

## RAPPORT

TITTEL:	<b>Hensynssoner for LNG-anlegg på Ranheim Paper and Board – Endelig rapport</b>	RAPPORT NR.:	R1714
FORFATTER(E):	Ingar Fossan Bjørn Erling Vembe	PROSJEKT NR.:	100484
ANSVARLIG:	Trond Evanger	GRADERING:	Fortrolig
OