risiko

2.1 Kompetanse

Den som skal utarbeide en kvantitativ risikovurdering må åpenbart ha god kunnskap om og forståelse for de farlige stoffenes egenskaper, utstyrets/anleggets funksjonalitet, prosesser som foregår i anlegget mv.

Nødvendigheten av å inneha tilstrekkelig kompetanse er forskriftsfestet i forskrift om håndtering av farlig stoff § 7. Bestemmelsen stiller krav om at enhver som blant annet prosjekterer utstyr og anlegg som benyttes ved håndtering av farlig stoff skal ha nødvendig kompetanse. Som en del av prosjekteringen, omfatter kompetansekravet også alle som utarbeider risikovurderinger for anlegg/utstyr for håndtering av farlig stoff. Kompetansen skal blant annet omfatte kunnskap om de farlige stoffene som skal håndteres og om teknisk utførelse og drift av utstyr og anlegg.

2.2 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.

2.3 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 ligger til grunn for beregning av risikokonturer skal begrunnes og dokumenteres på en oversiktlig måte. 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.

2.4 Eksterne forhold

Risikovurderingen må omfatte natur- og miljøforhold (skred, flom og lignende), samt hendelser i nærliggende virksomheter og omgivelser. Behovet for konsekvensreducerende tiltak skal være vurdert for disse forholdene. Eventuell restrisiko som i vesentlig grad kan forventes å påvirke frekvens for utslipp av farlig stoff, skal tas med i beregningen av risikokonturene.

Dersom eksterne hendelser leder til scenarioer som er vesentlig forskjellige fra de interne hendelsene, så skal det også vurderes om disse kan påvirke risikokonturene.

2.5 Design og barrierer

Anleggets design og barrierer skal i størst mulig grad tas høyde for i risikovurderingene, både for å gi mest mulig forventningsrett risikobilde og for å gi et insentiv til virksomhetene om å følge ALARP. Et eksempel er deteksjon med automatisk nedstengning og eventuell trykkavlastning som gir reduksjon i varigheten på utslippene (og mengden som slippes ut). Redusert varighet av utslippet vil redusere konsekvensene av hendelsen, inkludert sannsynligheten for tenning utenfor anleggets eget område (se kapittel 3.6.6).

Feil eller svikt i barrierer skal inkluderes dersom det kan påvirke risikokonturene.

3 Risikoanalyse

3.1 Identifikasjon av farer, uønskede hendelser og barrierer

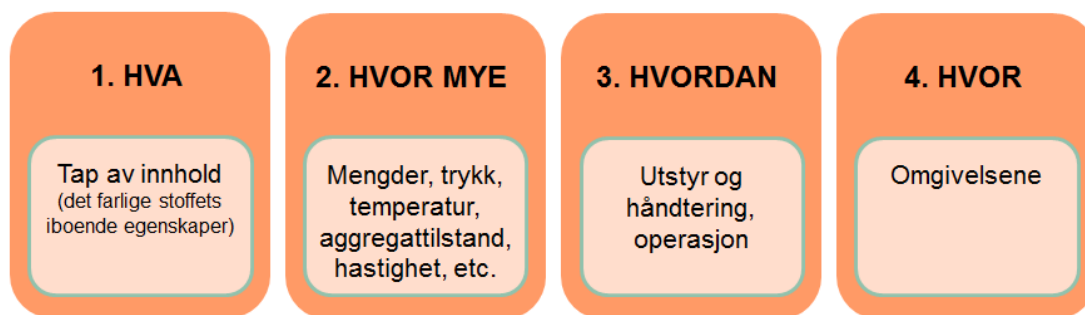
Før det kan utføres en QRA må det gjennomføres en HAZID for å identifisere hendelsene som kan inntreffe ved virksomheten. Hendelsene behandles så i hendelsetreanalyser, bow-tie analyser eller lignende. I tillegg til systemer og utstyr må også organisatoriske og operasjonelle forhold vurderes. Dårlig utført eller manglende vedlikehold, operatørfeil etc. kan for eksempel utløse eller medvirke til uønskede hendelser. 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 utløsende og medvirkende 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.

Risikoanalysen bør avklare hvordan transport av farlig stoff inn til eller ut fra anlegget er vurdert. Hendelser knyttet til transport til og fra anlegget vil vanligvis ikke inngå i beregning av risikokonturer for anlegget, men aktuelle hendelser knyttet til transport og omlasting inne på anlegget må inngå i risikoanalysen, eksempelvis hendelser knyttet til overfylling eller overtrykking av transporttanker, hendelser som kan inntreffe ved omlasting til skip mv. For risikoanalysen er det typisk omlastingsaktiviteter som bidrar, men alle farer knyttet til transport av farlig gods inne på anlegget må vurderes mht. om de kan påvirke risikokonturene.

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. Hendelser som ikke påvirker risikokonturene kan tas ut av analysen.



Figur 3-1 - Eksempel på spørsmål ved etablering av topphendelse

3.3 Utvikling av hendelsen / hendelsestre

Et hendelsestre kan benyttes for å modellere ulike hendelsesforløp etter at en hendelse (typisk en lekkasje i anlegget) har oppstått.

I en risikoanalyse benyttes hendelsestrær til å beregne relative bidrag til de forskjellige scenarioene (slutthendelsene) som kan følge av en starthendelse.

Et hendelsestre vil kunne vise hvordan hendelser (eksempelvis antenning), handlinger (f.eks. manuell aktivering) eller barrierer (eks. automatiske sikkerhetssystemer) kan påvirke forløpet.

Resultater fra HAZOP-analyser kan inngå som grunnlag for etablering av hendelsestrær.

Sannsynlighet for svikt i (eller aktivering av) sikkerhetssystemer kan fortrinnsvis angis på bakgrunn av SIL-analyser eller lignende. Responstider bør også klarlegges i tilknytning til etablering av hendelsestrær.

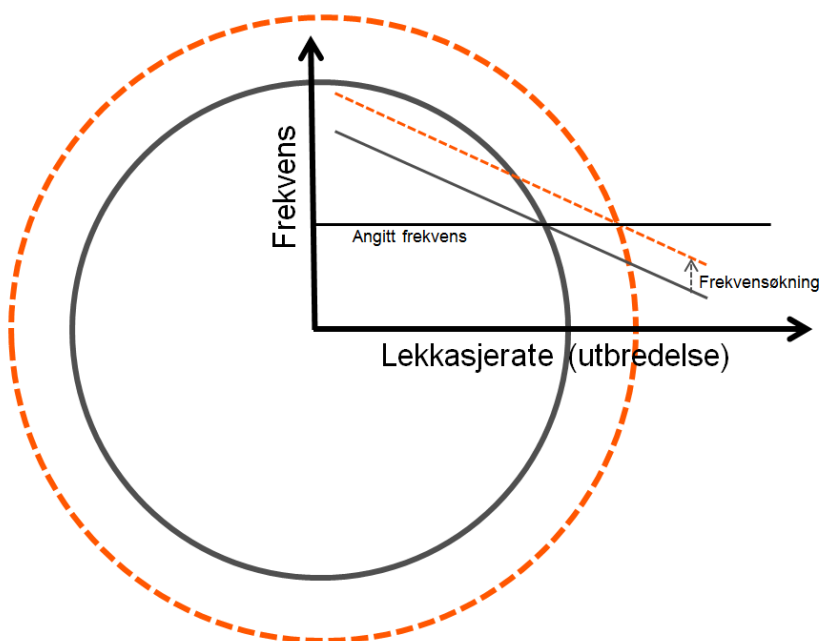
Vurdering av tennsannsynlighet er omtalt under "Analyse av tenning", se kapittel 3.6.

3.4 Analyse av hyppighet for topphendelser

3.4.1 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 begrunnes og dokumenteres. Menneskelige, operasjonelle og organisatoriske forhold kan påvirke forventningsverdi for hyppigheten av topphendelsene. De generiske lekkasjefrekvensene forutsetter at anlegget holder et industrigjennomsnitt for disse forholdene.

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. Dette må passe med oppløsningen i den påfølgende analysen, det vil si om modellen enten gir frekvens for ulike scenarioer i form av rater og varigheter eller utslippet mengde, eller om modellen gir frekvens for ulike hullstørrelser.

Bruk av de mer avanserte modellene krever mer detaljert informasjon om lekkasjekilder enn enklere modeller. Dette kan skape utfordringer ved utarbeidelse av risikokonturer tidlig i prosjektet, før endelige P&ID-er foreligger. Risikoanalytikerne må i slike tilfeller gjøre et estimat av antall komponenter, hvilket tilfører en usikkerhet i beregnede risikokonturer. Som støtte for slike estimater kan det for eksempel ses hen til liknende anlegg. 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 fluidtype, 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 risikoreduserende 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 anleggsspesifikk analysen skal være. Oppløsningsgraden i lekkasjefrekvensmodellen må balanseres mot analysemodellen som den skal benyttes i.

3.4.2 Modeller for lekkasjefrekvenser

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

- RIVM
- HSE
- IOGP
- PLOFAM
- HyRAM
- Shell (fylleslanger LNG)
- BLEVE
- Recommended failure rates for pipelines

I tillegg til disse gjøres det et omfattende arbeid i det pågående industriprosjektet SAFEN, hvor anbefalte modeller for ulike typer landanlegg, og da særlig anlegg som håndterer gasser involvert i fornybarindustrien (hydrogen, ammoniakk, CO₂), er under utvikling. SAFEN har sitt hovedfokus på å utarbeide lekkasjefrekvensmodeller som dekker lekkasjer fra prosesssystemer og lagertanker, samt lekkasjer under fylleroperasjoner, men vil også foreslå modeller for å dekke risiko knyttet til materialhåndtering og rørledninger.

Historisk sett er RIVM og HSE de mest brukte av landbasert industrivirksomhet i Europa. IOGP og PLOFAM stammer fra offshoreindustrien, men blir også benyttet for nedstrømsaktiviteter som f.eks. terminaler og petrokjemiske industrianlegg. Pr. i dag er datagrunnlaget fra offshoreanlegg 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 lekkasjefrekvenser må justeres, eksempelvis som følge av kjente korrosjons- eller andre skademekanismer. HyRAM er en etablert modell for hydrogenlekkasjer som er basert på arbeidet ved Sandia National Laboratories i USA.

For mest mulig forventningsrette risikokonturer er det viktig at rett modell benyttes for hver enkelt utstyrs- og scenariotype. Eksempelvis er det forskjellige modeller for prosessutstyr, tanker, flasker og slanger.

3.4.2.1 RIVM-modellen

RIVM (Reference Manual Bevi Risk Assessment) modellen (ref. /3/) er hovedsakelig basert på Purple Book (ref. /42/). Dette er den enkleste av de nevnte metodene, da den gir lekkasjefrekvenser samlet for utstyrsgupper 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 utstyrsguppene (uten at det nødvendigvis betyr at det er få lekkasjemuligheter i anlegget). Videre gis frekvensene for tre 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.

En sammenligningsstudie mellom RIVM og HSE (ref. /4/) viser at en viktig forutsetning RIVM setter for bruk av lekkasjefrekvensene for trykktanker 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 trykktanker, da disse i utgangspunktet er dominert av forhold som designfeil, aldring, slitasje etc., eller benytte HSE- eller PLOFAM-modellene.

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

3.4.2.2 HSE-modellen

HSE-modellen (Health and Safety Executive i UK, ref. /6/) er basert på data fra Storbritannia (UK). Modellen kan benyttes 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, mens det for ventiler, flenser og pumper kun oppgis en generisk størrelse. 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.

Sammenlignet med RIVM-modellen gir HSE-modellen en noe mer detaljert analyse ved at den gir høyere oppløsning med hensyn på utstyrskomponenter samt at effekten av prosessforhold (trykk, temperatur og fluidtetthet) tas hensyn til.

HSE-modellen har lekkasjefrekvenser for lasting/lossing med slanger og lastearmer til transporttanker basert på feiltreanalyse av operasjonen og tilhørende barriersystemer, se ref. /7/. HSE-modellen har derimot ikke lekkasjefrekvenser for lasting/lossing med slanger til skip, men inneholder frekvenser for lasting/lossing med lastearm til skip. En sammenligning av feilfrekvensene for overføring til transporttanker med slange og lastearm viser en faktor 20 økning i frekvens for fullt brudd på slange, mens lekkasjer fra mindre hull har lik frekvens. For lekkasjefrekvenser for lasting/lossing til skip med slange anbefales det å justere lekkasjefrekvensen for fullt brudd under overføring med lastearm til skip med en faktor 20 og bruke samme frekvens for mindre hull lekkasjer.

I og med at det er vesentlig større oppløsning mht. lekkasjekilder i modellen til HSE enn RIVM-modellen, vil også telling av lekkasjekilder bli vesentlig mer omfattende enn ved bruk av RIVM-modellen. Den åpenbare fordelene ved bruk av HSE-modellen er mer designspesifikke toppfrekvenser for hendelsestrærne.

3.4.2.3 IOGP-modellen

IOGP har utviklet IOGP Risk Assessment Data Directory for bruk i QRA i olje- og gassbransjen onshore og offshore. Hver veileder utvikles ved gjennomgang av tilgjengelige datakilder og innspill og kommentarer fra IOGPs medlemmer. Tre av veilederne (ref. /8/, /9/ og /10/) refereres til samlet som IOGP-modellen i denne veilederen.

Datagrunnlaget for rapportene er:

- For prosessutstyr (ref. /8/) er anbefalte frekvenser basert på erfaringsdata fra offshore UK i perioden 2006 til 2015 (data fra HSE). Dette er samme datagrunnlag fra UK som er brukt i PLOFAM.
- For tankhendelser (ref. /9/) er veilederen utgitt i 2022, og inkluderer en gjennomgang av tilgjengelige kilder inkludert data fra HSE, Nederland og Belgia. Det bemerkes at HSE sine anbefalte verdier for tanker er uendret siden 2004.
- For lekkasjer under transport av farlig gods (ref. /10/) er frekvensene basert på eldre data fra UK og Hong Kong.

IOGP-modellen for prosessutstyr og tanker (ref. /8/ og ref. /9/) er dermed også basert på et utvalg av HSE data, men er bygget opp annerledes enn HSE-modellen. De primære forskjellene er:

- IOGP modellen har data for vesentlig flere prosesskomponenter enn HSE.
- For hver prosesskomponent er lekkasjefrekvensen gitt som funksjon av både hullstørrelse og utstyrsdimensjon i form av ulike klasser.

IOGP-modellen for tankhendelser inkluderer hendelsesdata for ulike tanktyper. Tanktypene er overordnet sett de samme som behandles i HSE-dataene, men andre datakilder brukes i tillegg. For hver tanktype diskuteres ulike datakilder, og de anbefalte verdiene er basert på en diskusjon av disse kildene. Modellen skiller blant annet på følgende tanker og hendelser:

- IOGP-modellen har frekvenser for tankbrudd på double- og full-containment tanker med ytterskall i betong.
- Frekvensene for nedkjølte tanker inkluderer kun tanker som opererer på tilnærmet atmosfærisk trykk. IOGP-frekvensene for trykksatte tanker dekker alle lagertanker som operer over 0,5 barg.
- IOGP har egne frekvenser for flaskelekkasjer («small containers/cylinders») samt for ISO-containere.

IOGP sin modell for lekkasjer fra tankbil under transport, ref. /10/, dekker hendelser mens tankbilen er i transitt og dekker ikke selve laste- og losseaktiviteten. Frekvensene er basert på generell transport av farlig gods globalt, og har noen begrensninger:

- IOGP gir lekkasjefrekvenser for transport av farlig gods per km, men presiserer at ved bruk av dataene ifm. "process QRA", skal dataene kun brukes dersom transportrisiko forventes å gi et lite bidrag.
- IOGP poengterer også at dataene ikke skal brukes uten en grundig vurdering av både lokale transportforhold og gyldigheten av dataene.

IOGP har ikke data som dekker lekkasjer fra tankbil og tilhørende utstyr inne på et anlegg ifm. lasting eller lossing.

3.4.2.4 PLOFAM-modellen

PLOFAM-modellen (Process Leaks for Offshore installations Frequency Assessment Model, ref. /11/ og ref. /12/) regnes pr. i dag for å være den mest omfattende, avanserte og best validerte modell for beregning av lekkasjefrekvenser i offshore og onshore prosessanlegg som prosesserer olje og gass. PLOFAM anses som relevant å benytte også for petrokjemiske anlegg, raffinerier, større LNG-anlegg o.l. (se gyldighetsområde beskrevet i ref. /12/). Dette inkluderer hydrogenrike strømmen på slike anlegg, for eksempel ved produksjon av metanol eller ammoniakk fra metanreforming og reformeringsprosesser på raffineri.

Når det gjelder tanker, er imidlertid modellen 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 2020. Med HSE- og Havtil-krav til format på rapportering av hendelser har det vært mulig å vurdere og klassifisere hver hendelse grundig.

Ustyrskomponentene 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. Her det på sin plass å bemerke at modellen for utstyrsdimensjon er forriglet med egenskapene til utstyret som brukes på olje og gassanlegg. Koplingen til utstyrsdimensjon gjør derfor modellen mindre egnet for andre typer anlegg enn prosessanlegg for olje og gass. PLOFAM kan forventes å være mest nøyaktig for utstyr over 1".
- 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 normalt kun større lekkasjer relevante.

- PLOFAM er validert ved å anvende modellen på tellinger fra alle innretningene på NCS samt alle de store landanleggene for olje og gass i Norge (inklusive hydrogenrike strømmer på disse anleggene) og deretter sammenlikne med observerte lekkasjefrekvenser på de tilsvarende innretningene.

Selv om PLOFAM-modellen er basert på UK og NCS data fra petroleumsindustrien, viser en gjennomgang (ref. /13/) at det ikke er noen grunn til å anta at dataene er annerledes på petrokjemiske 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 olje- og gassanlegg, men også den som er mest omfattende å bruke. Arbeidet med å telle lekkasjekilder vil være på samme nivå som med HSE-modellen. Det må imidlertid bemerkes at forenklete metoder for å telle komponenter kan benyttes, og vil gjøre arbeidet mindre tidkrevende. Enkle metoder hvor bare hovedkomponenter (pumper, kompressorer, trykktanker, filtre, varmevekslere etc.) telles og kombineres med generiske modeller for antall mindre komponenter (flenser, instrumenter og ventiler) knyttet til disse er i stor grad utført for de store landanleggene i Norge.

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

For lastearmer til skip anbefales det å bruke PLOFAM land sin modell, ref. /14/. En veiledning om hvordan lastearmer skal modelleres er presentert nedenfor.

Vurderinger det er viktig å ta hensyn til:

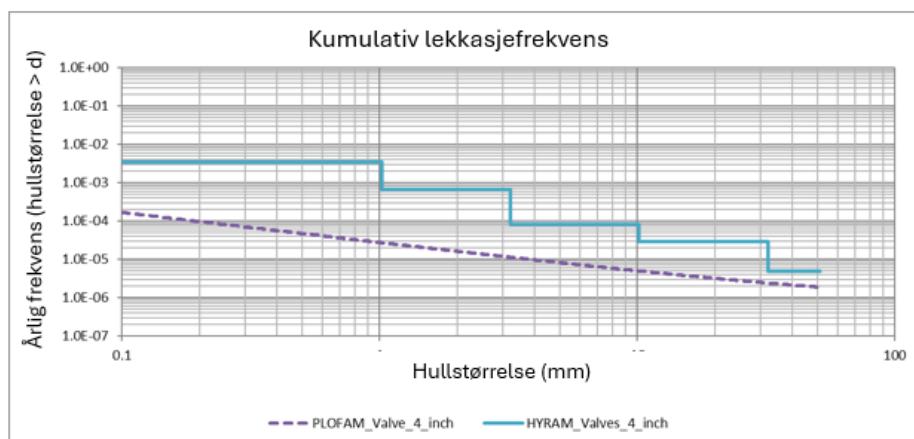
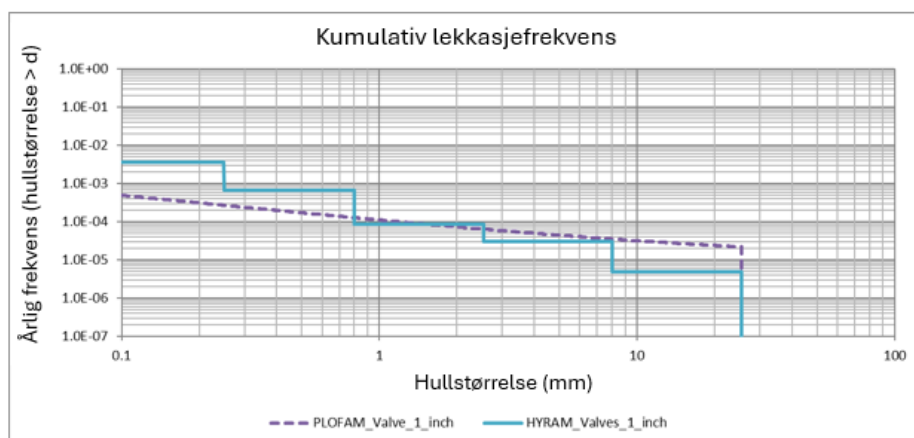
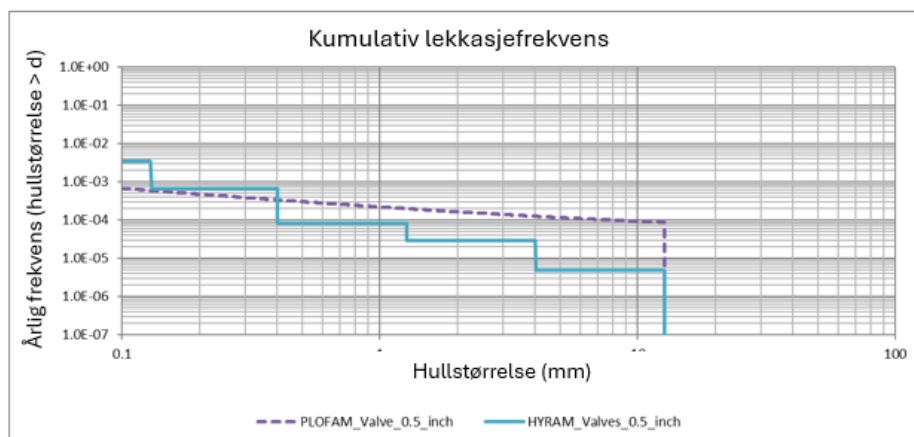
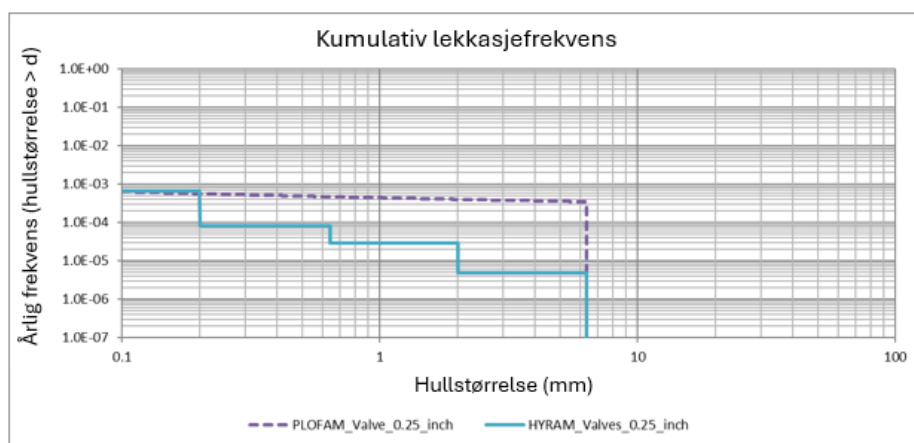
- Det antas at 2 lastearmer er i bruk per overføring. Dersom 4 lastearmer er i bruk under lasting anbefales det å bruke en sikkerhetsfaktor på 1,3 i tillegg til dobling av frekvensene.
- Svikt i fortøyning, fallende laster og passerende skip er ikke inkludert og bør vurderes separat. En sikkerhetsfaktor på 1,1 anbefales for både passerende skip og svikt i fortøyning dersom det ikke gjøres detaljerte analyser.
- Modellen gjelder ikke direkte for andre medier enn hydrokarboner. For andre medier anbefales det å bruke en sikkerhetsfaktor på 2, med unntak av hvis mediet har blitt overført i lastearmer over lenger tid.
- Anbefalte lekkasjekategorier er:
 - fullt brudd (100 % av rørdiameter)
 - medium lekkasje (10 % av rørdiameter)
 - liten lekkasje (1 % av rørdiameter)

3.4.2.5 HyRAM-modellen

HyRAM (HyRAM+) er en etablert modell for hydrogenlekkasjer basert på arbeidet ved Sandia National Laboratories i USA, ref. /15/. Sandia har estimert disse frekvensene i forbindelse med IEA ekspertgruppearbeid i årene rundt 2005-2010, med deltakelse av blant annet HSE, TNO, INERIS, DNVGL, TELTEK og GEXCON. Underliggende data er av eldre dato og er hentet fra petroleumsindustrien og fra hydrogenanlegg.

HyRAM har vært benyttet av industrien i mange år, men den vurderes som usikker på grunn av utilstrekkelig validering mot transparente og gode representative historiske data. Om man sammenligner HyRAM med PLOFAM (se Figur 3-3) ser man at de er relativt like for smått utstyr, men at forskjellen blir større når utstyret blir større. Figuren sammenligner ventiler, men samme trend kan også ses på annet utstyr. Forskjellen skyldes blant annet at HyRAM baserer verdien for lekkasjefrekvenser på relativ hullstørrelse, uten at det korrigeres for størrelsen på utstyret. HyRAM vurderes som for konservativ for utstyrsdimensjoner tilhørende rørsystemer med diameter større enn 1".

Det er altså betydelig usikkerhet knyttet til bruk av HyRAM. Det er imidlertid ingen andre åpent tilgjengelige frekvensmodeller som utpeker seg som opplagt mer validert for hydrogenlekkasjer (bortsett fra, på sikt, resultater fra det pågående arbeidet i SAFEN med å utarbeide lekkasjefrekvensmodeller), og det vurderes som en fordel at HyRAM er enkel i bruk og dermed konsistent mellom de ulike brukerne. Inntil bedre validerte modeller blir gjort tilgjengelige anbefales det at HyRAM brukes for dimensjoner 1" og mindre, og at PLOFAM brukes for større dimensjoner enn dette. Grunnen til dette er at HyRAM er etablert på et datagrunnlag fra små utstyrsdiameterer, mens PLOFAM er etablert fra større diameterer. Dette er ikke en fullgod løsning, men tar hensyn til svakhetene til begge modellene med hensyn til forrigling mot utstyrsdimensjon samt at HyRAM sannsynligvis har et relativt godt datagrunnlag for smått utstyr for rene hydrogenanlegg.



Figur 3-3 – Sammenligning lekkasjefrekvenser for ventiler fra HyRAM og PLOFAM.

3.4.2.6 SAFEN-modeller under utvikling

SAFEN er et pågående industriprosjekt som er etablert for å tette kunnskapshull i vår forståelse av drivende faresituasjoner med tilhørende sviktmekanismer og feilårsaker i fornybarsektoren. Målsetningen er å etablere en industristandard for modellering av lekkasjefrekvens samt brann- og eksplosjonsfrekvens i risikoanalyser for anlegg som håndterer hydrogen, ammoniakk, CO₂ og andre relevante gasser og væsker tilhørende energiskiftet. Den første fasen av prosjektet ble avsluttet i 2023 og leverte første versjoner av de utviklede modellene. Modellene ble presentert på FABIG teknisk møte i London i oktober 2023 (se www.fabig.com). Tennsannsynlighetsmodellen for hydrogen har senere blitt presentert på konferanse i Napoli (se avsnitt 3.6.4 og ref. /16/). Fase 2 i prosjektet ble startet på slutten av 2024.

3.4.2.7 Lekkasje fra fylleslanger for LNG og LPG

For lekkasjer fra fylleslanger generelt anbefales HSE, se kapittel 3.4.2.2.

Shell har presentert data for slangebrudd for LNG-slanger av rustfritt stål basert på erfaring fra anlegg i USA og Europa, ref. /17/. Disse frekvensene er lavere enn de generiske frekvensene for slangebrudd som HSE oppgir, men det vurderes å være rimelig å anta at slanger utviklet for LNG har noe høyere integritet enn generiske slanger, siden de vanligvis opererer i et noe strengere sikkerhetsregime. Den samme trenden kan man for øvrig også se på HSE sine frekvenser for tanker hvor LNG-tanker har lavere lekkasjefrekvenser enn generiske tanker. For lekkasjer fra LNG-slanger av rustfritt stål med gjengede endeforbindelser anbefales derfor følgende feilsannsynligheter (fra Shell):

- fullt brudd: 9,7E-8 pr. fylling
- 25 mm hull: 1,9E-7 pr. fylling

Slangebrudd for LPG-slanger er diskutert i en database utgitt av Department of Transportation's Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA), Office of Hazardous Materials Safety (OHMS), ref. /18/. Lekkasje data fra denne databasen antyder at frekvensen for lekkasje fra LPG-fylleslanger kan være tilsvarende som for LNG. På basis av at det ikke er registrert slangebrudd ved fylling av LNG på anlegg i Norge, mens det er registrert slangebrudd for fylling av LPG, kan det likevel forventes at frekvensene for LPG ligger noe over LNG, men ikke så høyt som HSE. Dersom det ikke gjøres spesielle vurderinger for det analyserte LPG-anlegget anbefales det å sette lekkasjefrekvensen for LPG-slanger midt mellom Shell (LNG) og HSE (generisk). Vurderinger rundt LPG-frekvenser skal diskuteres under usikkerheter, se også kapittel 3.11.

3.4.2.8 Lekkasje fra rørledninger

For lekkasjer fra rørledninger anbefales det å bruke frekvenser og hullstørrelsesdistribusjoner fra DNV rapport «Recommended failure rates for pipelines», ref. /19/. Frekvensene er basert på erfaringsdata fra landbaserte rørledninger i Europa, og gjelder for både gass- og væskeførende rørledninger basert på enten diameteren eller tykkelsen på røret.

3.4.2.9 Frekvens for BLEVE

Det finnes generiske frekvenser for BLEVE (for eksempel har HSE satt opp en generisk frekvens for BLEVE), men det vurderes som lite treffsikkert å benytte generiske frekvenser for hendelsestypen.

I stedet bør det gjøres vurderinger i hvert tilfelle for hvor sannsynlig det er at langvarige branner kan eksponere tanker med innhold som kan gå i BLEVE (se kapittel 3.9.1). I denne vurderingen bør det settes opp et enkelt hendelsestre som vurderer frekvenser for langvarige branner og sannsynlighet for at disse eksponerer tanker. Også IOGP anbefaler å basere frekvensene for BLEVE på hendelsestrær og sannsynlighet for eksponering av langvarige branner.

De generiske frekvensene som gis av HSE vurderes å være betydelig på den konservative siden, og bør derfor unngås i prosessen med å beregne forventningsrette risikokonturer.

Kald BLEVE kan vurderes som brudd på trykktanker, og modellene til HSE (kapittel 3.4.2.2) anbefales for dette.

3.4.2.10 Bruk av historiske data for anlegg eller selskap

For noen anlegg kan det foreligge historiske data for lekkasjefrekvenser. Det er også selskaper som har historiske data for lekkasjer fra alle sine anlegg.

Dersom man har historiske data for lekkasjefrekvenser som vurderes som relevante for det analyserte anlegget, kan disse tas med i vurderingen av forventet lekkasjefrekvens. Det må i så fall sannsynliggjøres at de historiske dataene har tilstrekkelig pålitelighet til å benyttes til formålet.

De historiske frekvensene kan vektes likt med de generiske frekvensene (diskutert i kapittel 3.4.2.1 til kapittel 3.4.2.9) dersom det foreligger godt dokumenterbare historiske data.

Det kan altså aksepteres at modellene som benyttes avviker fra de anbefalte modellene dersom det sannsynliggjøres at dette vil gjøre risikokonturene mer forventningsrette.

3.4.3 Andre lekkasjeårsaker

Utsiktede utslipp av brennbare eller giftige stoffer som kan representere en risiko for tredjepart kan forekomme uten at det skyldes en lekkasje hvis frekvens er dekket av modellene i kapittel 3.4.2. Dette kan f.eks. være runawayreaksjoner eller andre unormale prosessituasjoner som medfører overtrykking med tilhørende brudd eller utslipp fra sikkerhetsventiler. Det kan også forekomme utslipp av giftige stoffer fra atmosfæriske lufterør 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 scenarioer der dette er relevant. Slike scenarioer skal inkluderes i beregning av risikokonturene dersom de gir et vesentlig bidrag.

3.4.4 Oppsummering

En oppsummering med anbefalinger er gitt i Tabell 3.1.

Merk at for å spenne ut hele utfallsrommet av hendelser som kan inntreffe, må alle feilmoduser i benyttet datakilde modelleres. Når det gjelder tankbruddhendelser spesielt, skal dette vurderes som brudd i selve tanken og ikke i rørgjennomføringer. Hendelsestypen modelleres som et umiddelbart utslipp av hele tankinnholdet dersom ikke annet eksplisitt fremgår av veiledning til frekvensmodellen som er benyttet.

I utgangspunktet er alle lekkasjemodeller diskutert i kapittel 3.4.2.1 - 3.4.2.10 egnet til å benyttes i risikoanalyser. I tillegg kan andre modeller eller erfaringsdata benyttes som basis for risikoanalysene, men da må det sannsynliggjøres at den valgte modellen er et mer forventningsrett estimat enn de foreslåtte modellene. Dette kan for eksempel gjøres i en diskusjon om usikkerhet i analysen (se også kapittel 3.11).

Det kan være mange forhold som avgjør hvilke lekkasjemodeller som bør benyttes, og her må det i hvert enkelt tilfelle gjøres en vurdering av hvilken informasjon som er tilgjengelig og hvilken detaljeringsgrad man ønsker på resultatene. I denne oppsummeringen er det gitt en anbefaling på foretrukket modell for ulike typer scenarioer.

Merk at de enkleste modellene ofte er de mest konservative, men at det likevel ikke kan gis noen garanti for at de enkle modellene alltid er konservative for alle anlegg. Det er også slik at de mest komplekse modellene kan antas å være mest forventningsrette for de enkelte anleggene, men disse modellen krever mer analyse og blir derfor dyrere å gjennomføre. Eksempelvis, så kan anlegg med spesielt små utstyrsdiameterer lede til konservative lekkasjerater dersom en enkel lekkasjemodell benyttes. Dette fordi at modellene ikke reflekterer små diameterer, og de antatte hullstørrelsene kan bli større enn diameteren på utstyret. I slike tilfeller bør en av de komplekse modellene benyttes. Tilsvarende så kan anlegg med spesielt store utstyrsdiameterer og trykk bli underestimert ved bruk av de forenklede modellene, og en av de komplekse modellene bør benyttes.

Tabell 3.1 – Anbefalt data for lekkasjefrekvenser

Karakteristikk	Har/ønsker informasjon om	Anbefalte modeller
Prosessområder	Kun større utstyr og tilhørende mengder. Ikke viktig å detaljere avhengighet av trykk eller utstyrsstørrelse.	RIVM/TNO (ikke for trykktanker, se kapittel 3.4.2.1)
	Begrenset informasjon om enkeltkilder, men ingen hullstørrelsesavhengighet, (ventiler, flenser pumper, slanger, rør- må telles) i tillegg til større enheter. Tar hensyn til trykk i prosessen/anlegget.	HSE
	Store anlegg (raffinerier, petrokjemiske anlegg, store LNG anlegg etc.). Dette inkluderer alle typer prosessfluider på slike anlegg – dvs. inklusive hydrogenrike strømmen. Informasjon om enkeltkilder, må telles. Gir frekvenser avhengig av utstyrsdimensjon og hullstørrelser (kontinuerlige fordelinger)	PLOFAM
Tanker	Petroleumstanker (inkludert LNG og LPG)	IOGP
Tanker	Alle andre typer tanker enn petroleumstanker, med unntak av tanker med ytterskall i betong	HSE
Tanker	Tanker med ytterskall i betong	IOGP
Flasker	Propanflasker og lignende	IOGP
Tankbil	Lekkasjer fra tankbil under transport	IOGP
Slanger	Slanger i prosess	PLOFAM
	Lasting/lossing med slanger til transporttanker	HSE
	LNG-slanger	Gasnor (Shell)
	LPG-slanger	Se kapittel 3.4.2.7
Hydrogen	Alle hydrogenlekkasjer	HyRAM (må justere frekvens for filtre, se kapittel 3.4.2.5) for dimensjon $\leq 1''$. PLOFAM for dimensjon $> 1''$
BLEVE	Alle typer BLEVE	Beregnes med hendelsestre (se kapittel 3.4.2.9)
Rørledninger	Alle fluider, kan også benyttes for CO ₂	Recommended failure rates for pipelines, se kapittel 3.4.2.8

3.5 Analyse av lekkasje og spredning

3.5.1 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.

Merk at dersom valg av utslippssted (for eksempel høyde over bakken) kan påvirke risikokonturene, bør lekkasjestedene fordeles på en mest mulig realistisk måte i henhold til fordelingen av definerte utslippspunkter.

Merk også at ved tankbrudd antas lekkasjen å komme fra brudd eller hull på selve tankskallet, og ikke fra rørgjennomføringer og koblinger på tanken.

3.5.1.1 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 kokepunktet ved 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 scenarioene. 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/ulykkesdatabaser om det finnes erfaringer om hvordan en slik lekkasje arter seg. Det må så vurderes om denne erfaringen kan overføres til det aktuelle scenarioet.

3.5.1.2 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.

Fordi 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 tofase 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. Dette er den dominerende mekanismen for væske med temperatur under kokepunktstemperaturen i omgivelsene. Oppbrytning og dråpestørrelser er bestemt av huldiameter, 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 opprivning i dråper og dannelse av gasskyer, ref. /20/.
- Oppriving av væsken grunnet koking og ekspansjon av gassbobler. Dette er den dominerende mekanismen for overhete væsker (og BLEVE, se kapittel 3.9.1), 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 tofase 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 scenarioer 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 etter hvert redusere avkokingen og dermed påvirke både spredningen av væskedammen (med mindre den er begrenset av diker eller liknende) og avdampingsraten som kildestyrke for spredningen i fjernfeltet. Det vises til ref. /21/ og /22/ 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.

3.5.2 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 gjenspeiler 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 forenklede 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 det enkelte simuleringsverktøy og søke å alltid benytte den typen som er mest hensiktsmessig for det analyserte anlegget.

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. /23/). 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 karakteristikene gjelder, bør CFD-verktøy vurderes:

- **Terreng:** Anlegg som ligger i terreng som i betydelig grad vil påvirke spredning 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 3-4. For slike scenarioer kan empiriske verktøy være ikke-konservative i retningene gassen forplanter seg. I retninger gassen ikke forplanter seg, for eksempel som følge av fjellskrenter eller bratt terreng, vil derimot bruk av empiriske verktøy kunne gi for store risikokonturer.
- **Store bygninger:** Anlegg som ligger i nærheten av bygninger eller andre obstruksjoner som vesentlig påvirker spredningsbildet. I slike tilfeller kan empiriske verktøy gi feil resultater for eksempel som følge av endringer i lokale vindforhold, resirkulering, blokkeringer og retningsendringer.
- **Komplekse eller store diffusive utslipp:** Utslipp som kommer fra oppsamlingsbasseng med komplekse eller store arealer. I slike tilfeller vil en tilnærming med punktutslipp kunne gi betydelig usikkerhet i resultatene dersom empiriske verktøy benyttes.
- **Utslipp i utstyrstette områder:** Utslipp der bevegelsesenergien i betydelig grad absorberes ved at gasstrømmen (jet) treffer prosessutstyr eller bygninger. Når bevegelsesenergien absorberes av prosessutstyr, vil innblandingen av luft reduseres (jethastigheten 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 3-5. 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 scenarioer:** I helt spesielle scenarioer opererer man utenfor intervallet hvor de empiriske modellene er gyldige. Et eksempel på dette er utslipp av tung gass i lav vind (< 1 m/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.

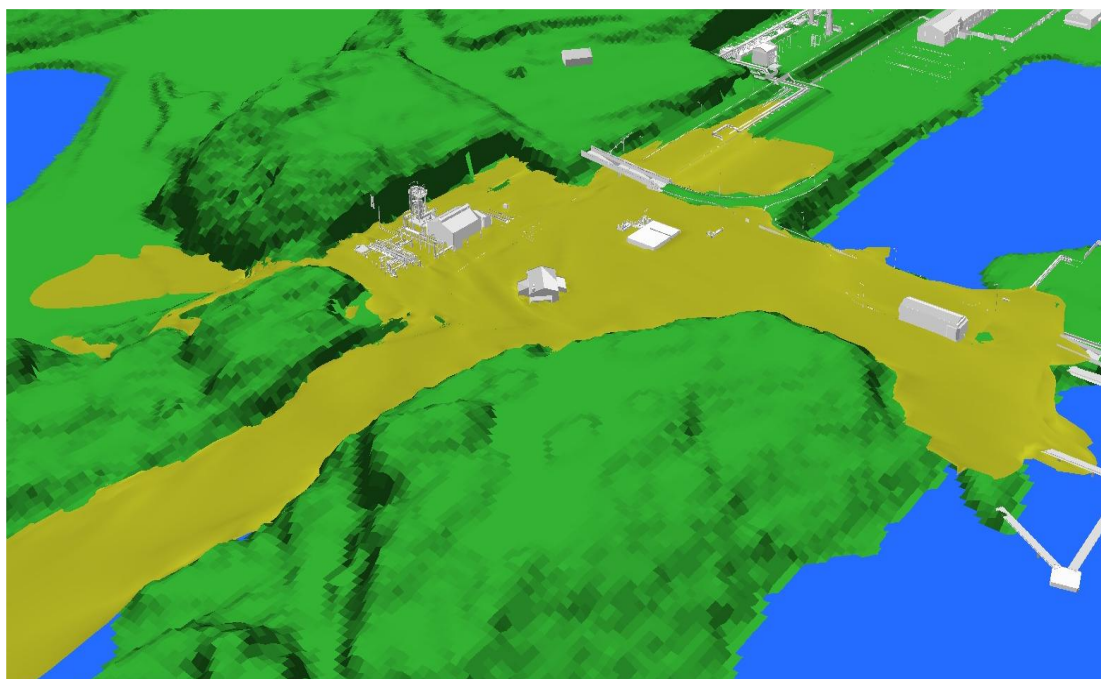
Alternativt - om empiriske verktøy benyttes - må man beskrive usikkerheter knyttet til antagelser om forhold som nevnt over, og eventuelt hvordan man har søkt å kompensere for slike forhold.

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 scenarioer 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 disse situasjonene, selv om heller ikke empiriske verktøy klarer å modellere de lokale effektene av for eksempel små obstruksjoner og varierende varmeovergangstall fra underlaget. Ved bruk av empiriske verktøy må man

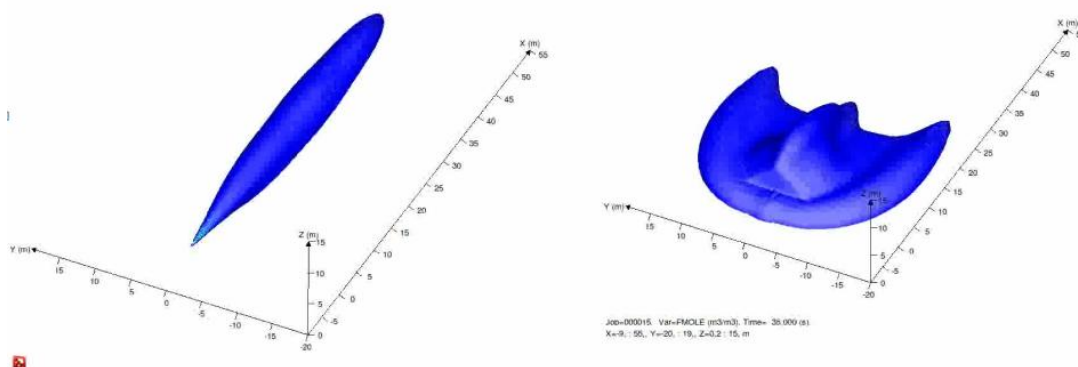
imidlertid forsikre seg om at det ikke er viktige elementer med modellering nær utslippet som utelates og at det ikke er scenarioer med lav vind som ikke lar seg modellere. Empiriske verktøy gjenskaper med god nøyaktighet eksperimentene de er kalibrerte for, men så snart forutsetningene endres fra eksperimentene øker usikkerheten betydelig også for empiriske verktøy.

For beregning av giftige konsentrasjoner i fjernfeltet er det altså usikkerhet knyttet til resultatene både for CFD og for empiriske verktøy, og denne usikkerheten må diskuteres i risikoanalysen (se også kapittel 3.11).

Valget av typen modelleringsverktøy til fjernfeltet vil kunne ha stor effekt på risikokonturene, og det må derfor dokumenteres at dette er vurdert i risikoanalysen. Empiriske verktøy og CFD-verktøy kan også kombineres i samme risikomodell.



Figur 3-4 - 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 3-5 - 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

3.5.3 Største utbredelse av lekkasjer

Turbulente fluktuasjoner og små endringer i vindfeltet vil gi fluktuasjoner i det reelle skyfeltet selv om lekkasjen er stasjonær. Disse fluktuasjonene kan modelleres med CFD, men det krever komplekse simuleringer med

lang simuleringstid. Stasjonære (steady-state) beregninger vil imidlertid representere et godt estimat på en gjennomsnittlig største utbredelse (ved noen tidspunkter vil skyen strekke seg lengre og ved andre tidspunkter kortere), og i forhold til forventningsrette risikokonturer anbefales det derfor å benytte stasjonær tilstand som grunnlag for å beregne dødelighet (50 % dødelighet skal brukes som terskelverdi, se kapittel 4.2.1).

3.6 Analyse av tenning

3.6.1 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 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 typen væsker kan tenne ved lavere temperaturer enn 60 °C. Se kapittel 3.5.1.2 for diskusjon av spraylekkasjer.

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

1. sannsynligheten for at skyen som lekkasjen genererer eksponerer tennkilder
2. sannsynligheten for antennelse, gitt eksponering av tennkilder (tennintensiteten)

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.

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, valg av modell er altså viktigere for eksplosjonsrisikoen enn for brannfrekvensen.

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

- **Tennkilder inne i anlegget:** Dette er hovedfokus for alle tennsannsynlighetsmodeller. Det finnes historisk dataunderlag, men med ulik grad av detaljering (som betyr at man vet mer om total tennsannsynlighet enn fordelingen av bidrag fra ulike tennmekanismer). 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 til 1,0.
- **Tennkilder utenfor anlegget:** For vurdering av tenning utenfor anlegget skal det gjøres ulike vurderinger for ulik bruk av risikokonturene:
 - For beregning av risikokonturer til bruk ved arealplanlegging skal total tennsannsynlighet settes lik 1,0. 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. Merk at tennsannsynlighet 1,0 ikke direkte følger prinsippet om forventningsrette analyser (se kapittel 1.5), og det gis derfor veiledning i hvordan tenning utenfor anlegget kan gjøres så forventningsrett som mulig i kapittel 3.6.6.
 - For beregning av risikokonturer som ikke skal brukes i arealplanlegging kan det benyttes en tennsannsynlighet < 1 utenfor anlegget dersom dette kan dokumenteres å være mer forventningsrett. Et eksempel kan være beregning av risikokonturer for et anlegg som befinner seg inne på et industriområde, hvor det er krav til tennkildek kontroll og hvor ingen gasskyer kan eksponere areal utenfor industriområdet.
 - Kvantifisering av tenning utenfor anlegget må tillegges betydelig usikkerhet. Det er stor variasjon av type tennkilder utenfor et anlegg, det er mangelfullt historisk underlag og samtidig er det ingen tennkildebekyttelse, noe som medfører en usikker og potensielt meget høy tennintensitet. Tenning utenfor anlegget dekkes heller ikke av tennmodellene som diskuteres i kapittel 3.6.2 – kapittel 3.6.5.

Det må derfor gjøres egne vurderinger av 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 fire ulike tennmodeller som benyttes:

- RIVM
- IOGP
- MISOF med tillegg for landanlegg og hydrogen
- HyRAM (for hydrogen)

Modellene håndterer eksponeringssannsynlighet og tennintensitet på ulike måter, og stiller ulike krav til input. Når flere modeller er aktuelle, velges modellen som passer best mht. risikoanalysens detaljeringsgrad.

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 IOGP modellen, da den er like enkel å bruke, er bedre validert, og gir et mer nyansert bilde av tennsannsynligheten.

3.6.2 RIVM-tennmodell

RIVM-modellen (ref. /3/) beskriver eksponeringssannsynligheten og tennintensiteten på en enkel måte:

- 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 tredjeparts 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, ref. kapittel 3.6.6.

3.6.3 IOGP-tennmodell

IOGP-modellen (ref. /24/) refererer til UKOOA modellen (ref. /25/) som ble utviklet av Energy Institute i UK i 2006 basert på HSE-data fra land- og offshoreanlegg 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)
- gass, olje og LNG
- ulike ventilasjonsforhold i områdene
- ulik tetthet av utstyr (i noen grad)

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.

IOGP/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 IOGP/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.

IOGP/UKOOA-modellen har blitt testet mot MISOF ved å analysere utvalgte offshoreanlegg med begge modellene. For relativt åpne områder uten spesielle tennkilder som gassturbiner, dieselmotorer og pumper/roterende utstyr gir IOGP/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 IOGP/UKOOA kan gi noe lavere tennsannsynlighet enn MISOF.

Merk at IOGP/UKOOA modellen ikke er egnet for nedkjølte kondenserte gasser, væskepøler med høy fordampning, subsoniske gassutslipp og ikke-momentdrevne utslipp, slik som utslipp som følge av fullt brudd på atmosfæriske tanker. Modellen foreslår alternative metoder for slike utslipp som kan adapteres. For væskeutslipp med høy avdampning anbefales det å kombinere korrelasjonene med tennsannsynligheter for gass/LPG, og for atmosfæriske lagringstanker anbefales det å benytte IOGPs «Storage incident frequencies». Se kapittel 3.1 i IOGP/UKOOA for videre informasjon.

Merk at IOGP også refererer til flere andre tennmodeller (MISOF, OLF, TDIIM, RIVM og CCPS) som ikke alle omtales i disse retningslinjene.

3.6.4 MISOF-tennmodell med tillegg for hydrogen

MISOF (Modelling of Ignition Sources on Offshore Oil and Gas Facilities), ref. /26/, er utviklet for olje- og gassinstallasjoner offshore. Gjennom et etterfølgende industriprosjekt (ref. /27/) er modellen kvalifisert for å også kunne brukes for olje- og gassanlegg på land. I det pågående industriprosjektet SAFEN (ref. /16/) er modellen videreutviklet for hydrogenanlegg. Den skiller seg fra de andre modellene ved at den:

- er den mest omfattende modellen
- er den eneste modellen som tar hensyn til det transiente forløpet av en gassky
- er basert på et omfattende statistisk underlag fra innretninger på norsk og britisk sokkel samt norske landanlegg for petroleumsindustrien og tilgjengelig data for hydrogenlekkasjer
- er samkjørt med PLOFAM slik at kombinasjonen av PLOFAM og MISOF reproducerer den historiske frekvensen for antente prosesslekkasjer i klassifiserte områder på offshore innretninger samt norske landanlegg innen petroleumsindustrien
- kan ta hensyn til spesifikke tennkilder som antall roterende utstyr, luftinntak til gassturbiner og dieselmotorer, varmt arbeid, kjøretøy, transformatorer, høyspentledninger, og ulik grad av Ex-beskyttelse
- diskuterer og representerer tilgjengelig kunnskap om tennmekanismene knyttet til utslipp av hydrogen
- kan ta hensyn til gassdeteksjon med påfølgende effekt av nødavstengning og utkobling av tennkilder
- gir mulighet for å vurdere usikkerhet knyttet til modellering av brann- og eksplosjonsfrekvens

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

Detaljeringsnivået i MISOF forutsetter en detaljert analyse hvor bl.a. transiente skyforløp modelleres. Fordelen er at den gir en vesentlig mer designspesifikk tennsannsynlighet enn spesielt RIVM, men også IOGP/UKOOA. Dette gir vesentlig større mulighet for å undersøke effekten av ulike tiltak for å redusere tennsannsynligheten i et anlegg. Det tidsavhengige skyforløpet kan modelleres ved bruk av ulike metoder og er ikke nødvendigvis omfattende. For små, enkle anlegg kan enkle betraktninger gi gode estimat. Videre må det påpekes at bidrag fra utstyr ikke designet for bruk i eksplosjonsfarlige områder ofte blir sentrale for landanlegg. Det forventes at analysen kartlegger og diskuterer disse.

Det må understrekes at usikkerheten knyttet til videreutviklet MISOF-modell for hydrogen i SAFEN-prosjektet er mer fremtredende enn for olje- og gassanlegg, idet historiske data for validering av nivået ikke er tilgjengelig.

Hydrogenmodellen inkluderer en vurdering av økning i parameterverdier for eksponering av bestanddeler av kjøretøy. Dette gjelder:

- Parameterverdi for luftinntak til alle typer forbrenningsmotorer inklusive gassturbiner økes fra 50 % for hydrokarboner til 90 % for hydrogen.
- Parameterverdi for eksponering av elektromotor med børster økes fra 90 % for hydrokarboner til 100 % for hydrogen.
- Generisk parameterverdi for antennelse ved omhylling av bil med brennbar atmosfære utover overnevnte bidrag økes fra 10 % for hydrokarboner til 30 % for hydrogen.

3.6.5 Forenklet tennmodell for hydrogen

Som et alternativ til MISOF-modellen kan en forenklet tennmodell for hydrogen benyttes.

Hydrogen er meget lettantennelig over et stort brennbarhetsområde og krever spesielle modeller for tenning (hydrogen er brennbart i konsentrasjoner mellom 4 % og 74 % i luft og har en størrelsesorden lavere tennenergi enn f.eks. hydrokarboner for konsentrasjoner i luft over 20 %).

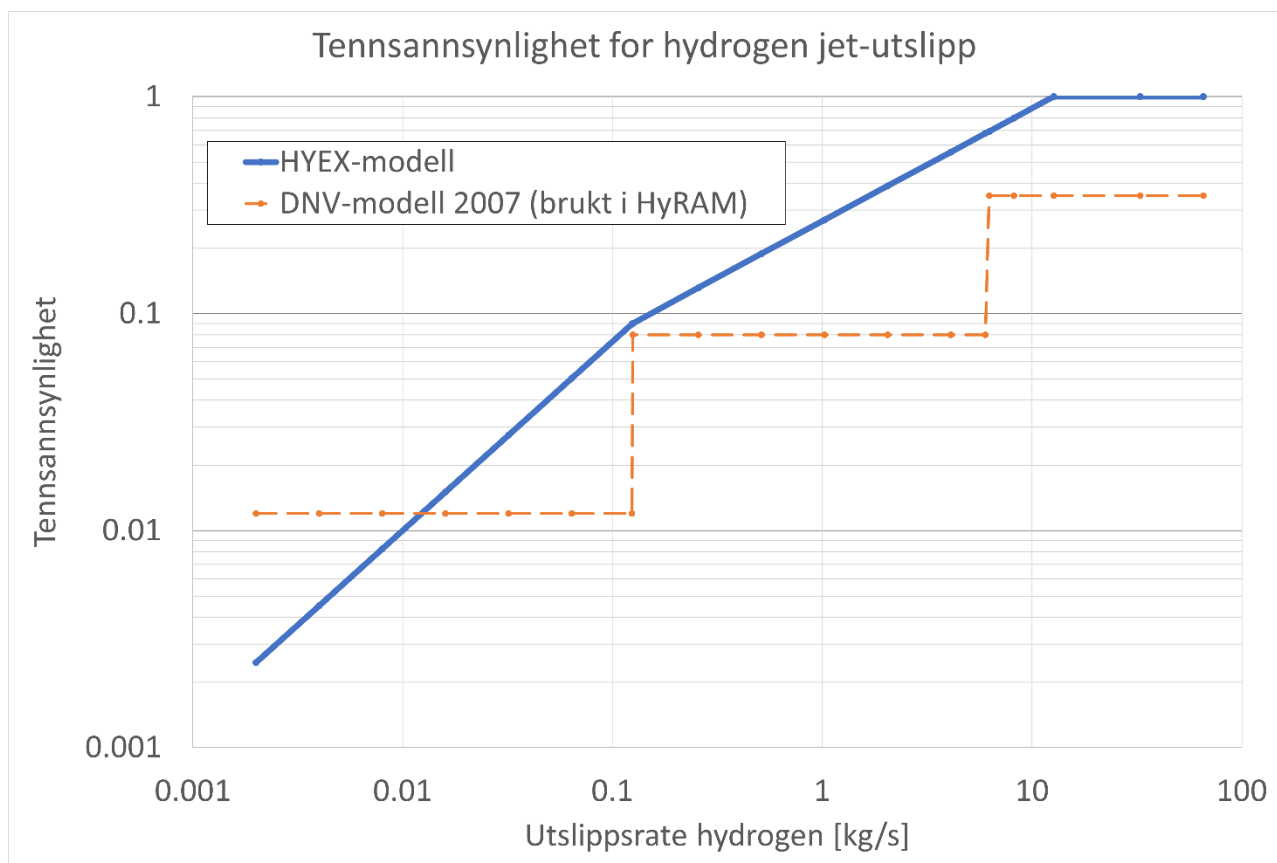
Sandia National Laboratories har publisert en modell for antenning av hydrogen der umiddelbar tenning utgjør 2/3 av total tennsannsynlighet og forsinket tenning resterende 1/3 (HyRAM-modellen, ref. /28/). Umiddelbar tenning fører til brann, mens forsinket tenning fører til eksplosjon (eventuelt med en påfølgende brann). HyRAM oppgir tennsannsynligheten i stegfunksjoner og har ingen raffinering av lekkasjer over 6,25 kg/s (alle lekkasjer over 6,25 kg/s har samme totale tennsannsynlighet på 35 %).

Litteraturen viser imidlertid at tennsannsynligheten for hydrogen kan være betydelig høyere enn det HyRAM-modellen oppgir dersom lekkasjen har høyt baktrykk (over 100 barg) og dertil høy lekkasjerate, se for eksempel ref. /29/. I ref. /30/ presenteres en ny tennmodell som er basert på en modell fra DNV for små lekkasjerater. DNV-modellen er forbedret ved at den er gjort kontinuerlig som funksjon av lekkasjerate samt at den nye modellen (HYEX) tar høyde for at store lekkasjer kan ha betydelig høyere tennsannsynlighet enn det HyRAM-modellen foreslår. Samme modell er senere presentert i /27/, som i motsetning til /30/ også er allment tilgjengelig. Den nye HYEX-modellen i ref. /27/ og /30/ er illustrert i Figur 3-6, og er uttrykt matematisk med

$$Tennsannsynlighet = \text{Minimum}(1,0; 0,55 \times \text{Lekkasjerate}^{0,87}; 0,267 \times \text{Lekkasjerate}^{0,52})$$

Merk at ved bruk av denne modellen vil alle lekkasjer over 12,5 kg/s få en total tennsannsynlighet på 1,0. Fordelingen mellom umiddelbar tenning og forsinket tenning er den samme som for DNV-modellen (2/3 umiddelbar tenning). Merk også at modellen framsatt i ref. /27/ og /30/ er beskrevet som en midlertidig modell, men i samtaler med modellens forfatter Olav Roald Hansen (HYEX) bekreftes det at det foreløpig ikke foreligger informasjon fra nyere studier som antyder at modellen bør justeres.

HYEX (den justerte HyRAM-modellen fra ref. /27/ og /30/) anbefales derfor som tennmodell for hydrogenlekkasjer.



Figur 3-6 – Anbefalt total tennsannsynlighet for hydrogenlekkasjer, ref. /27/ og /30/

HYEX-modellen er opprinnelig satt opp for frie jet-lekkasjer, men den anbefales også til bruk ved tankbrudd og ved lekkasje av flytende hydrogen.

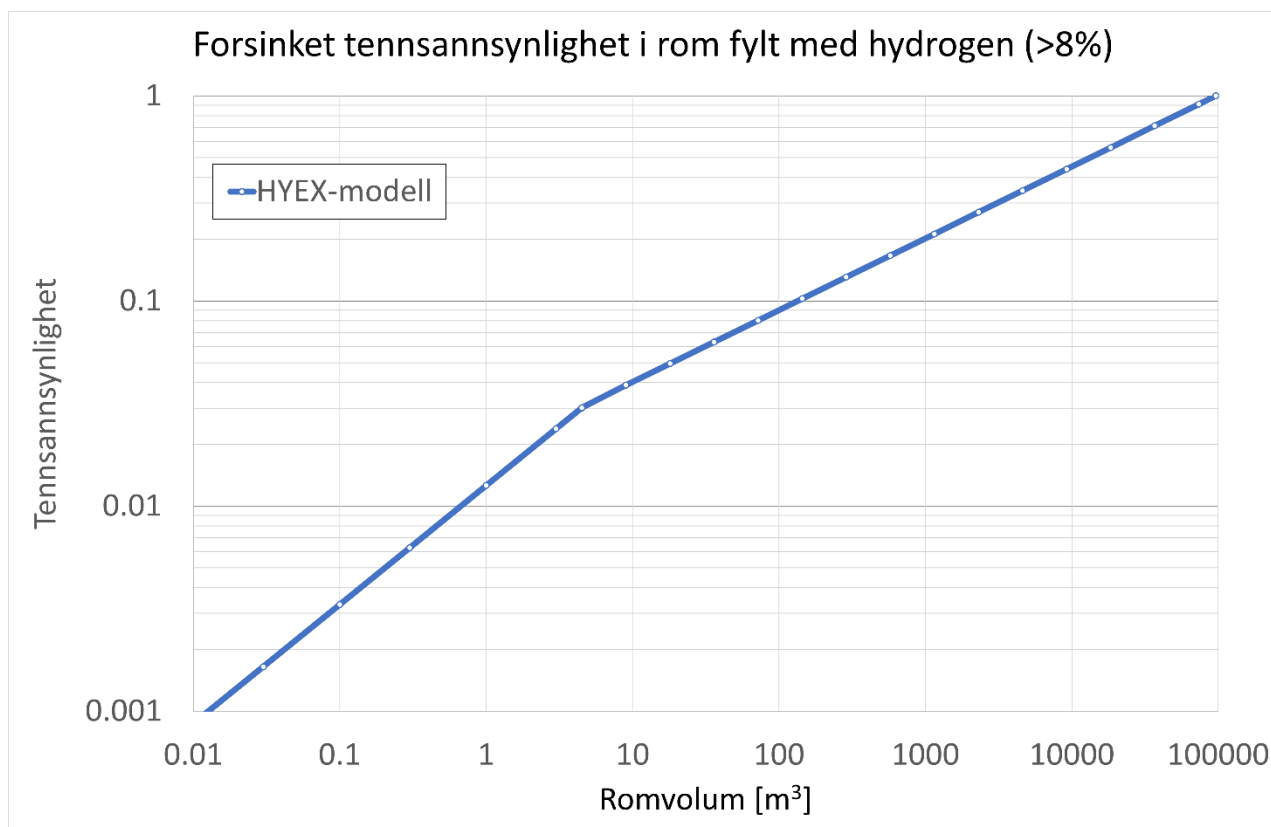
Ved tankbrudd er det usikkerhet knyttet til om forsinket tenning vil forekomme eller om nær 100 % tidlig tenning kan forventes, og dermed hvor stor andel av energien som skal benyttes til eksplosjonsberegninger. Her anbefaler HYEX å benytte 1/3 forsinket tennsannsynlighet og eksplosjon tilsvarende 20-50 % av energien som basis inntil eksperimenter tilsier noe annet. Samtidig åpnes det for at mer forventningsrette vurderinger kan gjøres, for eksempel basert på analyse av bruddmekanismer. Dette bør diskuteres som en del av usikkerheten ved analysen, se kapittel 3.11.

Ved lekkasje av flytende hydrogen (LH₂) er baktrykket og dermed bevegelsesenergien i lekkasjen lavere enn for frie jet-lekkasjer. Som følge av lavere utslippsmomentum og lavere temperatur er det ikke usannsynlig at tennsannsynligheten vil være lavere. På den annen side vil et utslipp av flytende hydrogen gi langsommere uttynning i luft, og dermed lengre fareavstander, i tillegg vil skyen vise tunggassoppførsel og holde seg langs bakken opptil flere hundre meter for store utslipp. Som et eksempel utførte DNV GL på vegne av Statens vegvesen eksperimenter med utslipp av flytende hydrogen i 2019/2020 hvor ble det målt 22-23 % hydrogenkonsentrasjon 30 m fra utslipp av 0,8 kg/s LH₂ (ref. /31/). For et høytrykksutslipp med samme rate ville konsentrasjonen kun vært i størrelsesorden 5 % på denne avstanden. Ved mer erfaring med LH₂-utslipp og antenning kan modellen vurderes justert, men i mellomtiden kan det være hensiktsmessig å benytte samme modell som for jet-lekkasjer. Tenning utenfor anlegget skal uansett settes lik 1,0 for alle lekkasjer, se kapittel 3.6.6.

For å ta høyde for at lekkasjer innendørs kan gi akkumulering av gass og dermed økt (eller redusert) gasskyvolum foreslås det for lekkasjer som kan fylle hele rommet til konsentrasjoner over 8 % å justere forsinket tennsannsynlighet på følgende måte:

$$Tennsannsynlighet_{forsinket_innelukket} = \text{Minimum}(1,0 - P(\text{tidlig}); 0,0126 \times \text{Romvolum}^{0.58}; 0,018 \times \text{Romvolum}^{0.35})$$

I denne ligningen representerer $P(\text{tidlig})$ 2/3 av total tennsannsynlighet fra Figur 3-6. Bidraget fra forsinket tenning innendørs er også presentert grafisk i Figur 3-7. Merk at bidraget fra tidlig tenning er utelatt i Figur 3-7 fordi dette bidraget er en funksjon av lekkasjerate, mens forsinket tenning er en funksjon av romvolumet. Det betyr at Figur 3-7 er en betinget sannsynlighet og må ses i sammenheng med sannsynlighet for tidlig tenning. For innendørs lekkasjer som ikke kan fylle hele rommet til konsentrasjoner over 8 % benyttes modellen for frie jet-lekkasjer, se Figur 3-6.



Figur 3-7 – Anbefalt betinget bidrag fra forsinket tenning innendørs

3.6.6 Tenning utenfor anlegget

Risikovurderinger og -konturer utarbeidet etter dette dokumentet må reflektere anleggets utforming og tilhørende sikkerhetssystemer, jf. prinsippet om at risikovurderingen skal være forventningsrett.

Risikokonturer som skal benyttes som underlag for hensynssoner, kan dessuten ikke avhenge av antakelser om anleggets omgivelser, herunder tilstedeværelsen av tennkilder. Det betyr at det må antas at en brennbar sky som eksponerer areal utenfor området virksomheten kontrollerer, vil antenne. Det kan argumenteres for at dette ikke er i tråd med prinsippet om forventningsrette risikokonturer, men det ville ikke være formålstjenlig å basere arealplanleggingen rundt anlegget på forhold virksomheten ikke har kontroll over og som forventes å kunne endre seg over tid.

Bidrag til risikokonturene fra en hendelse med antenning av en sky med brannfarlig gass eller damp, avhenger av hvor stor utbredelse skyen har når den tenner. Dersom vi alltid lar skyen antenne så fort den når områder som virksomheten ikke kontrollerer, vil risikokonturene bli mindre enn om vi tenner skyen etter at den har nådd sin største utbredelse. I det første tilfellet vil risikokonturene bli for små, mens de i det siste tilfellet blir for store (konservative). Ingen av nevnte metoder er altså forventningsrette.

Valget om å alltid la brannfarlig gass eller damp som eksponerer areal utenfor virksomhetens kontroll antenne, er på den konservative siden. For å gjøre risikokonturene mest mulig forventningsrette, gitt antakelsen om 100 % tenning, er det utarbeidet en modell for fordelingen av dødelighet i en sky av brannfarlig gass eller damp, som funksjon av avstand fra utslippspunktet.

For å kunne si noe om fordelingen av dødelighet i en dynamisk sky som endrer både størrelse og posisjon, er det nødvendig med informasjon om hvor lang tid det tar før tilførselen av brannfarlig damp/gass til skyen opphører. Dette bestemmes av hvor lang tid det tar å isolere segmentet med lekkasje (nedstengningstid) og hvor lang tid det deretter tar før alt stoff inngår i skyen. Ved kort nedstengningstid, vil varigheten av at gasskyen står ved største utbredelse (stasjonær tilstand) være kort. Tilsvarende vil skyen stå lenge ved største utbredelse når nedstengningstiden er lang.

For å bestemme dødeligheten i området rundt lekkasjen, anbefales det å benytte en matematisk modell som baseres på følgende:

- Dødeligheten i lekkasjepunktet er 1.
- Beregning av dødeligheten i et punkt x utenfor lekkasjepunktet baseres på sannsynligheten for at punkt x er inne i skyen når den antenner.
- Det antas at skyens areal er proporsjonalt med kvadratet av avstand til lekkasjepunktet, og at den radielle spredningshastigheten er konstant.
- Under ellers like forhold, vil dødeligheten i området som eksponeres av den brennbare skyen utenfor lekkasjepunktet være lavere for anlegg med kort nedstengningstid enn for anlegg med lang nedstengningstid.
- Når nedstengningstiden blir svært lang, går dødeligheten mot 1 i hele området som eksponeres av skyen.

Basert på det ovenstående, kan man sette opp følgende uttrykk for dødelighet som funksjon av avstand fra utslippspunktet:

$$Dødelighet(x) = 1,0 - \frac{1}{(1 + RV) \sum_1^N A_i} \sum_1^{n(x)} A_i$$

der

x	= avstand fra lekkasjepunktet
$n(x)$	= antall diskrete arealer innenfor punkt x
N	= antall diskrete arealer som man deler skyen opp i
A_i	= areal av brennbar sky nr. i
RV	= relativ varighet av lekkasjen: (scenarioets varighet ved største utbredelse) / (tid fra lekkasjestart til lekkasjen når største utbredelse)

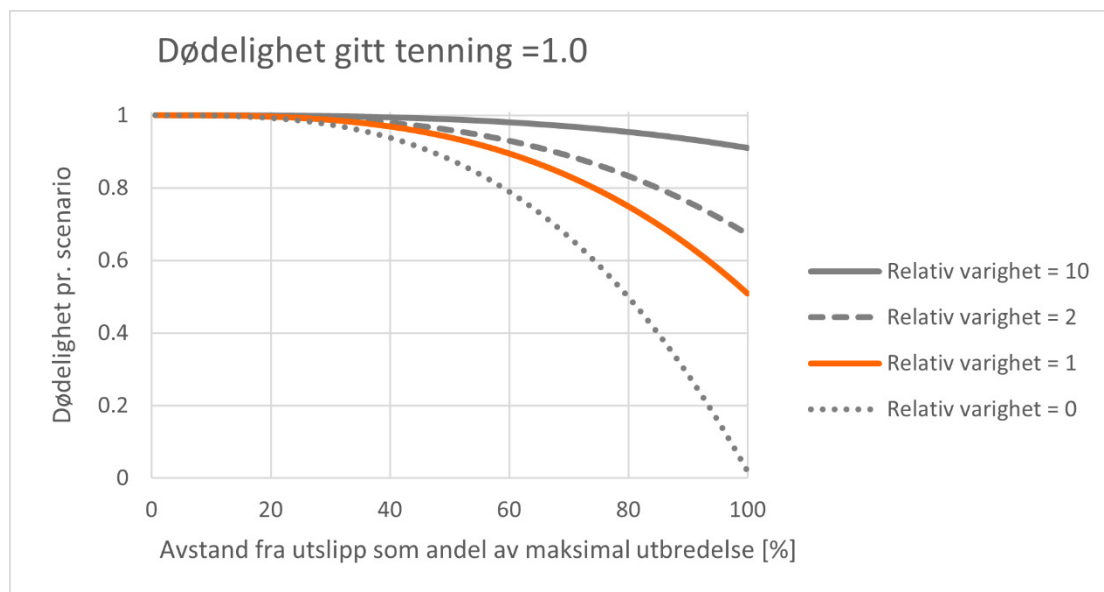
Fordelingen av dødelighet er illustrert i Figur 3-8, hvor avstanden fra lekkasjepunktet til maksimal utbredelse er delt inn i $N = 100$ segmenter. Som det fremgår av figuren, er dødeligheten 1 nærmest lekkasjepunktet, mens områdene lengst borte fra utslippet har en lavere dødelighet. Figuren viser også at jo høyere den relative varigheten er, dvs. jo lenger nedstengningstiden er, jo høyere blir dødeligheten ved største utbredelse. Når den relative varigheten blir høy, går dødeligheten mot 1 i hele området som eksponeres av skyen.

Dersom man ikke kjenner varigheten av lekkasjen, kan man forenklet anta at varigheten er lang og at konsekvensen dermed kan modelleres ved å tenne skyen på største utbredelse og sette dødelighet lik 1 i hele området. Dette ansees som en konservativ og akseptabel tilnærming.

Dersom anleggets sikkerhetssystemer sørger for at lekkasjen stoppes umiddelbart etter at maksimal utbredelse er oppnådd, må det antas at skyen vil stå ved største utbredelse omtrent like lenge som tiden det tok å nå største utbredelse, dvs. at relativ varighet = 1. Gassen vil da tynnes ut fra utslippspunktet og utover mot største utbredelse.

Merk at modellen betinger at hoveddelen av tennkildene i fjernfeltet kan antas å være diskrete (de kommer plutselig og tilfeldig). Dersom man antok at alle tennkilder var kontinuerlige ville den brennbare skyen tenne

ved første eksponering og da ville ikke relativ varighet av lekkasjen spille noen rolle. Et slikt scenario ville for øvrig bli lik kurven for relativ varighet = 0 i Figur 3-8.



Figur 3-8 – Fordeling i dødelighet som funksjon av relativ varighet på lekkasjen

Ved bruk av dødelighetsfordelingen som vist i Figur 3-8 vil den ytterste 1 % av den brennbare skyen få en dødelighet på:

- 2 % ved relativ varighet = 0
- 51 % ved relativ varighet = 1
- 67 % ved relativ varighet = 2
- 91 % ved relativ varighet = 10

Den innerste 1 % av skyen (ved lekkasjepunktet) vil for alle de ovenstående verdier av relativ varighet få dødelighet 1,0.

Tallene bak Figur 3-8 er også gjengitt for karakteristiske relative lengder i gasskyen i Tabell 3.2. Ved modellering av dødelighetsfordeling kan man enten benytte ligningen over direkte, eller man kan interpolere mellom de karakteristiske lengdene i Tabell 3.2.

Tabell 3.2 - Dødelighet ved karakteristiske relative lengder av skyen (gitt tenning)

Relativ varighet:	Relativ avstand fra lekkasjen til skyens ytterste utbredelse											
	0 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	99 %	100 %
Relativ varighet = 0	1,00	1,00	0,99	0,97	0,94	0,88	0,79	0,67	0,50	0,29	0,02	0,00
Relativ varighet = 1	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	0,94	0,89	0,83	0,75	0,64	0,51	0,50
Relativ varighet = 2	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,96	0,93	0,89	0,83	0,76	0,67	0,67
Relativ varighet = 10	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,98	0,97	0,95	0,94	0,91	0,91

Ved implementering av modellen for dødelighetsfordeling kan man benytte tilsvarende fremgangsmåte som man benytter for probiter og gi ulik dødelighet for ulike lokasjoner i ett og samme scenario (se også kapittel 4.1).

I tillegg må forholdet mellom intern og ekstern tenning vurderes. Dersom interntennning økes betydelig uten at de påfølgende scenarioene blir større, innebærer dette at økt tennsannsynlighet inne i anlegget gir mindre eksponering av dødelig last utenfor anlegget. Dette modelleres ved at aktuelle lekkasjescenarioer splittes i to hendelser; lekkasje som antennes på virksomhetens område (lekkasjefrekvens: grunnfrekvens*(intern tennsannsynlighet)) og lekkasje som tennes utenfor virksomhetens område (lekkasjefrekvens: grunnfrekvens*(1 – intern tennsannsynlighet)).

For noen brennbare stoffer med høyt flammepunkt (diesel og lignende stoffer) vil en lekkasje med lavt trykk produsere en svært liten eller ingen brennbar sky gjennom avdamping eller spraylekkasje. I slike tilfeller vil det være mulig å ha en pøl som strekker seg utenfor anleggsgrensen uten høy nok gasskonsentrasjon for å skape en brennbar atmosfære. Dersom en væskelekkasje går utenfor anleggsgrensen, men ikke kan forventes å danne en brennbar sky utenfor anleggsgrensen trenger ikke tenning utenfor anleggsgrensen å være lik 1. Tennsannsynligheten kan da settes lik tennsannsynligheten fra en tennmodell (IOGP, MISOF, RIVM, SAFEN) for gitt lekkasjerate.

For noen stoffer som både er giftige og brennbare, for eksempel ammoniakk, vil giftigheten nå lengre enn brennbarheten, og scenarioet vil være farligst dersom det ikke antenner. Slike scenarioer vil også kunne spre seg utenfor anleggsgrensene hvor retningslinjene krever at man skal sette tenning lik 1,0, hvilket vil medføre en underrepresentasjon av faren tilknyttet scenarioet. For slike hendelser anbefales det å regne stoffet som giftig og sette tenning lik 0 utenfor anleggsgrensen. Innenfor anleggsgrensen anbefales det å fortsatt bruke egnet tennmodell (SAFEN for ammoniakk) og regne stoffet som både brennbart og giftig.

3.6.6.1 Tenning over sjø

Tenning over sjø skal beregnes på samme måte som tenning over land.

3.6.7 Oppsummering

En oppsummering av anbefalinger er gitt i Tabell 3.3.

Tabell 3.3 - Anbefalte modeller for tennsannsynligheter

Lokasjon	Beskrivelse	Foreslått modell
Internt i anlegget	Ikke beregning av eksponerings-sannsynlighet. Ikke tidsavhengig tennsannsynlighet, alternativt tidsavhengig for en konstant skystørrelse.	IOGP (med tilpasninger for diffusive lekkasjer, se kapittel 3.6.3).
	Beregning av eksponeringssannsynlighet. Tidsavhengig eksponeringssannsynlighet. Driftsregime som for store anlegg eller offshore.	MISOF for prosessområder i anlegget.
	Eksplisitt hensyn til spesielle tennkilder (gasturbiner, dieselmotorer og pumper).	MISOF (forutsetter beregning av eksponeringssannsynlighet).
	Fyrte enheter.	Vurderes spesifikt for hver enhet, RIVM for enklere analyser.
Utenfor anlegget	Kumulativ tennsannsynlighet = 1,0.	Se kapittel 3.6.6.
Spesielle stoffer	Hydrogenlekkasjer.	MISOF for store petroleumsanlegg, HYEX for andre anlegg, se kapittel 3.6.5.

3.7 Analyse av eksplosjoner

3.7.1 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 tredjepart, 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.

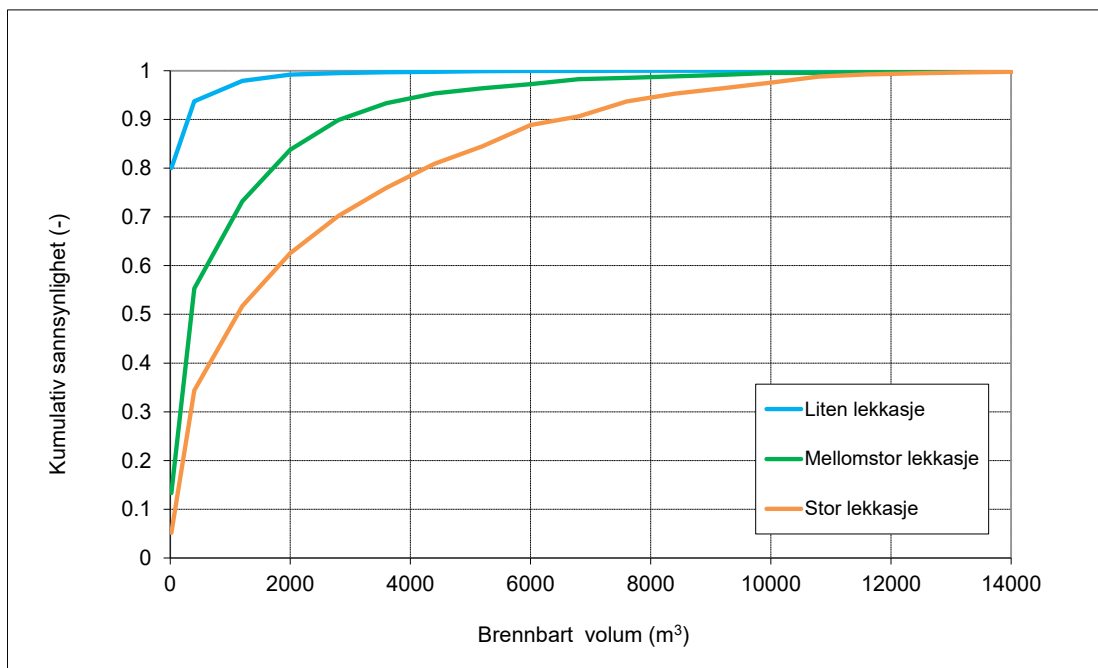
På anlegg hvor brudd på utstyr på grunn av eksplosjon kan medføre en vesentlig eskalering av ulykken ved for eksempel frigjøring av giftige stoffer eller store mengder hydrokarboner, må eksplosjonsanalysen inne i anlegget være tilstrekkelig til å vurdere i hvilken grad det kan bli brudd på utstyr. Nødvendig 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.

3.7.2 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 3-9 viser et eksempel på hvordan dette kan presenteres.

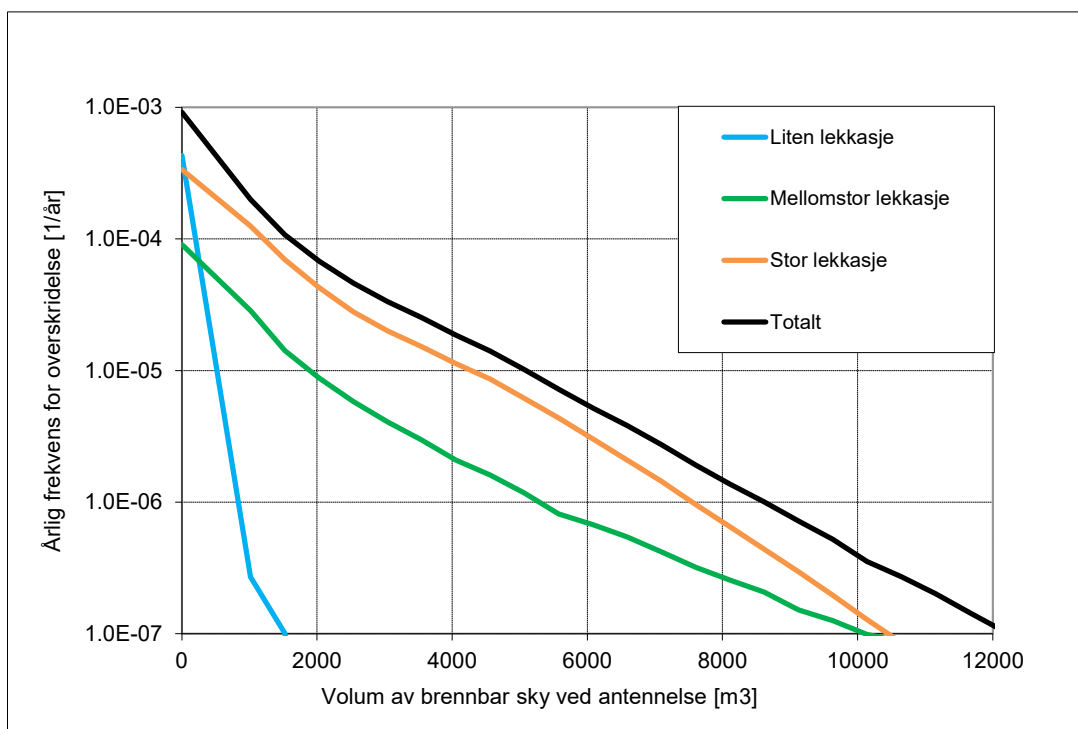
I den grad svært sterke eksplosjoner (detonasjoner) kan inntreffe inne i et anlegg er det ikke bare gassky inne i prosessanlegget som er av interesse, men også størrelsen og posisjon på brennbar sky utenfor det mest obstruerte området, da denne del av skyen for detonasjoner også vil bidra til trykkbølgeenergien. Noen stoffer, som f.eks. hydrogen, detonerer lettere enn andre stoffer, og i slike tilfeller er det ekstra viktig å vurdere energien fra hele den brennbare skyen (og ikke bare den som er innenfor et obstruert område).

For hendelser inne i bygg eller prosessutstyr vil skystørrelsen begrenses av størrelsen på bygg eller utstyr. For slike scenarioer vil mengden som skal til for å oppnå farlige gasskyer/støvsyer (skyer som kan gi betydelig lokal skade) være mye mindre enn for utendørs utslipp. På den annen side vil bygget/utstyret begrense trykkbølgens energi i fjernfeltet.



Figur 3-9 - 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 3.6) etableres informasjon om antente skystørrelser som funksjon av frekvens, se Figur 3-10.



Figur 3-10 - 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 3.6. Mer avanserte tenkmodeller (MISOF) forutsetter en transient eksplosjonsmodell hvor lekkasjeratene og

skystørrelser vil variere med tid. De enklere tennsannsynlighetsmodellene (RIVM og IOGP) forholder seg til en gitt skystørrelse eller lekkasjerate som da må bestemmes.

3.7.3 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. /34/. 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 trykk-frekvens fordeling inne i en sky er NORSOK Z-013 (ref. /32/), 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-scenarier 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 beregningene resultere i for lave eksplosjonstrykk. Det er i tillegg viktig å vurdere et utvalg scenariovariasjoner (skyplassering og tenningspunkt) for å spenne ut utfallsrommet på en god måte.

3.7.4 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. /41/, /34/ og /33/). Ved bruk av enklere modeller anbefales multienergimetoden for både hydrokarboner og hydrogen.

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 fjernfeltrykkene kunne avvike vesentlig fra de som multienergimetoden beregner. I slike situasjoner anbefales det å benytte CFD-simuleringer også for fjernfeltrykkene.

En avgjørende parameter i multienergimetoden er effektivitetsfaktoren ("efficiency factor" i ref. /34/). 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. /34/ basert på ref. /35/. 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 fjernfeltrykket i slike situasjoner kun av skystørrelse og effektivitetsfaktor. Det betyr at man kan gjøre konservative estimater av eksplosjonslasten i fjernfeltet uten å kjøre eksplosjonssimuleringer ved å anta at kildetrykket i skyen er > 1 barg og benytte en høy effektivitetsfaktor.

For generelle stoffer bør effektivitetsfaktoren settes lik 0.5 eller høyere, for hydrogen bør den settes lik 1.0.

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 tredjepart faller i dette området, er det derfor viktig at kildetrykket beregnes med tilstrekkelig nøyaktighet.

Se kapittel 4.2.4 for tålegrenser for eksplosjonslasten.

3.8 Analyse av branner

Når det gjelder simulering av jet- og pølbrann, vil valg av scenarioer i stor grad definere utstrekningen av risikokonturene. Når scenarioene er definert (type, rate, lokasjon, retning, etc.), vil energien i forbrenningen også være definert og resultatene er mindre avhengige av valget av simuleringsverktøy enn det som er tilfelle

med eksponering av brennbar gass, se kapittel 3.5.2. Som følge av dette, er det i dette kapittelet 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. dobbel størrelse dersom antenning er i senter av den brennbare skyen. For kanttenning er denne effekten betydelig lavere siden utvidelsen bare delvis går inn i den brennbare skyen. I tillegg vil dødelig varmeintensitet strekke seg noe utenfor den brennbare skyen når den brenner. Konsekvensene fra en flashbrann kan derfor i noen tilfeller 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). Dersom det er meget stor utstyrstetthet kan forbrenningen i ekstreme tilfeller gå over i detonasjon (slik som Buncefieldhendelsen, ref. /36/), og dette bør vurderes som en del av eksplosjonsanalysen, se kapittel 3.7. 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. Når man vurderer dødelighet av flashbranner utenfor anlegget kan man anta at de som befinner seg inne i den brennbare skyen omkommer, se kapittel 4.2.3.
- **Diffusive branner (pølbranner).** Dersom en væskelekkasje samles i et oppsamlingsbasseng hvor væsken kan fordampe (enten ved koking eller ved damptryksdrevet 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 høy 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. Jetbranner 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. /37/) og FABIG (ref. /38/). 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. /39/.

I tillegg til varmelasten må det tas hensyn til røkgassene fra brannen der disse kan ha betydning for utstrekningen av risikokurvene. Dette er spesielt viktig der stoffene som brenner avgir giftig røkgass. Eksempelvis vil en brann i klorerte hydrokarboner avgi saltsyre. Et annet eksempel er brann i kunstgjødse som medfører utvikling av nitrøse gasser. FABIG (ref. /40/) har oppgitt typiske verdier for produksjon av CO ved hydrokarbonbranner (< 0,5 volumprosent for væskebranner), og basert på disse verdiene kan man konkludere med at CO normalt ikke vil påvirke risikokonturene. Dødelige konsentrasjoner av CO utenfor de varme områdene vil normalt bare oppstå ved branner i innelukkede rom hvor det er begrenset med tilgang på oksygen og begrenset ventilasjon (ulmebranner).

Merk at brannberegninger i mindre grad enn eksplosjonsberegninger og spredningsberegninger er avhengige av valg av simuleringsverktøy (se kapittel 3.5.2), men dersom de analyserte brannene vesentlig endrer

karakter og konsekvens ved at de treffer hindringer, bør CFD vurderes (se retningslinjer i kapittel 3.5.2). Spesielt gjelder dette vurdering av barrierer mot eskalering og eksponering av tredjepart rett utenfor anlegget.

3.9 BLEVE og andre hendelser

3.9.1 BLEVE

BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) opptrer normalt når en trykktank med væske lagret betydelig over kokepunktstemperaturen ved atmosfæretrykk går til brudd. Dette kan resultere i ulike scenarioer og vil kunne generere betydelige varmelaster, flygende fragmenter og trykkbølger til omgivelsene.

Brudd kan enten skje som følge av svekkelse av tanken på grunn av branneksposering eller som følge av svikt av andre grunner, uten ytre brannpåvirkning, som for eksempel godstogavsporing og kollisjon. En BLEVE karakteriseres ofte som fysisk hvis eksplosjonen ikke involverer kjemiske reaksjoner (kun 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. /41/ Chapter 6.5.7, ref. /42/ og /43/. Formlene i ref. /41/ gjelder for LPG, for fluider med annen molvekt kan tilsvarende formler i ref. /44/ benyttes.

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

- I en tank med trykksatt gass vil ekspansjon av gassen ved brudd sette opp en trykkbølge i omgivelsene. Denne første trykkbølgen regnes normalt ikke med som en del av BLEVE-fenomenet. Den kan imidlertid være største bidragsyter til trykkbølger dersom gassfasen har betydelig volum og høyt trykk, og det i tillegg er kort avstand til tredjepart eller det er betydelig grad av innelukkethet omkring tanken.
- Dersom væsketemperaturen ved brudd overstiger kokepunktet ved omgivelsestrykket, men ikke er å regne som overhett, dvs.:

$$T_{\text{koking ved omgivelsestrykk}} < T_{\text{væske ved brudd}} < T_{\text{overhett}} \text{ hvor } T_{\text{overhett}} \sim 0,89 T_{\text{kritisk}},$$

vil ikke avkokingen av væske ved brudd være kraftig nok til å sette opp en sterk trykkbølge (en såkalt "kald" BLEVE). Dersom væsken er brennbar kan en brannball dannes, men denne vil i så fall ikke brenne like intenst eller stige like høyt som for "varm" BLEVE eller sette opp noen trykkbølger.

- Dersom væsken ved bruddtidspunktet er overhett, dvs. $T_{\text{væske ved brudd}} > T_{\text{overhett}}$, 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 scenarioet som oftest forbindes med BLEVE og som standard formler for høyde, diameter og varighet av brannball gjelder for, se f.eks. ref. /41/. Når trykk fra BLEVE beregnes, må man ta hensyn til både trykk, temperatur og volum av væsken i tanken og størrelse av en 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 overhett 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 tredjeperson, for data se f.eks. ref. /43/.

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 overhett (ref. /45/). 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. /46/, 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.

3.9.2 Roll-over og boil-over

I tanker med lavtemperaturvæsker som LNG, LH₂ og ammoniakk vil det pga. avdamping eller påfylling av væske med annen tetthet kunne oppstå en lagdeling. Varme lekkasjer 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 aldring (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. /47/.

Frekvensen på roll-over er vanskelig å definere, men litteraturen viser til 20-30 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 i 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. /48/. Lignende problemstillinger vil kunne oppstå i trykksatte separatortanker (vann, olje og 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.

3.9.3 Intern eskalering av hendelser

Normalt vil mindre hendelser, som f.eks. mindre branner eller eksplosjoner, ikke ha direkte innvirkning på risikokonturer for tredjepart. 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 brennbart materiale. Viktige momenter som må vurderes er i hvilken grad det finnes tilstrekkelige barrierer, enten ved beskyttelsessystemer eller designstyrke, som kan forhindre slik eskalering.

Intern eskalering skal være med i underlaget for scenarioer som bidrar til risikokonturer. Et eksempel på dette er BLEVE som oppstår som en eskalering av en mindre hendelse, se kapittel 3.4.2.9.

3.10 Etablere risikokonturer

For at risikokonturene skal bli representative for et gitt anlegg, må et tilstrekkelig antall scenarioer være vurdert.

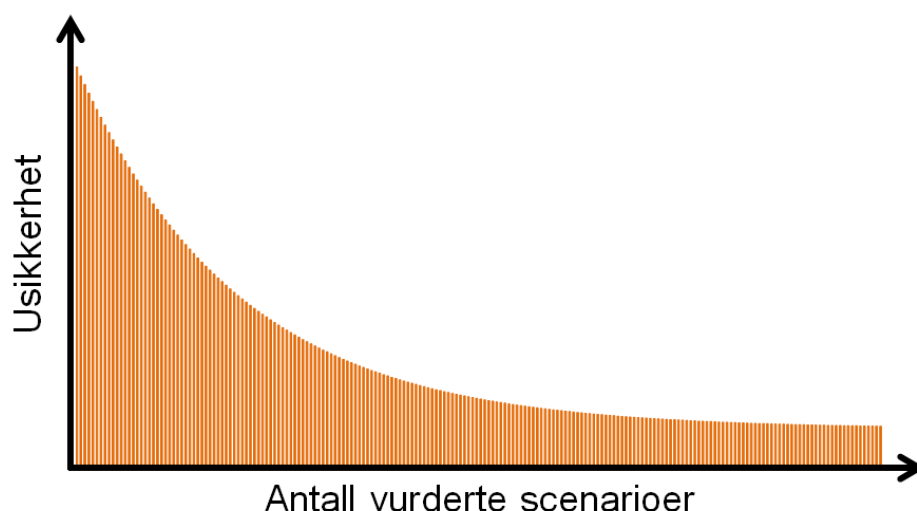
Ved å bruke symmetribetraktninger og forenklede fysiske modifiseringer kan man redusere antall scenarioer man faktisk trenger å simulere. Det er således mulig å vurdere et stort antall scenarioer basert på et betydelig redusert antall simulerte scenarioer.

Dersom det gjøres symmetribetraktninger for å redusere antall simulerte scenarioer, er det viktig at man samtidig vurderer godheten i fysikken i scenarioene, etter prinsippene diskutert i kapittel 3.5.2. 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 3.4.2) og de simulerte scenarioene er utførte med riktig simuleringsverktøy i forhold til retningslinjene i kapittel 3.5.2, er det fortsatt avgjørende at det vurderes et tilstrekkelig antall hendelser.

En risikokontur vil være usikker dersom den er basert på for få scenarioer, fordi den da ikke spenner ut et tilstrekkelig utfallsrom. Merk at selv om man simulerer så mange scenarioer at i praksis "alle mulige" hendelser er simulert, så forsvinner ikke usikkerheten knyttet til andre faktorer, som for eksempel frekvensbildet.



Figur 3-11 - Usikkerhet knyttet til utfallsrom som funksjon av antall vurderte scenarioer - illustrasjon

Antallet scenarioer 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 og eksplosjon) også variere.

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 scenarioer blir fanget opp.
- Dersom risikokonturene bærer tydelig preg av at for få scenarioer er simulert (typisk ved at konturene har tagger/armner knyttet til de simulerte enkeltscenarioene), kan man benytte de simulerte scenarioene til å estimere scenarioer som vurderes som tilstrekkelig like de som er simulert.
- 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 6-2 i vedlegg B). En slik glatting vil ikke ivareta fysikken direkte, kun representere en glatting av resultatfeltet.

I vedlegg B belyses følgende faktorer som påvirker risikokonturene:

- effekt av antall simuleringer
- interpolasjon av simulerte scenarioer
- antall lekkasjepunkter
- antall simulerte rater
- glatting av risikokonturene
- raffinering av risikokonturene i kritiske områder

3.11 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 3.4. 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. Usikkerheter knyttet til bruk av probiter og terskelverdier skal diskuteres når relevant.
- Modellering av utfallsrommet. Det skal diskuteres om det er vurdert og simulert tilstrekkelig antall scenarioer til at risikokonturene kan vurderes som forventningsrette, se kapittel 3.10. Dersom det er vurdert så få scenarioer 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 ivaretatt, sensitiviteter velges derfor blant de parametere og antagelser som ikke har vært gjenstand for variasjoner i analysen.

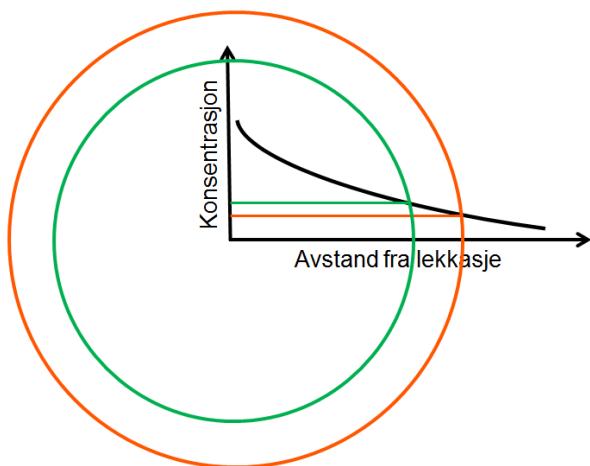
I tillegg til frekvens, fysisk modellering og utfallsrom skal spesielle vurderinger som kan forventes å gi usikkerhet i risikokonturene diskuteres. Et eksempel på dette er usikkerheten i valgt tenkmodell, se kapittel 3.6. Dersom denne bidrar betydelig til risikokonturene, bør usikkerheten rundt denne også diskuteres i risikoanalysen. Likeledes gjelder usikkerheter knyttet til tålegrenser for dødelighet, se særlig kapittel 4.2.2 for giftighet. Det er imidlertid 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.

4 Tålegrenser

4.1 Betydningen av tålegrenser for risikokonturene

Når et tilstrekkelig antall scenarioer er vurdert med valgte lekkasjefrekvenser og fysisk modellering, vil man i prinsippet ha en modell av "alle" hendelser som kan inntreffe og hvilke konsekvenser disse har (konsentrasjon av giftige stoffer, brennbarhet, varmelast og eksplosjonslast). Før man kan etablere en realistisk risikokurve for dødelighet må man imidlertid ha en modell som angir hvilken eksponering som skal regnes som dødelig. Valg av tålegrenser for dødelighet vil påvirke risikokonturens utstrekning. Nedenfor 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

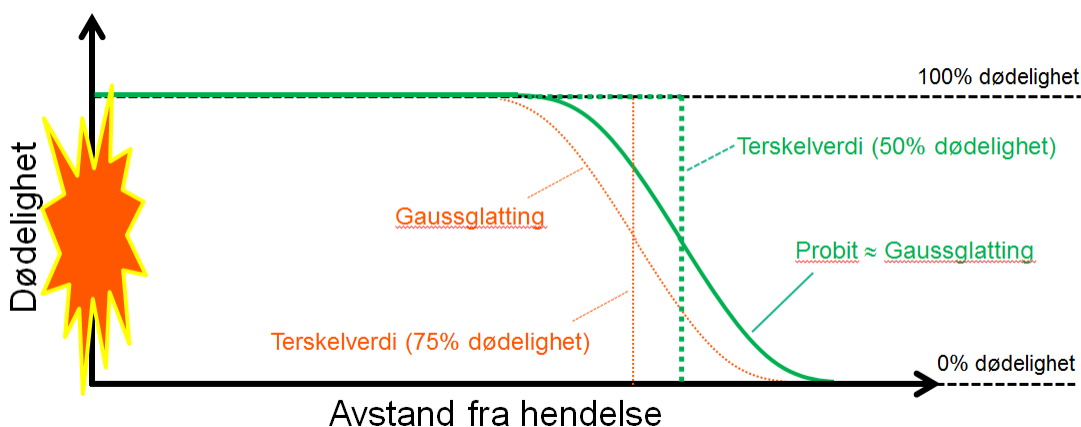
Det finnes to typer tålegrenser; terskelverdier og probiter. Terskelverdier er binære på den måten at de sier at for verdier under terskelverdien er det ingen dødelighet, mens det for verdier over terskelverdien antas 100 % dødelighet. For probiter antar man en gradvis overgang hvor dødelighet for doser under en lavterskel settes til null, og deretter er det gitt en økende sannsynlighet for dødelighet ved økende doser. For 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 risikokonturer når man legger sammen frekvensene for alle simulerte og vurderte scenarioer. Bruk av probiter gjør derfor risikokonturene mindre følsomme for valg av hvilke scenarioer man simulerer (fordi dødeligheten ikke er binær, men fordeles utover et større område). Det anbefales derfor å benytte probitfunksjoner i så stor grad som mulig når man beregner risikokonturer.

For å beregne dødelighet knyttet til intensiteter som varierer over tid, må dosen integreres over scenarioets varighet. I praksis gjøres dette ved å dele opp intensiteten i intervaller med konstant intensitet og multiplisere med tiden. Deretter beregnes den gjennomsnittlige intensiteten som, over total varighet, gir samme dose som den integrerte dosen med ulike intensiteter. Probit-funksjonen for den gjennomsnittlige intensiteten benyttes deretter for å beregne dødelighet.

Merk at ved beregning av doser så er det varigheten av eksponeringen i et gitt punkt som skal benyttes (siden risikokonturene skal gjelde for faste punkter i terrenget). Mulighet for rømning og evakuering skal ikke tas hensyn til, jf. kapittel 1.5 (se også kapittel 4.2.1).

Dersom terskelverdier benyttes til å beregne dødelighet av hvert simulerte scenario, 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 50 % persentilen (som også er lik middelveien). 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 Gaussglatting av dette scenarioet vil resultere i en lignende dødelighetsfordeling som man ville fått om man brukte probitfunksjonen til å regne dødelighet. Grunnen til dette er at både probitfunksjonen og Gaussglatting 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 Vedlegg B). 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

Det anbefales å benytte probitfunksjoner i så stor grad som mulig når man beregner risikokonturer, se kapittel 4.1. Ved bruk av probitfunksjoner, kan sannsynlighet for død beregnes som funksjon av eksponeringstid og konsentrasjon av giftig stoff / varmefluks. 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 være identisk med scenarioets varighet.

For svært langvarige scenarioer er det lite forventningsrett å anta at personer kan bli eksponert for varme- og/eller giftighetslaster i mange timer eller dager uten at nødetater vil få utført evakuering. Det er dermed hensiktsmessig å se eksponeringstid i sammenheng med tiden det tar for nødetatene å evakuere befolkningen etter en hendelse. Dette avhenger av faktorer som blant annet organisering av og avstand til brannvesenet, befolkningstetthet og befolkningens evne til selvevakuering. I tilfeller der det ikke er mulig å gi et godt estimat på evakueringstiden, settes evakueringstiden til utrykningstid pluss 60 minutter.

Dersom probitfunksjonen ikke er tilgjengelig, kan terskelverdier benyttes til å beregne konsekvenser av hvert simulerte scenario. For å oppnå mest mulig forventningsrette risikokonturer skal en terskelverdi som representerer 50 % dødelighet legges til grunn for analysen, se kapittel 4.1.

Om det foreligger spesielle usikkerheter ved bruk av probiter eller terskelverdier skal dette beskrives, se også kapittel 3.11.

4.2.2 Giftighet

DSB har publisert en oversikt over anbefalte probiter for de mest brukte stoffene i Norge (www.dsb.no). Probitene som er anbefalt på DSBs nettsider skal benyttes ved beregning av risikokonturer.

Oversikten er laget på bakgrunn av en gjennomgang av nye og gamle probitfunksjoner fra RIVM som Forsvarets forskningsinstitutt (FFI) har utført på oppdrag fra DSB. Rapporten fra FFI er tilgjengelig på www.dsb.no.

Dersom stoffet ikke finnes i DSBs liste over probiter, anbefales det å benytte probiter definert av RIVM. Gjeldende probitfunksjoner finnes i *Guidelines for Quantitative Risk Assessments "Purple book"*, ref. /42/, utgitt av RIVM. RIVM har utviklet en generell metode, ref. /49/. Denne metoden er utviklet av det nederlandske ekspertpanelet på probitfunksjoner, etter oppdrag fra RIVM, og erstatter den forrige versjonen av metoden fra

2001. RIVM har for øvrig publisert *Probit functions status overview* (ref. /50/). For de fleste stoffene gitt i oversikten er det spesifisert nye probitfunksjoner, med status "Determined in terms of content".

4.2.3 Branner

Bekledning vil generelt gi en beskyttelse mot varmestråling, avhengig av type bekledning og grad av tildekking. Befolkningen vil altså måtte antas å til en viss grad være beskyttet mot varmestråling, men det vil være stor usikkerhet knyttet til graden av beskyttelse. Det ville altså komplisere risikoberegningene betraktelig om beskyttelse fra klær skulle tas hensyn til ved beregning av risikokonturer. I tillegg ville risikokonturene da avhenge av en antagelse om grad av beskyttelse, hvilket ikke er i tråd med de overordnede prinsippene for beregning av risikokonturer. Det skal derfor legges til grunn at tredjepart alltid er ubeskyttet mot varmestråling fra branner (bar hud).

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 $\frac{1}{2}$ LEL.

For varmestråling har TNO, ref. /42/, Chapter 5, Eq. 5.4, gitt følgende probitfunksjon⁵ for død ved eksponering av bar hud:

$$Pr = -12,8 + 2,56 \ln(D)$$

hvor den mottatte dose er

$$D = t q^{4/3}, \text{ med benevnning } q \left(\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right) \text{ og } t \text{ (s)}$$

Sammenhengen mellom varmekraft og varighet som tilsvarer 50 % dødelighet (dvs. $Pr = 5$) er vist i Figur 4-3. Det er satt en nedre grense på $1,5 \text{ kW/m}^2$ (eksponeringstid 610 s), som tilsvarer terskelen for u håndterlig smerte jf. ref. /51/.

For varmekraft lavere enn $1,5 \text{ kW/m}^2$ anbefales det å sette dødeligheten lik null. Dette gjelder uavhengig av eksponeringstid og uavhengig av om probitfunksjon eller terskelverdi benyttes til å beregne dødelighet fra varmestråling.

Når probitfunksjon benyttes til beregning av dødelighet, frarådes det å benytte kortere eksponeringstid enn 30 s. Dette gjelder selv om det kan argumenteres med kortere eksponeringstid. Bakgrunnen for dette er at den relative usikkerheten i anslaget for eksponeringstid normalt vil være høy for så korte varigheter.

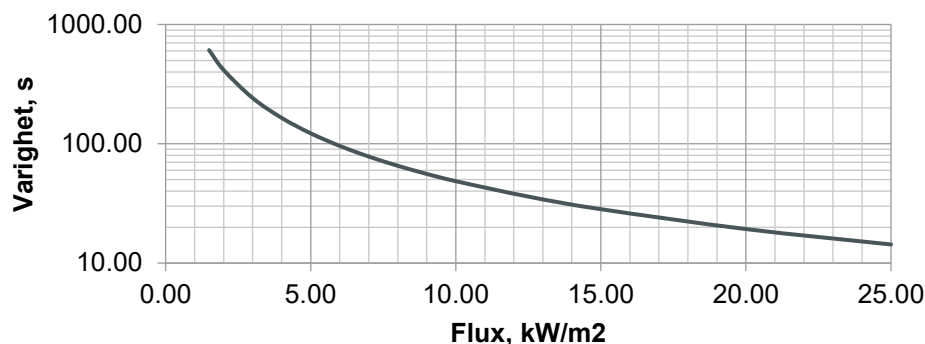
Dersom man benytter terskelverdier til å vurdere konsekvensen av de simulerte scenarioene, skal man vurdere brannvarigheten (t) som er assosiert med de simulerte brannene og deretter finne varmelasten som tilsvarer 50 % sannsynlighet for død fra probiten, og benytte denne verdien som terskelverdi. Terskelverdiene for ulike varigheter vil da være som angitt i Tabell 4.1 (tallene kan også leses av Figur 4-3).

Dersom analyseverktøyet tillater å modellere probiter med lang eksponeringstid, så er dette å anbefale før bruk av terskelverdi (se også kapittel 4.2.1).

Merk at den høyeste varmekraften oppgitt i Tabell 4.1 er 15 kW/m^2 , tilsvarende en eksponeringstid på 28 sekunder. Det frarådes å benytte høyere terskelverdi enn 15 kW/m^2 ved vurdering av varmestråling. Begrunnelsen for dette er den samme som for anbefalingen om å ikke benytte kortere eksponeringstid enn 30 s når probitfunksjon benyttes til å fastsette dødelighet.

⁵ Når enheten W/m^2 benyttes for q , får probitfunksjonen følgende form: $Pr = -36,38 + 2,56 \ln(t \cdot q^{4/3})$

Varmestråling vs tid for 50 % sannsynlighet for død med bar hud, TNO probit



Figur 4-3 - Sammenheng mellom varmekraft 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 branneksponeering	Terskelverdi for død som følge av varmekraft
≥ 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
65 sekunder	8 kW/m ²
49 sekunder	10 kW/m ²
28 sekunder	15 kW/m ²

I tillegg til varmelasten må det tas hensyn til røykgassene fra brannen der disse kan ha betydning for utstrekningen av risikokonturene, se også kapittel 3.8. I praksis legges den lasten med størst konsekvens (av varme og røyk) til grunn for risikokonturene. Karbonmonoksid (CO) produsert av hydrokarbonforbrenning vil normalt ikke bidra til risikokonturene, men i spesielle tilfeller kan stoffene som brenner avgi giftig røykgass (eksempelvis kan klorerte hydrokarboner avgi saltsyre og kunstgjødsel kan avgi nitroser gasser). Ved utvikling av giftig gass under branner skal dette vurderes på samme måte som direkte utslipp av giftige stoffer. Dette betyr at man må beregne utslippsrate i nærfeltet og spredning i fjernfeltet. For dødelighet benytter man probit om den er tilgjengelig, om ikke benytter man terskelverdi for 50 % dødelighet.

For flashbranner kan man anta at de som befinner seg inne i den brennbare skyen omkommer, mens de som er utenfor overlever. Dette er en forenkling som både bidrar til enklere analyser, men som også representerer en form for vekting av faktorer som er både konservative og ikke-konservative, slik at de resulterende risikokonturene kan hevdes å være nære forventningsrette. I den ikke-konservative retningen er den viktigste faktoren at man ikke tar med at den brennbare skyen kan utvide seg når den forbrenner (se kapittel 3.8). Dette kompenseres ved at man benytter en konservativ tilnærming til tenning utenfor anleggets område (se kapittel 3.6.6).

Det foreligger ikke like anerkjente probiter for eksponering fra hydrogenbranner som det gjør for hydrokarbonbranner. Hydrogenbranner brenner med lavere IR-stråling og er derfor ansett å gi noe mindre skade på mennesker enn hydrokarbonbranner med samme varmekraft. For veldig små og rene hydrogenbranner er det kjent at strålingen kan være så lav at mennesker kan gå rett inn i den usynlige flammen uten advarsel fra økende stråling. For større branner vil det ofte dras med urenheter inn i hydrogenflammen, og den vil både bli synlig og avgi stråling mer likt en hydrokarbonbrann. For branner med syntesegass (blanding av hydrogen og hydrokarboner) vil flammene og strålingen være svært like som for rene hydrokarbonbranner.

I tillegg er det slik at simuleringsverktøyene, både empiriske og CFD-verktøy, har optimalisert sine strålingsalgoritmer for hydrokarbonbranner og kan ses på som mer usikre ved fastsetting av intensitet for hydrogenbranner. Særlig er overgangen mellom usynlig flamme med lav stråling og synlig flamme med høyere stråling usikker.

Det anbefales derfor at tradisjonelle hydrokarbonprobiten benyttes også for hydrogenbranner. Det tillates at dedikerte probiter for hydrogen benyttes dersom disse blir allment tilgjengelige og anvendt, men da må også usikkerheten i strålingsberegningene fra simuleringsverktøyene inkluderes og diskuteres.

4.2.4 Eksplosjoner

4.2.4.1 Generelt

Tålegrensen for eksplosjon er avhengig av mange faktorer som ikke enkelt lar seg sammenfatte; effekt av prosjektiler, kollaps av bygninger, knuste vinduer, personer som kastes mot hardt underlag etc. Disse indirekte virkningene av eksplosjon kan medføre død for langt lavere trykk enn det som gir direkte død ved lungekollaps. Fordi de lokale forholdene mht. prosjektiler, kollaps av bygninger, harde flater etc. varierer sterkt, er det særdeles vanskelig å etablere entydige probitfunksjoner og terskelverdier for død som følge av eksplosjonstrykk.

I et notat publisert sammen med retningslinjene på DSB sine hjemmesider (www.dsb.no), ref. /52/, er de ulike konsekvensene av eksplosjoner diskutert. Dette notatet konkluderer med at det mest hensiktsmessige til bruk for å beregne risikokonturer til hensynssoner er å knytte dødelighet til kollaps av bygninger. Terskelverdier knyttet til 50 % dødelighet som følge av kollaps av bygning legges derfor til grunn for dødelighet ved eksplosjoner.

4.2.4.2 Terskelverdier for eksplosjoner

Ved fastsettelse av terskelverdier skal man i henhold til kapittel 4.2.1 ta utgangspunkt i 50 % dødelighet for å gjøre hensynssonene mest mulig forventningsrette. I henhold til dette settes terskelverdien lik 50 % dødelighet som følge av kollaps av bygning fra ref. /52/.

Anbefalt terskelverdi for beregning av risikokonturer er presentert i Tabell 4.2.

Tabell 4.2 - Terskelverdier for dødelighet som følge av eksplosjon (50 % dødelighet)

Varighet på trykkbølger	Terskelverdi for død som følge av eksplosjonslast
Benyttes for alle varigheter	40 kPa (0,4 barg)

4.2.5 Spesielle stoffer

Spesielle stoffer og blandinger kan være utfordrende å modellere med standard konsekvensverktøy (både CFD og empiriske verktøy).

I slike tilfeller må man dokumentere hvordan det spesielle stoffet er modellert og hvordan usikkerheten rundt dette kan vurderes (se også kapittel 3.11).

Disse stoffene må vurderes spesielt fra gang til gang, men følgende retningslinjer kan være nyttige for å estimere risikoen knyttet til håndtering av stoffene:

- Vurder selve utslippet og mekanismene som inntreffer ved lekkasje, inkludert dråpedannelse, faseendring og sublimering. Vurder hvilke av komponentene i utslippet som bør følges videre for å vurdere dødelighet i hensynssonene. Damptrykk kan benyttes til å vurdere mengde som fordampes.
- Komponenter som kan forventes å gi dødelighet i hensynssonene kan, om verktøyet som beregner konsekvenser ikke har disse som standard, tilnærmes med kjente komponenter med tilsvarende egenskaper (damptrykk, tetthet, temperatur, etc.). Et godt utgangspunkt kan være å benytte et stoff med liknende egenskaper, og justere enkelte parametere ved behov (LFL, UFL, flammepunkt osv.)
- Dersom det ikke kan fremskaffes probiter eller terskelverdier for de aktuelle stoffene kan man anta dødelighet tilnærmet likt et kjent stoff som har forventet tilsvarende dødelighet.

5 Forenklet metodikk

For enkelte anleggstyper kan det være hensiktsmessig å beregne sikkerhetsavstander basert på en forenklet metodikk i stedet for å basere seg på risikokonturer, se også retningslinjenes kapittel 1.2. Det må utarbeides nærmere retningslinjer før en slik metodikk eventuelt kan tas i bruk.

Tabell 5.1 viser anleggsenheter som er foreløpig vurdert som aktuelle for bruk av forenklet modell:

Tabell 5.1 – Anleggsenheter som foreløpig er vurdert som aktuelle for en forenklet metodikk

Anleggstype	Design-standard
Forbruksanlegg LPG	NS-EN 12542 og NS-EN 14570
Forbruksanlegg LNG/LBG	NS-EN 13645
Fylleanlegg for gassflasker LPG	NS-EN 12542 og NS-EN 14570
Fylleanlegg for LNG/LBG som drivstoff til tunge kjøretøy	NS-ISO-EN 16924
Fylleanlegg for CNG/CBG som drivstoff til tunge og lette kjøretøy	NS-ISO-EN 16923
Drivstoffanlegg med overgrunntanker for bensin og diesel	NS-EN 12285-2
Tankanlegg for diesel og fyringsoljer samt brannfarlig væske kategori 3	NS-EN 14015 eller NS-EN 12285-2

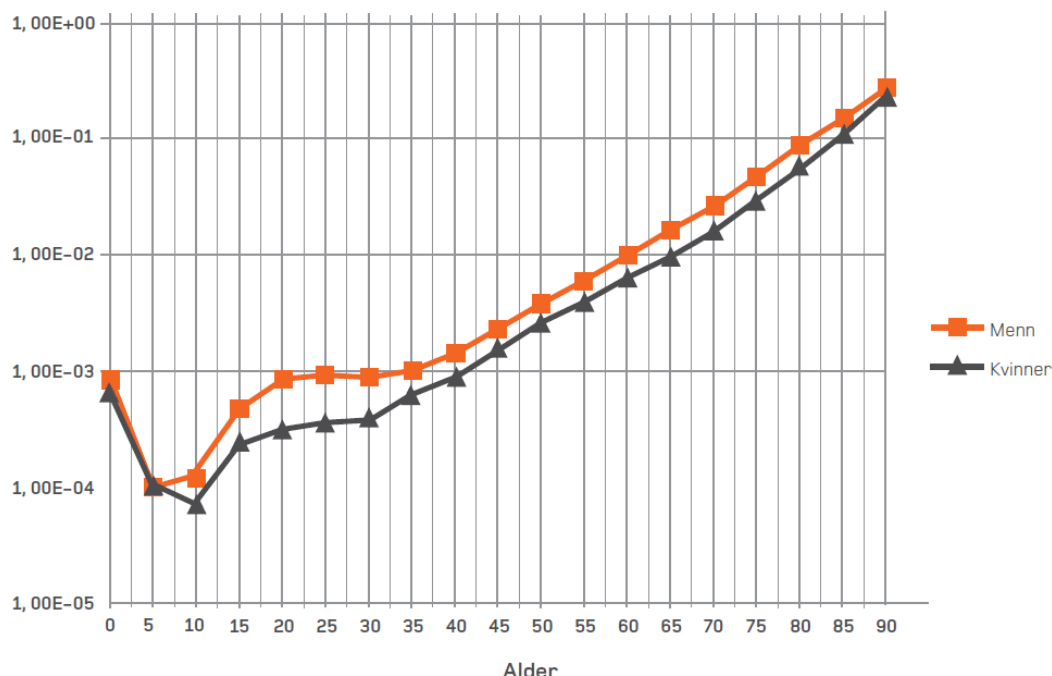
Ulike typer anleggsenheter er definert i DSBs veiledning til innmelding, endring og opphør av farlig stoff /53/. Det fremgår av veiledningen at "en anleggsenhet kan være en sammenstilling av tanker, rør og utstyr som utgjør et helt anlegg eller en del av et anlegg". Oppstillingen over er noe mer detaljert enn i veiledningen. I tillegg er det vist til relevante standarder for anleggstypene.

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 tredjeperson. For områder utenfor hensynssonene (frekvens for dødelighet under $1,0E-7$ pr. år) vil anlegget 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:

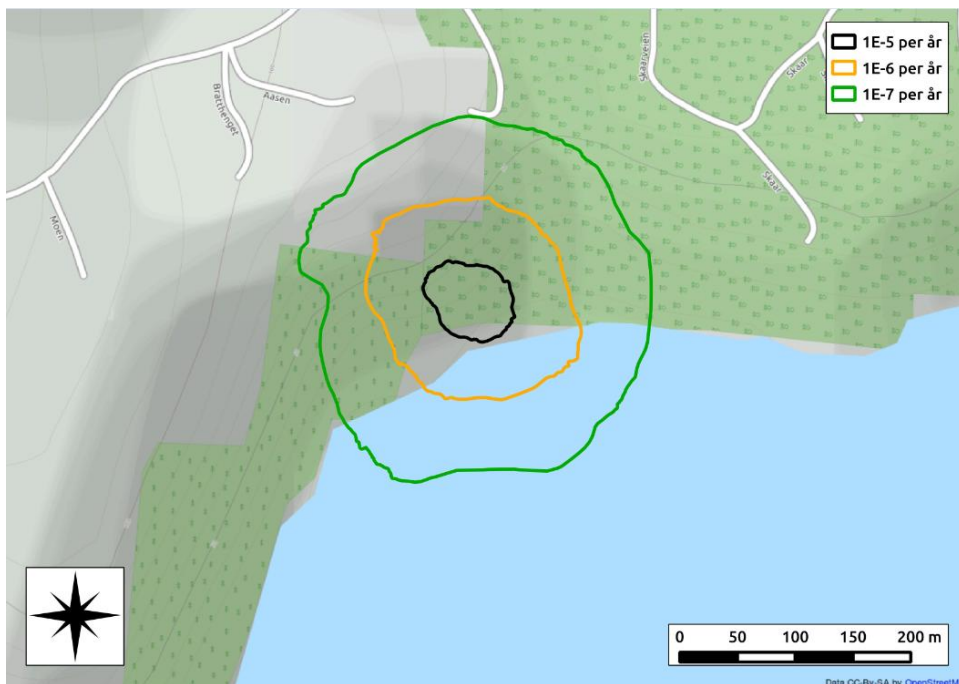
- Frekvensfordeling av topphendelsene: Presenteres både som frekvens som funksjon av lekkasjestørrelse og som frekvens som funksjon av område (trenger ikke isokurver, men som minimum en tabell som viser i hvilke områder lekkasjepunktene ligger).
- Tennesannsynligheter: Presenteres både som funksjon av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

I tillegg vurderes følgende mellomresultater som nyttige for å kommunisere risikobidragstyper og beredskapshensyn (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):

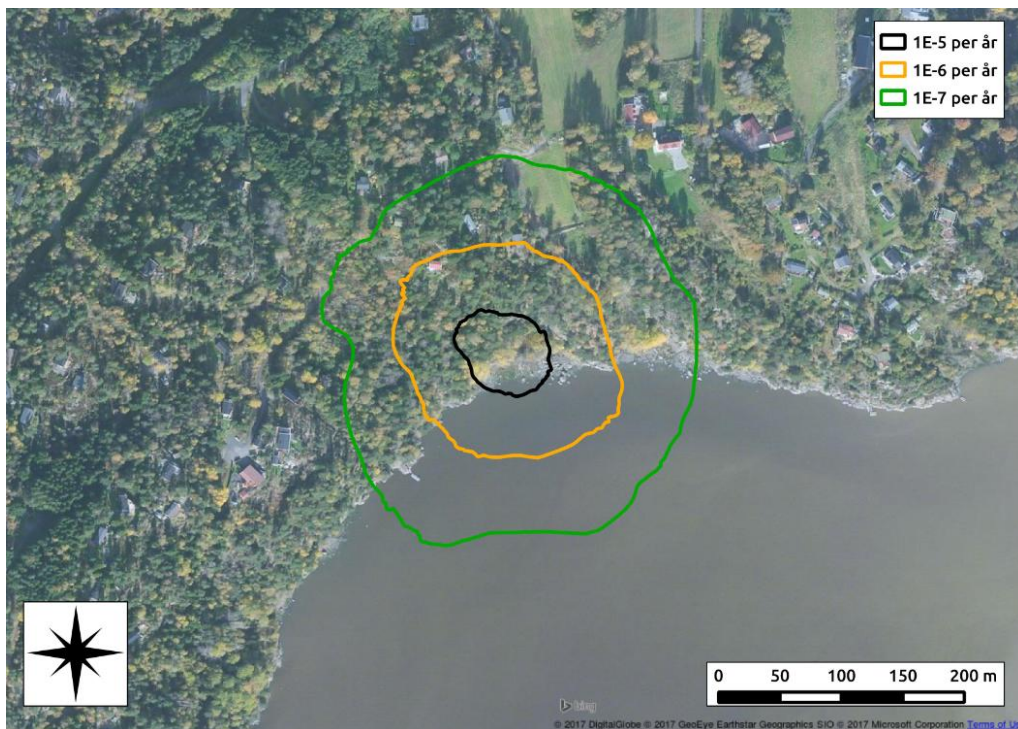
- risikokonturer for eksponering av brennbart eller giftig stoff
- risikokonturer for brannlast
- risikokonturer for eksplosjonslast

For økt lesbarhet bør risikokonturene plottes på et kart eller foto med angitt skala/målestokk. 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 opptegning av beregnede konturer på kart elimineres.

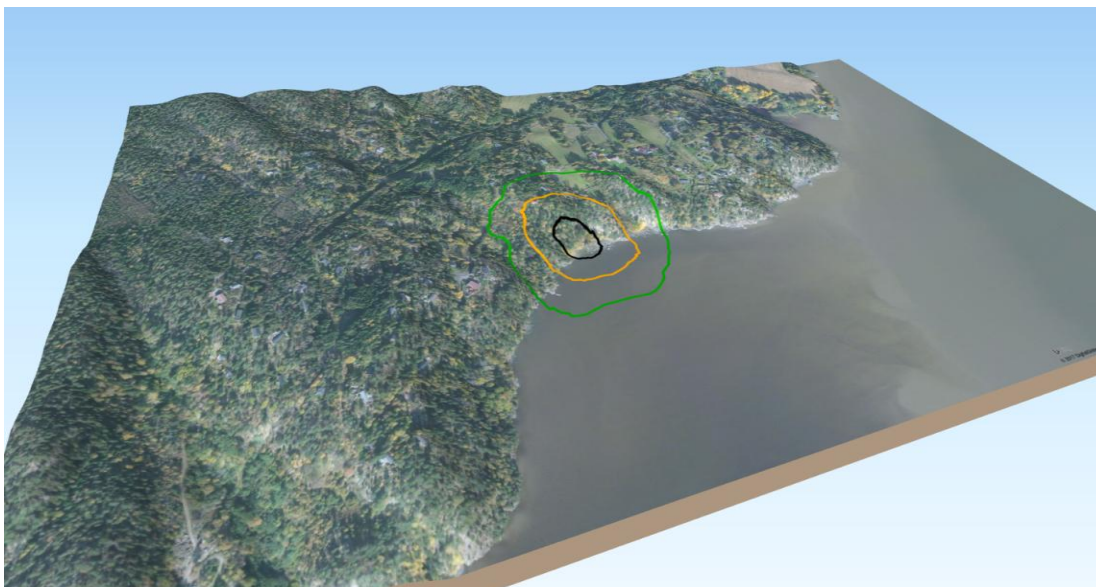
For planer om etablering av nye anlegg bør risikokonturene vises som plot i en kopi av gjeldende reguleringsplan (eller kommuneplankartet dersom området ikke er regulert). Dette gjelder også for berørte reguleringsplaner ved utvidelser eller andre vesentlige endringer i eksisterende anlegg.



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)

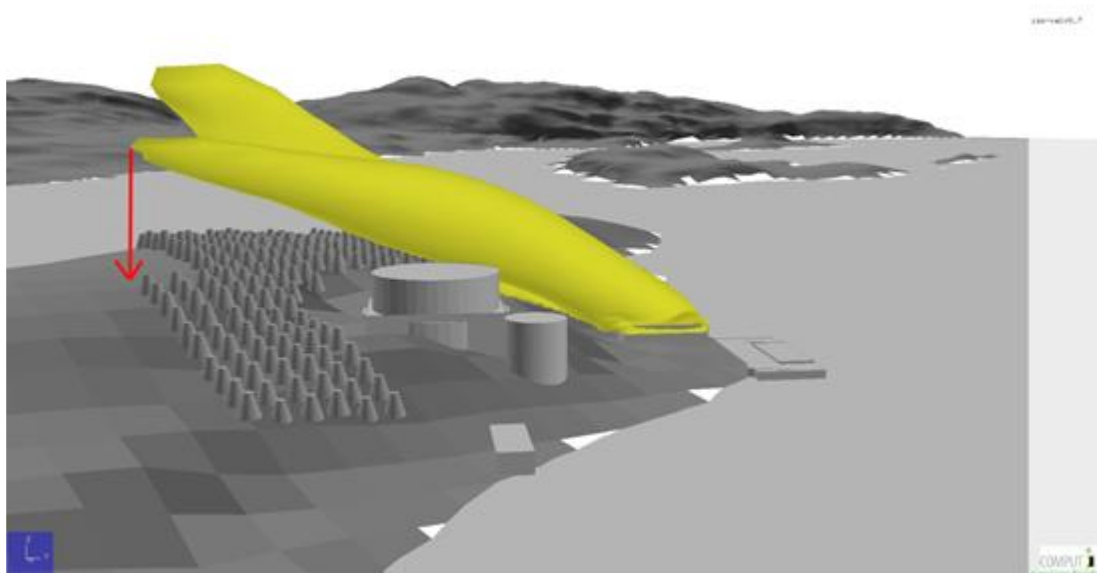


Figur 6-4 - Illustrasjon av risikokonturer som er projisert på 3D-kart (plasseringen er tilfeldig valgt)

6.3 Hvor høyt over bakken gjelder hensynssonene?

Risikokonturer kan i utgangspunktet presenteres som projisert maksimumkontur eller konturer som varierer med høyden over bakken. Den projiserte konturen fremkommer ved å ta den høyeste (alvorligste) verdien i alle høyder (z-verdier) for hver posisjon i xy-planet. I en projisert fremstilling vil man ikke få med informasjonen om at risikoeksponeringen er forskjellig for ulike høyder over bakken, men fordelen 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.

Det er i utgangspunktet anbefalt å benytte projiserte risikokonturer til bruk av hensynssoner. Dette gjør at man får samme hensynssoner for høyhus som for eneboliger. I noen tilfeller vil det kunne være høyere risiko litt oppe i høyden enn nede ved bakken (dersom dødeligheten skyldes lett gass), mens andre ganger er det høyere risiko nede ved bakken (ved dødelig tung gass). Bruk av projiserte risikokonturer vil kunne gjøre det enklere å etablere og benytte hensynssonene. Dersom det er stor forskjell på risikokonturene ved bakken og høyt oppe bør dette diskuteres i risikoanalysen, for eksempel i beskrivelsen av usikkerhet (se kapittel 3.11).



Figur 6-5 - Eksempel som viser at eksponering av brennbar gass er forskjellig for ulike høyder

6.4 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 Scenarioer for beredskapshensyn

Risikokonturene viser ikke enkeltscenarioer, kun total risikoeksponering for tredjepart summert fra alle mulige scenarioer. Det er heller ingen krav om at scenarioer for eksterne beredskapshensyn skal knyttes til kriteriene for akseptabel risiko, jf. temarapporten fra DSB, ref. /1/. Men, risikoanalysen gjør det mulig å velge beredskapssenarioer som samsvarer med beregnede risikokonturer. Risikoanalysene skal derfor i tillegg til hensynssonene presentere noen representative scenarioer som kan benyttes for beredskapshensyn.

Det anbefales å gi eksempler på scenarioer 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

Verstefallssenarioer kan vises som plot for eksponerte områder ved verste mulige hendelse/konsekvens.

Dersom det er mulighet for eskalering etter at beredskapsorganisasjonen er utkalt, for eksempel BLEVE og brann i ammoniumnitrat, så bør disse hendelsene også beskrives.

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 storulykkevirkksomheter", DSB 2019, ISBN 978-82-7768-420-8. HR-nummer 2357.
- /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", IOGP report 434-1, 2019.
- /9/ "Storage leak frequencies", IOGP report 434-03, 2022
- /10/ "Land transport accident statistics", IOGP report 434-9, 2010.
- /11/ "Process leak for offshore installations frequency assessment model – PLOFAM(2)", Lloyds Register Consulting, Report No 107566/R1, December 6th, 2018.
- / 12/ Safetec: "Leak frequencies for land-based oil and gas facilities", Report No. ST-16529-1, Rev. 5.0, 14.02 2022.
- /13/ Scandpower: "Risk Based Calculations of (Design) Explosion loads on Manned Buildings – Rafnes", Report No 80102017/R1, 23 September 2009
- /14/ LEAK FREQUENCIES FOR LAND-BASED OIL AND GAS FACILITIES, Safetec report no. ST-16529-1, Rev. 5.0, 14.02.2022
- /15/ HyRAM+, www.energy.sandia.gov, 2025 National Technology and Engineering Solutions of Sandia, LLC.
- /16/ Fossan, I., van Wingerden, K., Knudsen, Ø., Wiklund, J. & Gaathaug, A.V. (2024): "The SAFEN ignition probability model for hydrogen", 15th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions, Naples, Italy – June 10-14, 2024
- /17/ LNG Hose Failure Probability, Shell Global Solutions (US) Inc., Houston, SR.14.11417 (2014)
- /18/ Oracle Analytics Interactive Dashboards - Hazmat Incident Report Search
- /19/ DNV: "Recommended failure rates for pipelines", Report No.: 2025-0947, Rev. 1, 2025-12-04
- /20/ "Vapour Cloud Development in Over-filling Incidents ", FABIG Technical Note TN 12.
- /21/ "LNG Source Term Models for Hazard Analyses", Health and Safety Laboratories, 2010.

- /22/ J. L. Woodward and R. M. Pitblado: "LNG Risk Based Safety Modeling and Analysis", AIChE and John Wiley, 2010.
- /23/ Scandpower: "Comparative study on gas dispersion", Report No. 101368/R1, 24 January 2012.
- /24/ IOGP Risk Assessment Data Directory: "Ignition Probabilities", Report No. 434-06, September 2019.
- /25/ UKOOA/HSE: "IP Research Report. Ignition Probability Review, Model Development and Look-Up Correlations", January 2006.
- /26/ Lloyds Register Consulting: "Modelling of ignition sources on offshore oil and gas facilities", Report No. 106364, 2016.
- /27/ Safetec: "Modelling of ignition sources on land-based oil and gas facilities", Report No. ST-16542-1, Rev. 7.0, 22.12 2022.
- /28/ HyRAM: A methodology and toolkit for quantitative risk assessment of hydrogen systems, Elsevier International journal of hydrogen energy, vol 42, pages 7485-7493 (2017)
- /29/ Concept risk assessment of a hydrogen driven high speed passenger ferry, Elsevier International journal of hydrogen energy, vol 45, pages 1359-1372 (2020)
- /30/ GKP7H2 high speed passenger ferry concept risk assessment, Lloyd's Register Consulting report for MoZEES project, LR report 106575/R1, April. 2018
- /31/ LIQUID HYDROGEN SAFETY: Data Report: Closed room and ventilation mast studies, Forsvarets forskningsinstitutt (FFI) Norwegian Defence Research Establishment, DNV-GL Draft report, May 2020
- /32/ "NORSOK Z-013, vedlegg F".
- /33/ 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.
- /34/ "Obstructed Region Explosion Model", PHAST Theory, Rev. 2, 2015.
- /35/ "GAMES final report", W.P.M. Mercx, A.C. van den Berg, D. van Leeuwen, TNO Report PML, 1998-C53.
- /36/ "Buncefield: Why did it happen?", COMAH Control of Major Accident Hazards, 2011
- /37/ "NORSOK S-001":2018
- /38/ "Design Guidance for Hydrocarbon Fires, Fire and Blast Information Group (FABIG) Technical Note 13".
- /39/ "Handbook of Fire Protection Engineering", SFPA/NFPA, 2016
- /40/ FABIG: "Fire Loading and Structural Response", Technical note 11, 2010
- /41/ TNO: "Methods for Calculation of Physical Effects (TNO "Yellow Book")", CPR 14E.
- /42/ TNO: "Guidelines for Quantitative Risk Assessments (TNO "Purple Book")", CPR 18E.
- /43/ Frank P. Lees: "Loss Prevention in the Process Industries", 4th Edition, Elsevier 2016.

- /44/ D.A. Lihou and J.K. Maud: "Thermal Radiation from Fireballs", I. Chem. Eng Symposium Series No. 71, The Institute of Chemical Engineers, 1982.
- /45/ Xie Mengmeng: "Thermodynamic and gas dynamic aspects of a BLEVE", Delft University of Technology, Report 04-200708, 2007.
- /46/ 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).
- /47/ "Rollover in LNG storage tanks", Summary Report by The International Group of LNG Importers (GIIGNL), 2012-2015.
- /48/ A. Buang: "Boilover in liquid hydrocarbon fires", Ph.D Thesis Loughborough University, 2014.
- /49/ Method for derivation of probit functions for acute inhalation toxicity, RIVM Report 2015-0102
- /50/ Probit function status overview | RIVM (<https://www.rivm.nl/en>)
- /51/ TNO: "Methods for the determination of possible damage (TNO "Green Book")", CPR 16E.
- /52/ Vysus Group: «Bakgrunn for terskelverdi for eksplosjon – rev.1», Notat no. PRJ11100262033, 30. juni 2021
- /53/ <https://www.dsb.no/farlige-stoffer/farlige-stoffer/veiledning/veiledning-til-innmelding-endring-og-opphor-av-farlig-stoff/>

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. Storulykeforskrift § 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 peroksidtype	
	Reaksjonsfarlig stoff	
	Stoff som utvikler giftig gass	
	Nedkjølte toksiske gasser	
	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/trykktanker	
	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	
	Naboer?	
	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-/terrormål i nærheten?	
	Annet	

7.0	Infrastruktur nær virksomheten	Referanser
	Trafikkerte veier; private veier, fylkesvei, riksvei etc.	
	Buss, tog, trikk, bane ferge, 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?	
	Automatiske brannslukking ute/inne, deluge anlegg, vannkanon, skumanlegg, vanngardin etc.	
	Brannalarm, gassalarm	
	Ulovlig sabotasje og terrorhandlinger: er virksomheten i seg selv et sabotasje-/terroremål?	
	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. Svikt av prosesstanker (atmosfæriske og trykksatte). Lekkasje eller brudd i varmevekslerrør. Svikt i prosessrør.	• Farlige kjemikalier (inkludert hydrokarboner) • Andre kjemiske farer • Sprengstoff • Uventede reaksjoner • Inkompatible materialer • Termisk ukontrollert reaksjon (runaway) • Luftingress • Korrosjon • Erosjon • Sprøhet (kjemikalier, lav temperatur) • Ekstern sammenstøt • Tretthet • Unormal vibrasjon • Mekanisk sammenstøt • Overfylling
Høy/lav trykk Høy/lav temperatur	• Varm prosess/super varme • Damp • Kondensat • Kalde prosesser /kryogene • Termisk forbrenning • Sikkerhetsventiler • Fakler
Bygninger	Virkningen av eksterne farer
Eskalering	• BLEVE • Roll-over • Boil-over • Konsekvens av andre hendelser

Kategori	Ledeord
	• Brann og gassdeteksjon, brannslukningsutstyr, vanngardiner etc. • Evakueringsruter
Transportering	• Hendelser med jernbane/jernbanevogn • Dokk/marine hendelser • Kjøretøy trafikkhendelser • Tankbiler
Mobilt Utstyr	• Tungt maskineri • Lette kjøretøy
Løfte utstyr	• Fallende/svingende last • Kollaps av løfteutstyr, kraner etc. • Sviktende rigging
Security	• Terrorisme • Ildspåsettelse • Sabotasje • Sivil uro • Hacking • Innbrudd
Drift	• Samtidige operasjoner • Skifte av personell • Innleid personell/vikarer • Start/stopp, vedlikehold og inspeksjon • Nødstopp
Marine fartøy	• Skips sammenstøt med kai • Lasting/lossing Utslipp
Fabrikasjon og installasjon	• Kompleksitet • Modulisering • Transport • Oversjøisk produksjon
Spesielle mekaniske eller elektriske ting	• Overdreven vibrasjon • Roterende utstyr (for eksempel kompressorsvikt) • Sterke magnetiske felt • Støy • Lagret energi • Elektrisk sjokk • Høy spenning/lav spenning, elektriske farer • Statiske elektriske farer • Ioniserende stråling • EX soner/utstyr
Strukturelle feil	• Jordskjelv • Fundamentering (innsynkning, skure) • Korrosjon

Kategori	Ledeord
	• Tretthet • Vektkontroll • Primærstruktur • Sekundære konstruksjoner • Midlertidige konstruksjoner
Svikt i hjelpesystemer	• Kjølevann • Kjøletårnbrann • Nedkjøling • Strøm • Damp • Luft • Inert gasser • Oppvarming, ventilasjon og aircondition systemet • Kommunikasjonssystem • Brannslukkingssystem • Internett • Avløpsvann fjerning / behandling • Vakuum • Tett fangdam/oppsamling
Natur og miljø	• Seismisk aktivitet • Vær: ○ Sterk vind ○ Oversvømmelse ○ Ekstrem kulde eller varme ○ Høy eller lav luftfuktighet, tåke ○ Jordskjelv/tsunami ○ Orkan/tornado ○ Lyn • Påvirkning på utstyr fra marint miljø • Innsynkning /ustabilt terreng/jord og snøskred • Geologiske forhold for strukturell støtte
Organisasjon	• Prosedyrer • Ansvar og myndighet • Kultur og adferds forståelse • Opplæring, kompetanse • Planlegging • Kommunikasjon • Beredskap • Industrivern • Vaktordning

Vedlegg B Etablering av risikokurver

Innholdsfortegnelse

1	Introduksjon	3
2	Effekt av antall scenarioer	3
3	Effekt av antall retninger	5
4	Interpolasjon av simulerte scenarioer	7
5	Antall lekkasjepunkter	8
6	Antall simulerte rater	9
7	Glatting av risikokonturene	9
8	Raffinere risikokonturer i kritiske områder	11
9	Oppsummering - risikokonturer	12

1 Introduksjon

Dette vedlegget er en del av «Retningslinjer for kvantitative risikovurderinger for anlegg som håndterer farlig stoff», og beskriver gode prinsipper for å etablere forventningsrette risikokonturer.

2 Effekt av antall scenarioer

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.

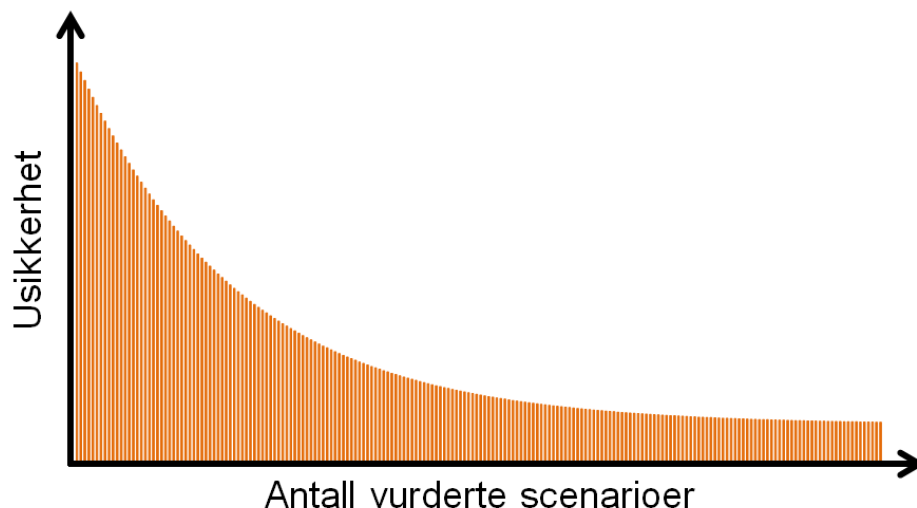
I virkeligheten er det uendelig mange forskjellige scenarioer (slutthendelser) som kan inntreffe på et anlegg, og man må i praksis diskretisere utfallsrommet for topphendelsene (ref. kap. 3.2) slik at man vurderer et tilstrekkelig antall variasjoner av disse topphendelsene. Dette må gjøres med å velge 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 forenklede fysiske modifiseringer på allerede simulerte scenarioer kan man redusere betydelig antall vurderte scenarioer man faktisk trenger å simulere. Det er således anledning for å vurdere et stort antall scenarioer basert på et betydelig redusert antall simulerte scenarioer.

Dersom det gjøres symmetribetraktninger for å redusere antall simulerte scenarioer, er det viktig at man samtidig vurderer godheten i fysikken i scenarioene, etter prinsippene diskutert i hovedrapportens 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 hovedrapportens kapittel 3.3.2) og de simulerte scenarioene er utførte med riktig simuleringsverktøy i forhold til retningslinjene i hovedrapportens 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 scenarioer 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 scenarioer. 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 scenarioer, se Figur 2-1. Merk at selv om man simulerer mange scenarioer at i praksis "alle mulige" hendelser er simulert, så forsvinner ikke usikkerheten rundt frekvensbildet (hvor sannsynlig er de ulike hendelsene).



Figur 2-1 - Usikkerhet som funksjon av antall vurderte scenarioer - illustrasjon

Antallet scenarioer 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

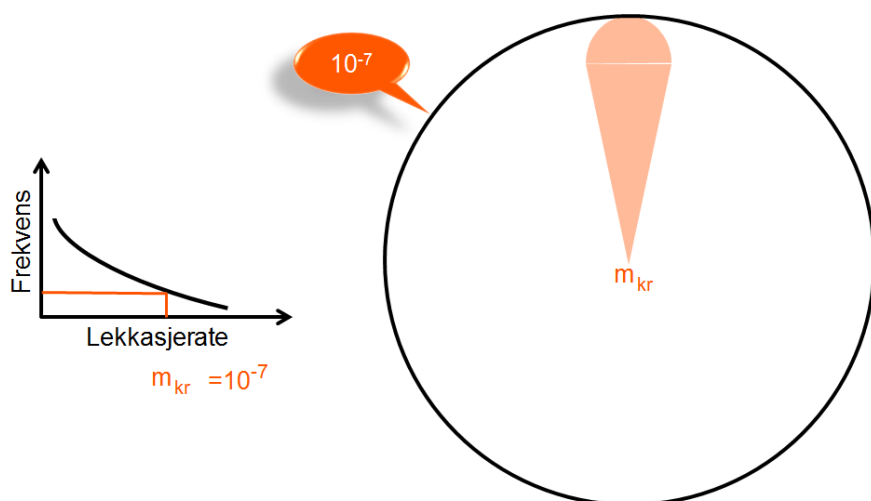
På denne måten kan et case med et stort antall scenarier reduseres til et overkommelig antall, samtidig som det vil være mulig å simulere ekstra scenarioer med de lekkasjeratene som bidrar mest til risikokonturene.

En risikoanalyse må analysere tilstrekkelig antall mulige scenarioer 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 Effekt av antall retninger

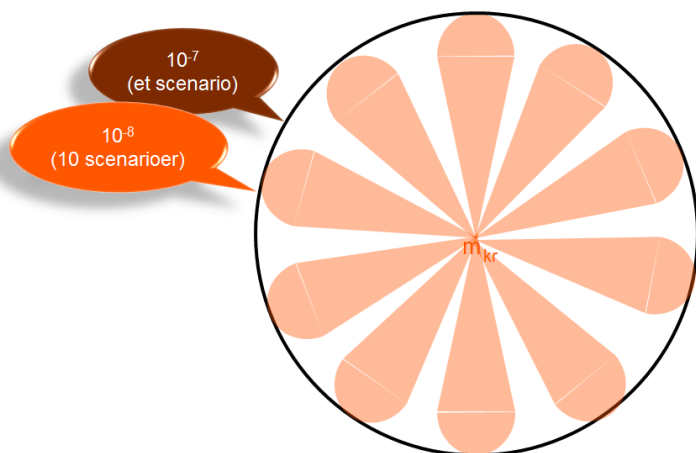
Antall retninger som vurderes, både lekkasjeretninger og vindretninger for et gitt lekkasjepunkt, har betydning for hvor risikokonturene vil ligge. Dette kan illustreres med følgende idealiserte eksempel for variasjon av lekkasjeretning (hvor vindforhold er idealisert til å alltid være vindstille):

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 3-1.



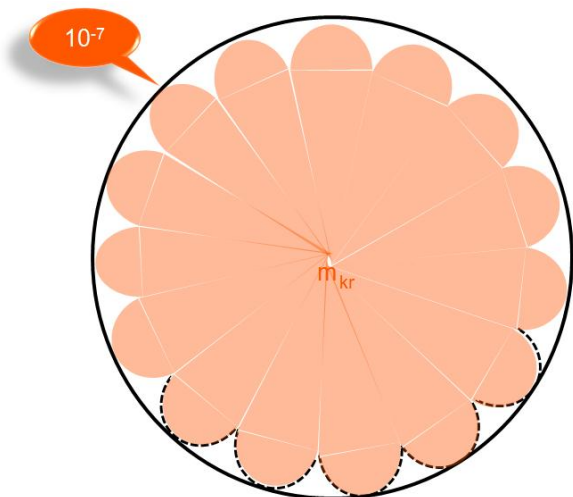
Figur 3-1 - Risikokontur fra å spenne en sirkel rundt et enkelt scenario med kritisk lekkasjerate (m_{kr}). Figuren indikerer at alle punkter innenfor sirkelen har lik frekvens for eksponering ($> 10^{-7}$ pr. år)

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 scenarioet som representerte alle 10 retningene i en retning. Den samme risikokonturen som i Figur 3-1 representerte et estimat på 10^{-7} vil nå representere et estimat på 10^{-8} , se Figur 3-2.



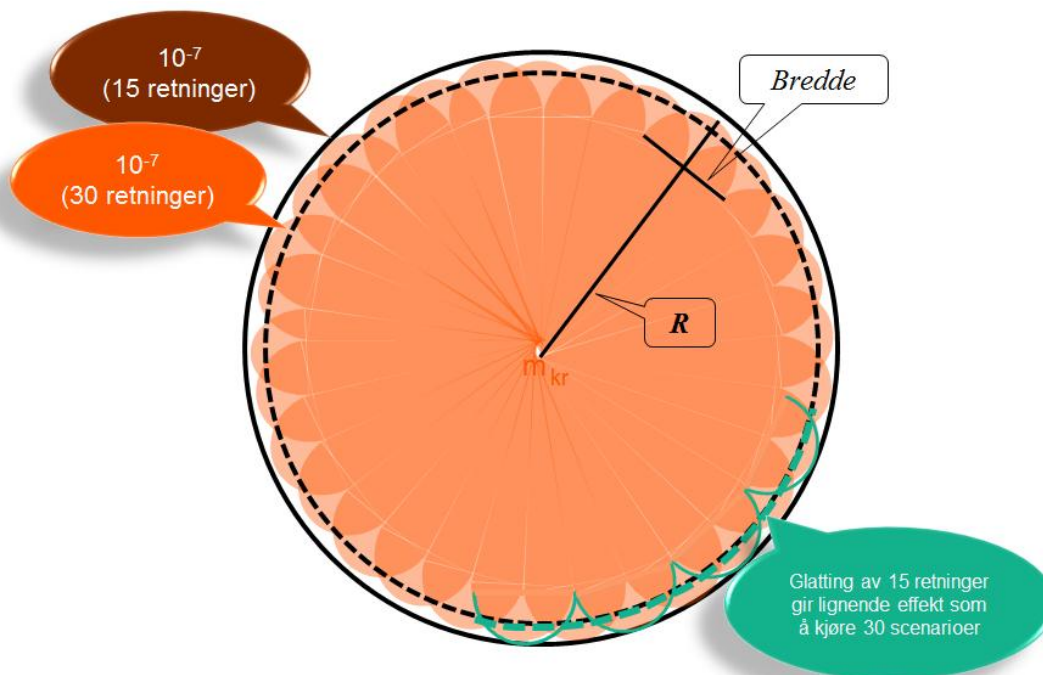
Figur 3-2 - Risikokontur fra å fordele kritisk rate på 10 like retninger. Figuren indikerer at alle punkter innenfor sirkelen har lik frekvens for eksponering ($> 10^{-8}$ pr. år)

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 overlappe 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 3-3 - 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 overlappe 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 3-4, men forskjellen er betydelig mindre enn det vi så tidligere (Figur 3-2) der man ikke hadde overlappende scenarioer. Vi ser nå at vi har fordelt kritisk rate på nok retninger til at isokurven begynner å konvergere.



Figur 3-4 - Risikokontur med frekvens 10^{-7} estimert med total 30 forskjellige lekkasjeretninger

Figur 3-4 viser at det er simulert nok scenarier når antall nødvendige retninger er proporsjonal med $Bredde/2\pi R$.

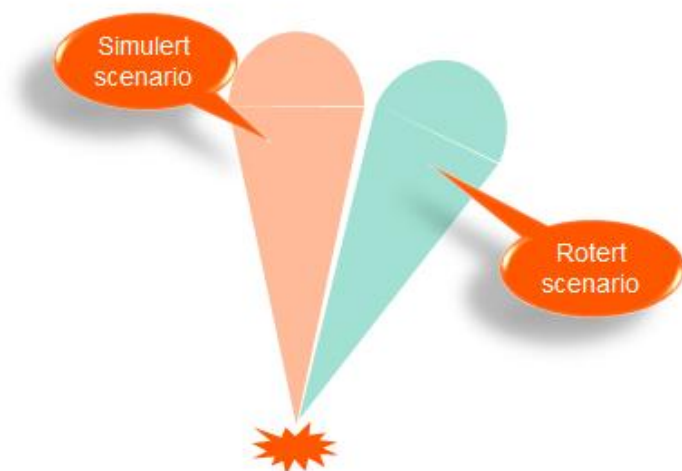
En risikokontur som er midlet eller glattet vil være mer representativ enn om man benytter den ytterste "taggen" i en taggete kontur.

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.

4 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 topphendelse, 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 4-1. 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.



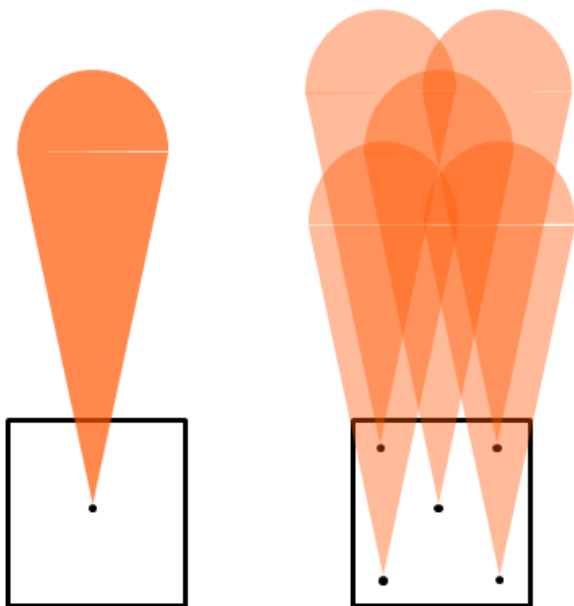
Figur 4-1 - Rotasjon av et simulert scenario for å vurdere et lignende scenario

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.

5 Antall lekkasjepunkter

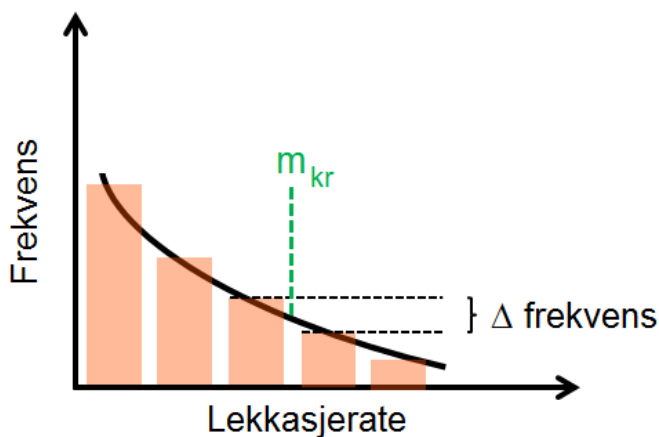
En lekkasje kan i prinsippet oppstå på svært mange steder i et prosessanlegg. I risikoanalysen må man velge et endelig antall scenarioer, og dermed også et endelig antall lekkasjepunkter, for å modellere "alt" som kan skje i et område. Antallet lekkasjepunkter man velger, vil kunne påvirke hvor de beregnede 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 5-1 (hvor prosessområdet er markert med en sort firkant).



Figur 5-1 - Effekten av å velge et lekkasjepunkt i forhold til 5 lekkasjepunkter i et område

6 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 6-1.



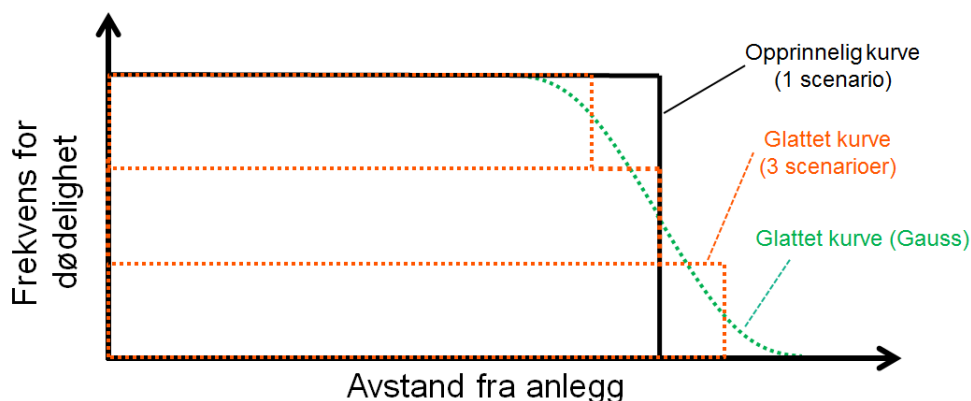
Figur 6-1 - Estimert feil i isokonturer er proporsjonal med forskjellen i frekvens mellom de ratene som ligger over og under den kritiske raten (betingelser at man vet kritisk rate før man kan vurdere feil). Simulerte rater er markert i oransje

7 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 scenarioer. Fra Figur 3-4 kan man se at en glatting av

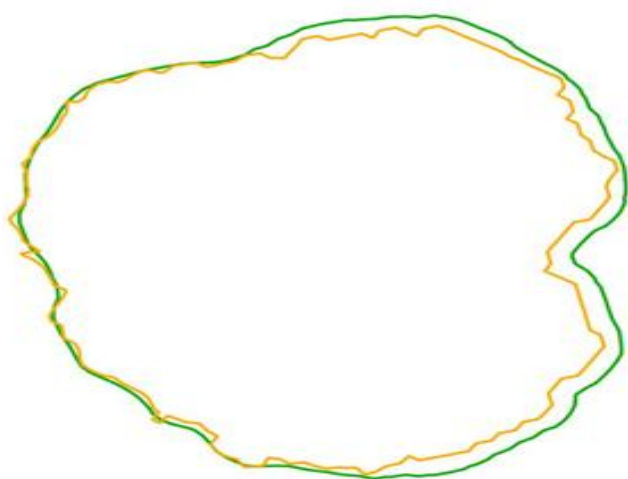
konturene må antas å gjøre disse mer forventningsrette, og det er derfor anbefalt å glatte kurver som er taggete uten at dette kan knyttes til anlegget.

Glatting av en taggete kurve har en tilsvarende effekt for resultatfeltet som å kjøre flere scenarioer med litt ulike inputparametere. I Figur 7-1 er dette illustrert ved å fordele frekvensen til et scenario over 3 ulike scenarioer 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 glattingen er bestemt av hvor mye de parameterne som bestemmer scenarioene varieres.

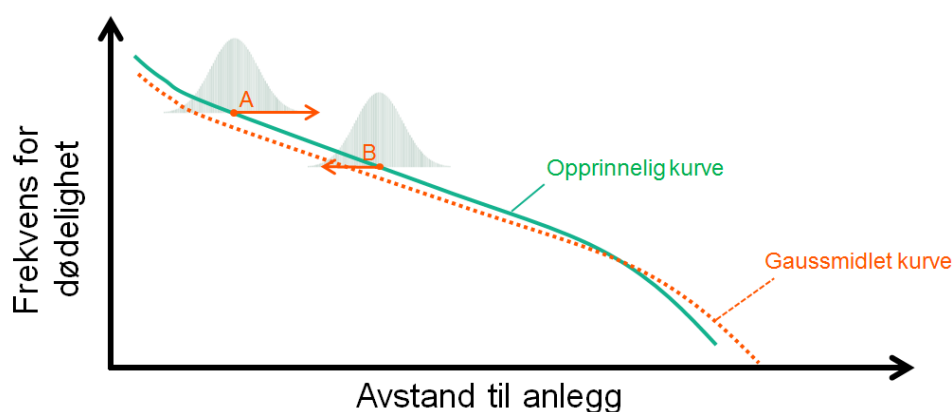


Figur 7-1 - Illustrasjon som viser at dersom man kjører kun et scenario som representerer all frekvens for dødelighet (hvor dødelighet er fastsatt ved terskelverdi, se hovedrapportens kapittel 4.2.1), så kan frekvensfeltet enten glattes ved å kjøre flere scenarioer (den oransje kurven viser den samme frekvensen fordelt over 3 litt ulike scenarioer) eller ved å benytte en normalfordelt glattefunksjon (Gaussglatting, se grønn kurve)

Figur 7-2 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 glatting 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 glatting 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 7-3. En Gauss glatting med standardavvik 1,0 – 4,0 vurderes å være akseptabelt for å ta bort små ujevnheter (tagger).



Figur 7-2 - Eksempel på risikokontur (oransje) som er glattet ved en normalfordelt (Gauss) glatting med standardavvik = 1,0 (grønn kurve)



Figur 7-3 - Illustrasjon som viser at en glattefunksjon vil flytte frekvens fra høye frekvensverdier mot lave frekvensverdier. Når frekvens flyttes gjennom normalfordelingen, vil flere scenarioer 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.

8 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).

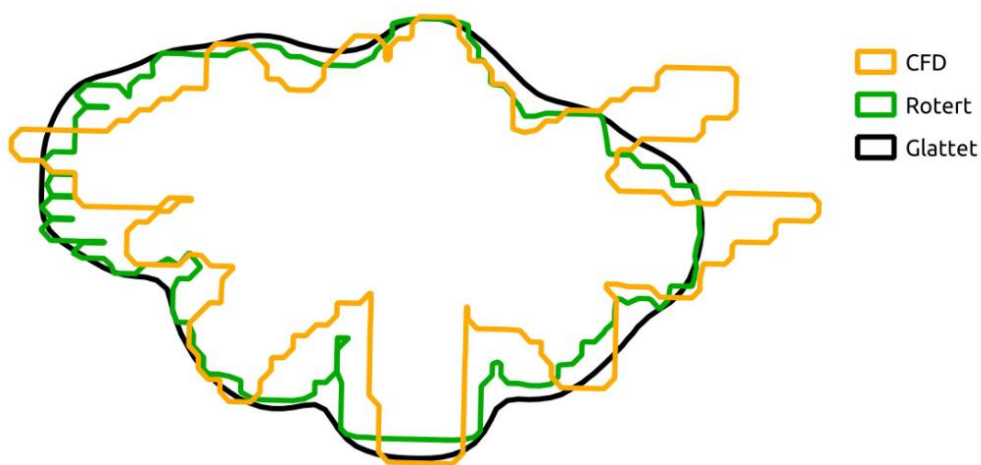
For å vurdere om det er kjørt tilstrekkelig med tilleggssimuleringer i målområdet vises det til prinsippene diskutert i hovedrapportens kapittel 3.9.

9 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 hovedrapportens kapittel 3.4.2.
- Dersom risikokonturene bærer tydelig preg av at for få scenarier er simulert (typisk ved at konturene har tagger/armar knyttet til de simulerte enkeltscenarioene), 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 strømning 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 7-2). 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 3-4.

Et eksempel på prosessen over er vist i Figur 9-1. 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. Lekkasje-frekvensen 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 9-1 - Eksempel på simulerte (CFD), vurderte (roterte) og glattede risikokurver

Appendix A - Early-phase mapping of the facility and guidewords for use in HAZID reviews

1 Tables for use in initial mapping of the facility

1.0	Purpose of the analysis	References
	Registration of new building, new establishment	
	Registration of changes to existing facility	
	Review of accident in facility or in neighbouring facility	
	Update of existing analysis and/or safety report, ref. Major Accident Regulations (Storulykkeforskriften) § 9	
	Changes in land use planning, the facility itself or neighbouring facility, the municipality	
	Special requirements from authorities	
	Other	

2.0	What kind of hazardous substances does the facility handle	References
	Pressurised substances	
	Flammable gas	
	Oxidising gas	
	Toxic gas	
	Flammable aerosol container	
	Water vapour or hot water under pressure	
	Flammable substance	
	Flammable liquid	
	Diesel and fuel oil	
	Heated liquid, heated to a temperature equal to or higher than the flash point	
	Flammable solid	
	Substance that develops flammable gas in contact with water	
	Self-igniting liquid	
	Self-igniting solid	
	Self-heating substance	
	Oxidising solid	
	Oxidising liquid	
	Self-reactive substance	
	Organic peroxide type	
	Reactive substance	
	Substance that develops toxic gas	
	Refrigerated toxic gas	
	Other	

3.0	Available documentation, degree of accuracy	References
	Plot plans or situation maps	
	Process description (block diagram)	
	Detailed piping and instrumentation diagram (P&ID), mass balance	
	Risk analysis	
	Nonconformities, report from supervision, best practice, experience transfer from the industry etc.	
	Other	

4.0	Stored quantities of hazardous substance	References
	Notifiable in accordance with Hazardous Substance Regulations (Forskrift om håndtering av farlig stoff)	
	Major Accident Regulations (Storulykkeforskriften) § 6, § 9	
	Other	

5.0	Handling of hazardous substances	References
	Loading/unloading via fixed pipes/hoses/loading arm	
	Loading/unloading from/to tanker/train/boat/car	
	Storage in atmospheric tanks/pressure vessels	
	Manufacturing/processing	
	Treatment/storage/temporary storage	
	Internal transport	
	Mixing/decanting/transfer	
	Emissions to ground, water, air	
	Other	

6.0	Surroundings - Where is the facility located	References
	Densely built-up area, city/village, area with/without harbour	
	Open landscape, scattered settlements with/without harbour	
	Hilly landscape, scattered settlements with/without harbour	
	Neighbours?	
	Particularly vulnerable objects: school, kindergarten, hospital, nursing home, community centre, sports facility	
	Hotel, accommodation, business, restaurants	
	External emergency preparedness, emergency services	
	Will unintentional/uncontrolled events that may occur in nearby facilities (industrial enterprises, etc.) pose a risk to the facility (domino effect)? - Are there potential sabotage/terror targets nearby?	
	Other	

7.0	Infrastructure near the facility	References
	Busy roads; private roads, county roads, highway etc.	
	Bus, train, tram, rail, ferry, airplane	
	Hiking trails, pedestrian and cycle paths	
	Power supply	
	Other	

8.0	Natural conditions close to the facility	References
	Vegetation; forest, avenue, dense forest, shrub	
	Are there terrain formations like steep cliffs, high mountain walls etc.	
	Exposed to floods, high tide, forest fires	
	Weather data available?	
	Other	

9.0	Emergency preparedness	References
	Does the loss of access to the following services cause inconvenience to the facility? - electricity, telecommunications services, water supply	
	Water supply? Does the area have an insufficient fire water supply (quantity and pressure)?	
	Access to external firefighters, response time, etc. Arrival route for fire truck?	
	Automatic fire extinguishing outside/inside, deluge system, water cannon, foam system, water curtain etc.	
	Fire alarm, gas alarm	
	Illegal sabotage and terrorist acts: is the facility itself a sabotage/terror target?	
	Industrial safety – basic requirements/enhanced	
	Other	

2 Guidewords for use in HAZID review

Table 2.1 Example of guidewords for use in HAZID

Category	Guideword
Loss of containment - leaks/spill or cross-contamination. Failure of process vessels (atmospheric and pressurised). Leak or rupture in heat exchanger pipes. Failure of process pipes.	• Hazardous chemicals (including hydrocarbons) • Other chemical hazards • Explosives • Unexpected reactions • Incompatible materials • Thermal uncontrolled reaction (runaway) • Air inlet • Corrosion • Erosion • Embrittlement (chemicals, low temperature) • External impact • Fatigue • Abnormal vibration • Mechanical impact • Overloading
High/low pressure High/low temperature	• Hot process/superheat • Steam • Condensate • Cold processes/cryogenics • Thermal combustion • Safety valves • Flares
Buildings	The effect of external hazards
Escalation	• BLEVE • Roll-over • Boil-over • Consequence of other events

Category	Guideword
	• Fire and gas detection, fire extinguishing equipment, water curtains etc. • Evacuation routes
Transportation	• Events with rail/railroad carriage • Dock/marine events • Vehicle traffic events • Tanker trucks
Mobile equipment	• Heavy machinery • Light-weight vehicles
Lifting equipment	• Falling/swinging load • Collapse of lifting equipment, cranes etc. • Rig failure
Security	• Terrorism • Arson • Sabotage • Civil unrest • Hacking • Burglary
Operation	• Simultaneous operations • Change of personnel • Hired personnel/temporary staff • Start/stop, maintenance and inspection • Emergency stop
Marine vessels	• Ship collision with dock • Loading/unloading • Emissions
Fabrication and installation	• Complexity • Modularisation • Transportation • Overseas production
Special mechanical or electrical items	• Excessive vibration • Rotating equipment (e.g. compressor failure) • Strong magnetic fields • Noise • Stored energy • Electric shock • High voltage/low voltage, electrical hazards • Static electrical hazards • Ionizing radiation • EX zones/equipment
Structural errors	• Earthquake • Foundation (subsidence, scour) • Corrosion

Category	Guideword
	• Fatigue • Weight control • Primary structure • Secondary constructions • Temporary constructions
Failure of auxiliary systems	• Cooling water • Fire in cooling tower • Cooling • Power • Steam • Air • Inert gases • Heating, ventilation and air conditioning system • Communication system • Fire extinguishing system • Internet • Wastewater removal/treatment • Vacuum • Clogged bunding
Nature and environment	• Seismic activity • Weather: ○ Strong wind ○ Flooding ○ Extreme cold or heat ○ High or low humidity, fog ○ Earthquake/tsunami ○ Hurricane/tornado ○ Lightning • Impact on equipment from marine environment • Subsidence/unstable terrain/soil and avalanches • Geological conditions for structural support
Organisation	• Procedures • Responsibility and authority • Culture and behavioural understanding • Training, competence • Planning • Communication • Emergency preparedness • Industrial safety • Officer on duty

Appendix B – Establishing risk curves

Table of contents

1	Introduction	3
2	Effect of number of scenarios.....	3
3	Effect of number of directions.....	5
4	Interpolation of simulated scenarios.....	7
5	Number of leak locations.....	8
6	Number of simulated leak rates.....	9
7	Smoothing of the risk contours.....	10
8	Refining risk contours in critical areas.....	11
9	Summary – risk contours.....	12

1 Introduction

This appendix is part of "Guidelines for quantitative risk analysis of facilities handling hazardous substances" and describes good principles for establishing best estimate risk contours.

2 Effect of number of scenarios

A risk analysis should be set up so that the risk contours represent a good estimate of "all" things that can happen – along with their probability (frequency). This means that regardless of what actually happens at a facility, the risk analysis should have considered a corresponding scenario.

In reality, there is an infinite number of different scenarios (end events) that can occur at a facility, and in practice the sample space for the top events must be discretised (ref. Chapter 3.2) such that an adequate number of variations of these top events are considered. This must be done by selecting a finite number of leak points, leak rates, leak directions, wind directions, and wind speeds. In addition, a limited number of ignition times and ignition points must be selected since all variations of this will have different consequences. This may lead to a very large number of different scenarios. As an example, assuming 100 leak points, 10 leak rates, 6 leak directions, 12 wind directions, 10 wind speeds, 10 ignition times, and 5 ignition points for each time, one will end up with 36 million scenarios, and it will therefore be necessary to distinguish between simulated and assessed scenarios.

By using symmetry considerations and simplified physical modifications to scenarios already simulated, one can significantly reduce the number of scenarios that actually need to be simulated. It is thus possible to assess a large number of scenarios based on a significantly reduced number of simulated scenarios.

If symmetry considerations are made to reduce the number of simulated scenarios, it is important to simultaneously assess the veracity of the physics in the scenarios, according to the principles discussed in Chapter 3.5.2 in the main report. It is thus possible to simulate some of the scenarios with empirical tools and others with CFD tools, depending on how much of the physics in the scenarios it is necessary to capture (and thus be able to calculate representative risk contours).

Even if the leak frequency distribution can be considered representative for the facility (see Chapter 3.4.2 in the main report) and the simulated scenarios have been performed with the correct simulation tool in accordance with the guidelines in Chapter 3.5.2 in the main report, it is still crucial that a sufficient number of events are considered such that the sample space is spanned with sufficient accuracy. This is necessary in order for the risk contours to be representative for the given facility and its surroundings. A risk analysis must therefore discuss whether the number of scenarios assessed is sufficient and to what extent the number affects the calculated risk contours.

A risk contour (e.g. a 10^{-7} contour) will have a high level of uncertainty if it is based on too few scenarios. One does not know whether this risk contour is conservative or non-conservative unless one knows whether the simulated scenarios are more or less severe than those surrounding the "actual" risk contour. The deviation between the calculated risk contour and the "actual" risk contour decreases with an increasing number of scenarios evaluated, see Figure 2-1. Note that even if one simulates many scenarios such that in practice "all possible" events are simulated, the uncertainty related to the frequency picture (how likely the different events are) does not disappear.

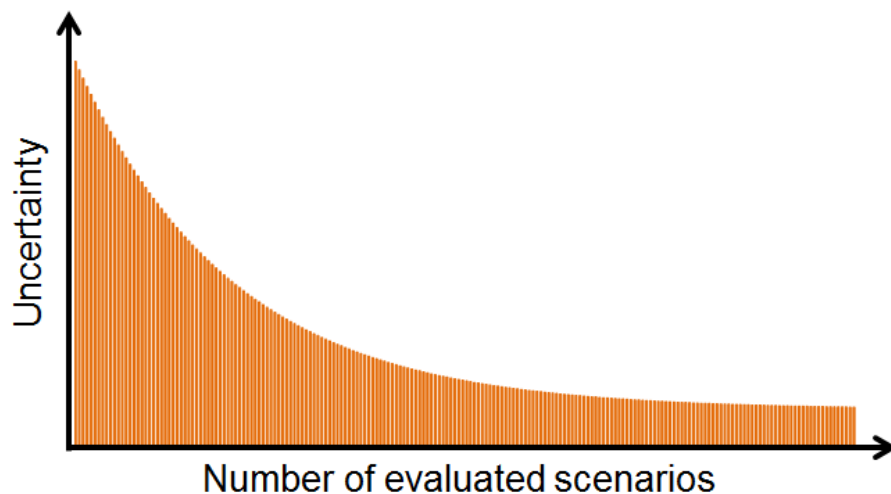


Figure 2-1 - Uncertainty as a function of the number of evaluated scenarios – illustration

The number of scenarios that must be considered in order to establish sufficiently accurate risk contours will vary for different facilities, depending on size and complexity. Similarly, the number of calculations required for the different consequence assessments (fire, dispersion, explosion) will also vary.

For example, in the top event of a fire in a bund, there will be no need to vary the number of release locations or use many large leak rates, and when using an empirical tool, it may be sufficient to use a few different wind speeds to span the sample space for the top event. When using CFD, however, there may be a greater need for, for example, assessing different wind directions.

For assessments of the top event of a gas explosion, there will normally be a need for a larger number of calculations, with different release rates, release directions, wind speeds and directions, and ignition locations and times. Because it is unrealistic to consider so many scenarios in detail, it may be necessary to minimise the effort on scenarios and scenario variations with little impact on risk. Examples of simplifications:

- For leak rates that do not produce cloud sizes that can generate significant explosion overpressure, there is no need to evaluate a range of wind directions and wind strengths. All of these scenarios can be represented by the calculation for calm wind.
- It may be necessary to simplify the analyses by decoupling the dispersion and explosion studies so that the dispersion study with subsequent transient ignition assessment provides the frequency of ignited cloud sizes (equivalent stoichiometric cloud methodology) and the explosion study provides explosion loads as a function of ignited cloud size.
- Let certain wind directions represent scenarios for wind directions that can be expected to provide similar flow fields within the area.

In this way, a case with a large number of scenarios can be reduced to a manageable amount, while at the same time it will be possible to simulate additional scenarios with the leak rates that contribute most to risk contours.

A risk analysis must analyse a sufficient number of possible scenarios for the results to be adequate. This means that the risk analysis must span a sufficient portion of the sample space for the risk contours to be representative for the analysed facility. Important factors that affect risk contours are highlighted below. Methods for processing the risk contours are also described.

3 Effect of number of directions

The number of directions considered, both leak directions and wind directions for a given leak point, has an impact on the location of the risk contours. This can be illustrated by the following idealised example of variation in leak direction (where wind conditions are idealised to always be calm):

If all possible leaks are sorted by leak size, one will be able to identify the leak rate for a given frequency, for example 10^{-7} per year (or less). If one simulates such a critical leak size (m_{kr}), one will get a result field with a given critical length and width of flammable (or toxic) concentration, see Figure 3-1.

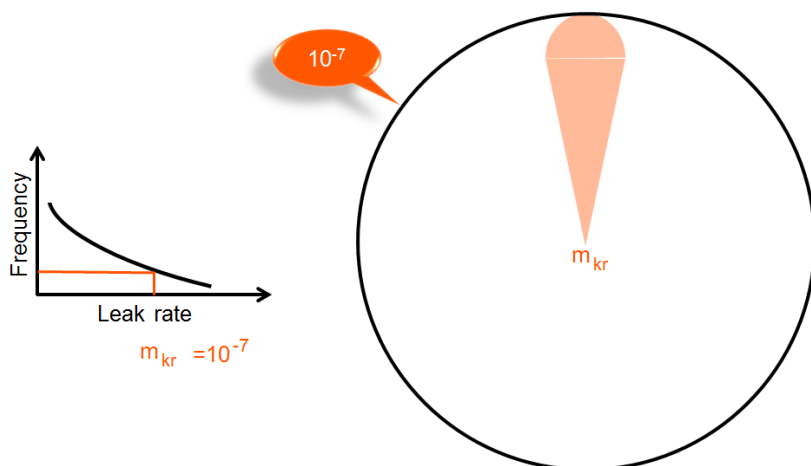


Figure 3-1 - Risk contour from drawing a circle around a single scenario with critical leak rate (m_{kr}). The figure indicates that all points within the circle have the same exposure frequency ($> 10^{-7}$ per year)

The critical leak rate can occur in several leak directions, and the frequency can therefore be distributed between each of these directions. If the critical rate, for example, is divided into 10 directions and the frequency is assumed distributed between these in equal direction intervals, each of these will represent 1/10 of the original frequency, i.e. 10^{-8} per year. If one now draws a risk contour by drawing a circle around the tips of these scenarios, one will get a different result. The scenarios have the same length and width as before, but they have a frequency that is 1/10 of the scenario that represented all 10 directions in one direction. The same risk contour that in Figure 3-1 represented an estimate of 10^{-7} will now represent an estimate of 10^{-8} , see Figure 3-2.

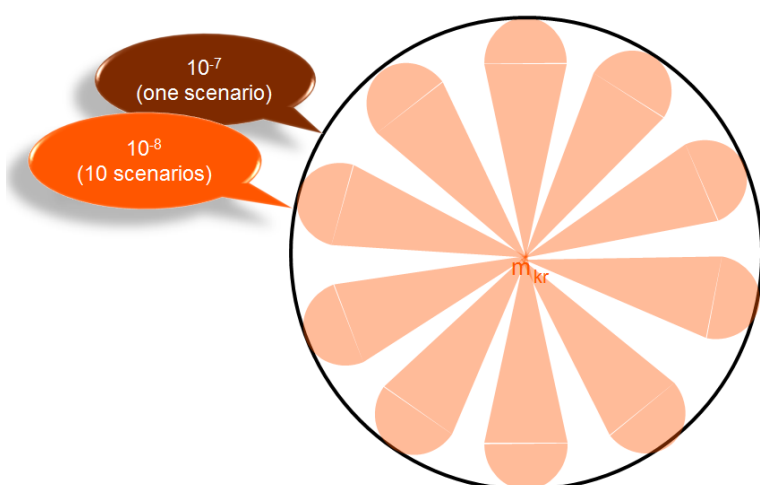


Figure 3-2 - Risk contours from distributing critical rate in 10 equal directions. The figure indicates that all points within the circle have the same exposure frequency ($>10^{-8}$ per year)

If one continues to distribute the critical scenario in even more directions, one will get an even lower frequency per scenario, but eventually the number of directions will become so large that the scenarios begin to overlap. Then one begins to see a convergence in the risk contour. This can be illustrated by an example where 15 directions just overlap, and one assumes that each of these has a frequency of 10^{-7} per year. This means that within the tangent curve, one will have an exposure of 10^{-7} at each point, and the tangent curve represents a 10^{-7} curve.

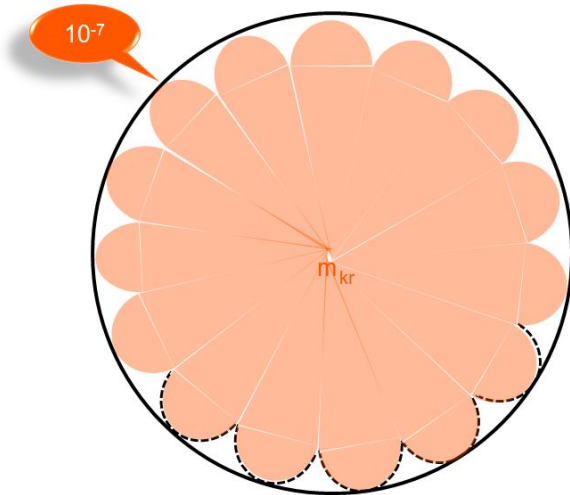


Figure 3-3 - Risk contour with frequency 10^{-7} estimated with a total of 15 different leak directions. Note that the isocontour is often defined as the edge along the scenarios (dashed line), but in this example illustrating the effect of considering multiple directions, the isocontour is defined as the circle that touches the extreme points of the scenarios

If one now doubles the number of assessed directions (to 30), the frequency for each of the scenarios will be halved, but they will start to overlap so that most of the field will still get an accumulated frequency of 10^{-7} per year in "all points". At the very edge of the field, it can be seen that the overlapping tips will have a slightly shorter extent than the non-overlapping tips, see Figure 3-4, but the difference is significantly smaller than what we saw earlier (Figure 3-2) where there were no overlapping scenarios. We now see that we have distributed the critical rate over enough directions for the isocurve to begin to converge.

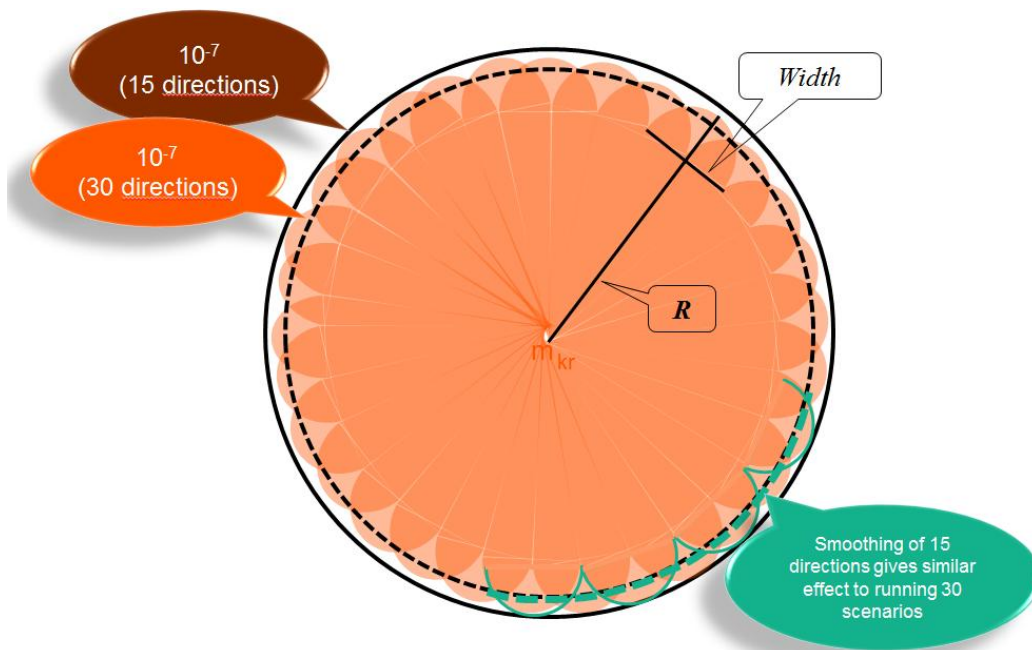


Figure 3-4 - Risk contour with frequency 10^{-7} estimated with a total of 30 different leak directions

Figure 3-4 shows that sufficient scenarios have been simulated when the number of necessary directions is proportional to $\text{Width}/2\pi R$.

A risk contour that is averaged or smoothed will be more representative than if the outermost "bumps" in a jagged contour are used.

In a real risk analysis, it will be possible to vary several factors (leak direction, wind direction) so that they smooth the field. In such cases, it will be the smoothness of the field, as well as interaction with dominant buildings or terrain, which indicates whether enough scenarios have been run.

From the figures above, it can also be concluded that using few scenarios may result in larger risk contours than using more scenarios.

4 Interpolation of simulated scenarios

If a number of scenarios have been simulated to capture the physics that is considered to be significant for the sample space of a top event, the consequences of scenarios that are relatively similar to those simulated can be estimated by using symmetry, rotation, and interpolation. The frequency must then be distributed across the total number of evaluated scenarios. Rotation can be used, for example, when it is expected that a small change in wind direction will give the same hazard distance, but in a slightly different direction. In such cases, the simulated result field can be rotated around the release point to evaluate an almost identical scenario, see Figure 4-1. The uncertainty of rotation increases the more you rotate, but some types of scenarios can be rotated considerably and still be considered to be the best estimate. An example of a scenario that can be rotated a lot and still be considered as the best estimate is evaporation from a bund located in a flat area without significant obstructions. Conversely, one could say that a scenario with a high-velocity release in an area where both wind and the jet's momentum are influenced by objects (buildings, terrain, etc.) cannot be rotated much before the physics becomes very different.

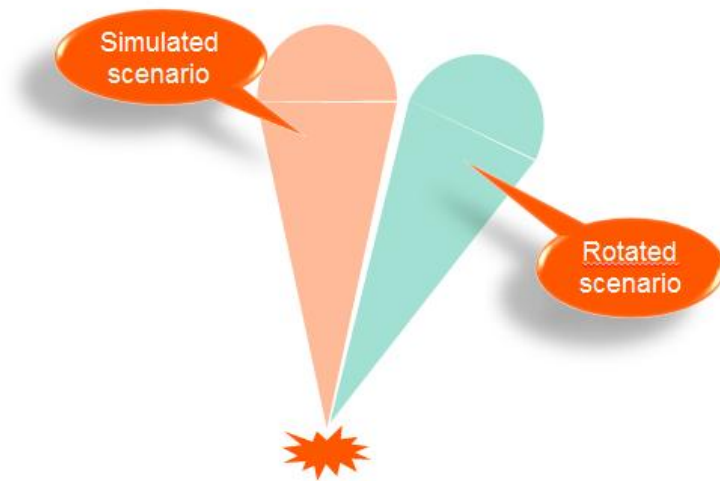


Figure 4-1 - Rotation of a simulated scenario to evaluate a similar scenario

Interpolation is another method that can be used to evaluate scenarios with slightly different leak rates or wind speeds than those simulated. In a “frozen cloud” type interpolation, the concentration in each control volume can be adjusted to evaluate what a scenario with a slightly different release rate might look like. For example, if the gas concentration in all control volumes in the result field is doubled, this may represent a release that is twice as large (double the mass rate) as the simulated one. The methodology is inaccurate and must be used with caution; it is not recommended to use this interpolation methodology for rates more than double or less than half of the simulated one.

Common to all types of interpolations and rotations is that one should not use this to evaluate scenarios that are very different from those simulated.

5 Number of leak locations

A leak can in principle occur at many locations in a process plant. In the risk analysis, a finite number of scenarios must be selected, and thus also a finite number of leak points, to model "everything" that can happen in an area. The number of leak points selected may affect where the calculated risk contours lie. However, the error made by selecting too few leak points can be estimated to be at most in the order of magnitude equal to the dimension of the process area, see Figure 5-1 (where the process area is marked with a black square).

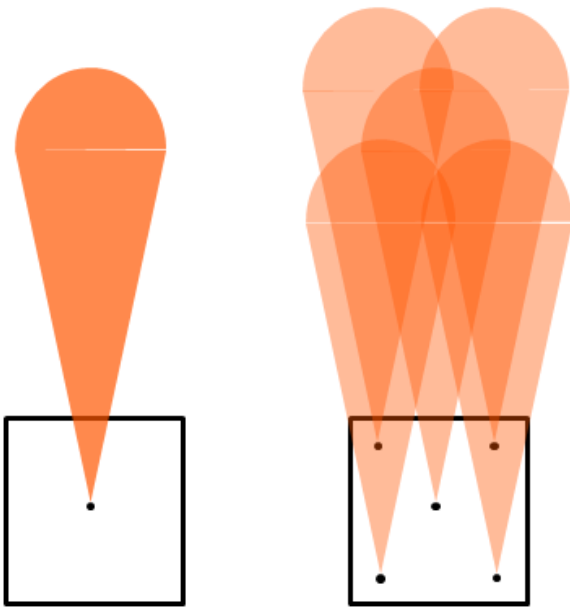


Figure 5-1 - The effect of selecting a leak point relative to 5 leak points in an area

6 Number of simulated leak rates

If the division of simulated rates is too coarse, the rates representing critical modelled leak (e.g. 10^{-7} frequency) could be either slightly too small or slightly too large in relation to the rates representing the actual critical rate. The risk contours will thus have a corresponding error in the frequency of the calculated risk contours. The error of these frequencies will, however, be limited to the difference in frequency of the rate representing the actual critical rate and the rate representing the calculated risk rate. This error is limited by the frequency difference between the simulated rate that is above and below the real critical rate, see Figure 6-1.

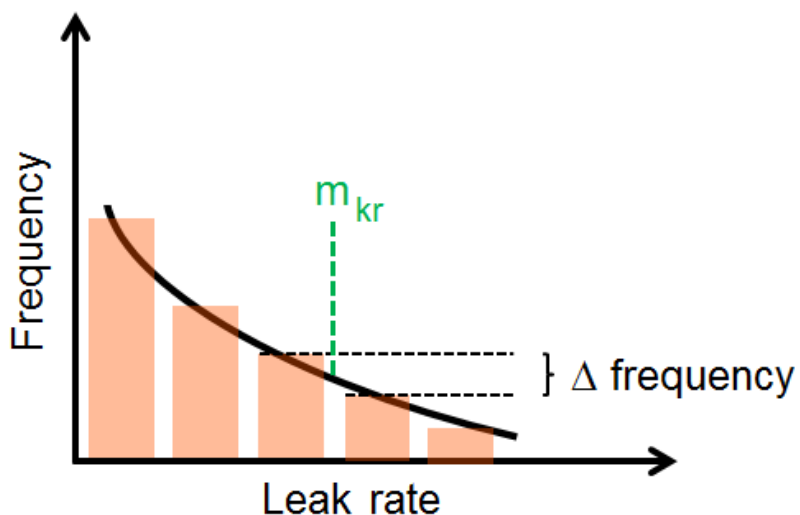


Figure 6-1 - Estimated error in isocontours is proportional to the difference in frequency between rates that are above and below the critical rate (requires that the critical rate is known before the error can be assessed). Simulated rates are marked in orange

7 Smoothing of the risk contours

If a calculated risk contour is jagged, without this being explained by specific conditions related to the facility, this is probably because the contours are based on too few scenarios. From Figure 3-4 it can be seen that smoothing of the contours must be assumed to make these a better estimate, and it is therefore recommended to smooth curves that are jagged without this being related to the facility.

Smoothing of a jagged contour has a similar effect on the result field as running multiple scenarios with slightly different input parameters. Figure 7-1 illustrates this by distributing the frequency of a scenario over 3 different scenarios with slightly different leak rates. This is compared with the effect of smoothing the single scenario using a normally distributed smoothing function. Note that the shape of the smoothed curve (green curve) is determined by the chosen standard deviation in the normally distributed smoothing function (Gaussian). The shape of the orange smoothing is determined by how much the parameters that determine the scenarios are varied.

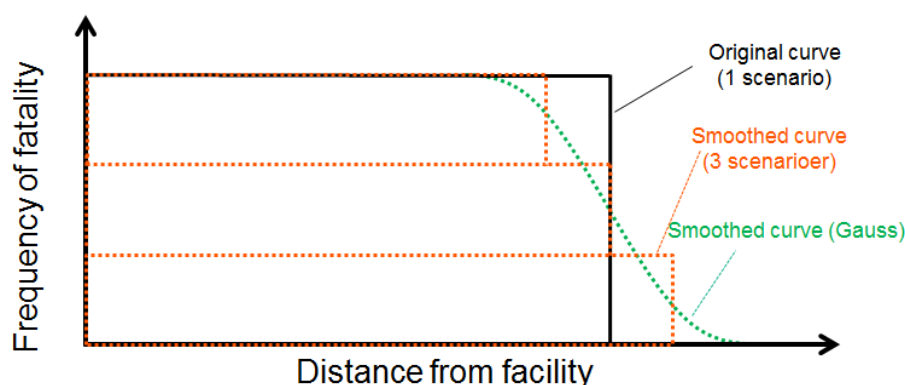


Figure 7-1 - Illustration showing that if one runs only a single scenario that represents all frequency of fatality (where fatality is determined by the threshold value, see Chapter 4.2.1 in the main report), then the frequency field can be smoothed either by running more scenarios (the orange curve shows the same frequency distributed over 3 slightly different scenarios) or by using a normally distributed smoothing function (Gaussian smoothing, see green curve)

Figure 7-2 shows a risk contour that is smoothed using a normally distributed smoothing function (Gaussian distribution with standard deviation 1.0). Such a smoothing function smooths the frequency field by adjusting each point based on the value of the surrounding points in all directions with a weighting according to the normal distribution based on the distance to the evaluated point. The standard deviation determines the weighting for each point in the adjustment as a function of the distance from the point being smoothed. The smoothed curve (green curve) follows the main trends of the risk contour but smooths out the small irregularities. Note that, even if such a smoothing will make the risk contours a better estimate in cases where the small irregularities (jags) cannot be linked to conditions at the analysed facility, such smoothing will also result in it moving frequency from the high frequency values towards the lower values (in practice, frequency is moved from the facility itself outwards in all directions), see Figure 7-3. A Gaussian smoothing with standard deviation between 1.0 and 4.0 is considered acceptable for removing small irregularities (tags).

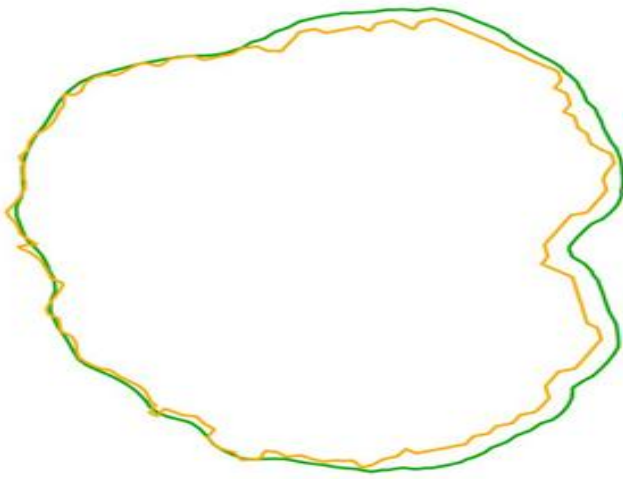


Figure 7-2 - Example of a risk contour (orange) that has been smoothed by a normally distributed (Gaussian) smoothing with standard deviation = 1.0 (green curve)

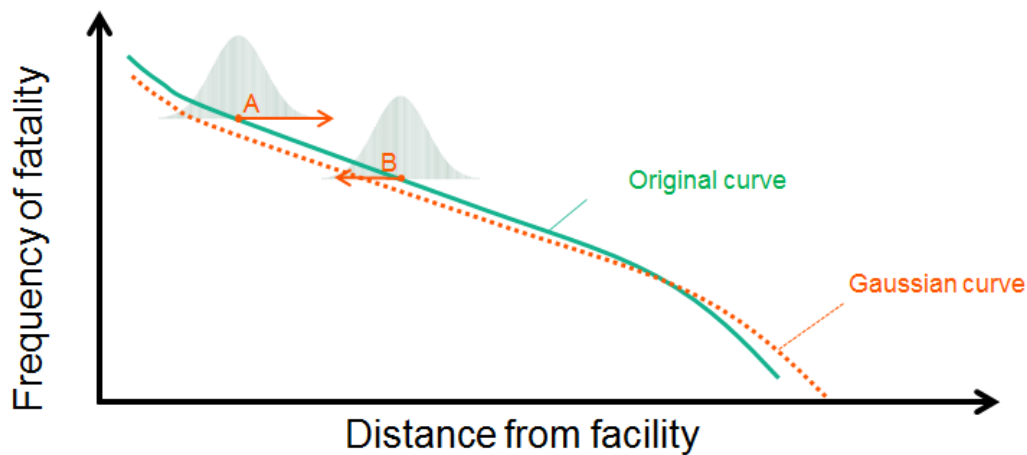


Figure 7-3 - Illustration showing that a smoothing function will move frequency from higher frequency values to lower frequency values. When frequency is moved through the normal distribution, more scenarios will move towards lower values (A) than to higher values (B) - simply because point A has a higher frequency

Also note that in real releases the wind conditions will usually be dynamic (constantly changing). This will affect how the release spreads and where flammable and toxic concentrations will occur. Dynamic wind conditions ("meandering") will normally not be used in the dispersion calculations performed in a risk analysis, even though this is partly included in the calibration of the simulation tools, and especially in the calibration of empirical tools. A smoothing of the result field could also be said to represent the same effects that would be achieved by using dynamic wind fields in the simulations.

8 Refining risk contours in critical areas

Risk contours can be more detailed in certain areas of particular interest. Through a refinement, the purpose is for the contours to become a better estimate in a given area, for example, an area where conflicts of interest are expected.

A risk contour can be refined in an area without affecting other areas by running additional simulations only where the scenarios expose the area one wishes to refine (target area).

To assess whether a sufficient number of additional simulations have been run in the target area, reference is made to the principles discussed in Chapter 3.10 of the main report.

9 Summary – risk contours

In order for the risk contours to be best estimate, the analysis must span a sufficient part of the sample space for the top events. The following three steps are recommended as a robust way to achieve best estimate risk contours:

- First, a sufficient number of simulations/calculations are run to capture the main physics in all relevant scenarios. This must be done with a number of individual scenarios, and it must be done with modelling tools that are capable of capturing relevant physics in the scenarios, see Chapter 3.5.2 in the main report.
- If the risk contours clearly indicate that too few scenarios have been simulated (typically because the contours are jagged, with “lumps” associated with individual scenario simulations), the simulated scenarios can be used to estimate scenarios that are considered to be sufficiently similar to those already simulated. Here, the concentration field will typically be rotated or manipulated to estimate similar scenarios to those simulated. Such interpolation/extrapolation will lose some of the physics in the simulated scenarios (for example, flow around large objects will not be captured correctly), but it will have the effect of smoothing the frequency of multiple events.
- If the risk contours still have small irregularities after the interpolation/extrapolation has been performed, the result field can be smoothed (e.g. with a Gaussian smoothing as shown in Figure 7-2). Such smoothing will not directly preserve the physics, but only represents a smoothing of the result field. Smoothing out small irregularities in the result field (which are not associated with conditions related to the facility) will make the risk contours a better estimate, see Figure 3-4.

An example of the process above is shown in Figure 9-1. The orange risk contour represents a given frequency based only on the CFD simulations of flammable gas. From the tags on the contour, it can be seen that too few wind directions have been simulated (12 directions are simulated – and you can count 12 tags on the curve). In the green curve, each CFD simulation is used to evaluate 3 additional scenarios with wind direction close to the simulated ones by rotating the simulated scenario around the leak point. The leak frequency of the simulated scenario is distributed over the 4 representative scenarios considered. Thus, a new risk contour can be created based on 48 directions instead of 12. The green risk curve represents the interpolated results. The green curve is smoother, and hence must be considered a better estimate than the orange curve. The black curve is obtained by smoothing the green curve (the smoothing is performed using a Gaussian smoothing with standard deviation 2.0). Note that it is not the green curve that is smoothed directly, but the entire 3D frequency field. However, when the entire 3D frequency field is smoothed, the isocontours for a given frequency move accordingly. The smoothed curve is expected to be a better estimate than both the orange curve (12 directions without smoothing) and the green curve (48 directions without smoothing).

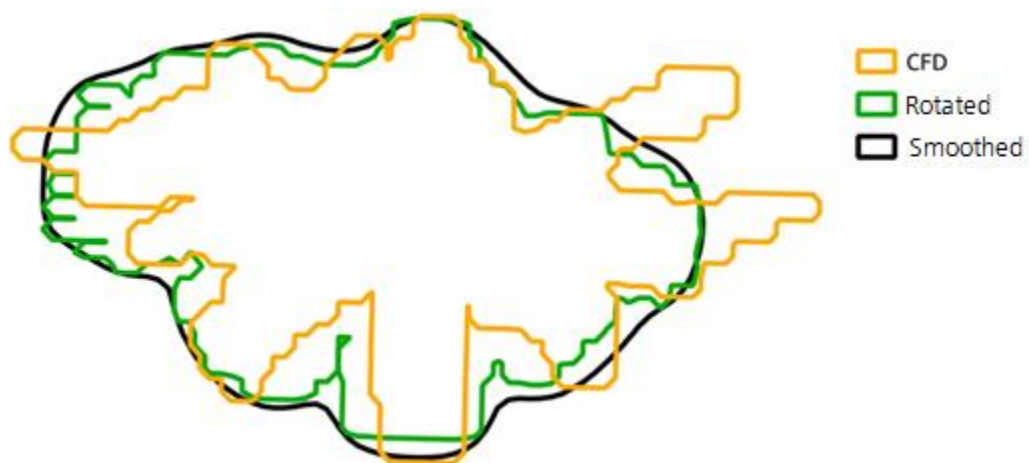


Figure 9-1 - Example of simulated (CFD), evaluated (rotated) and smoothed risk contours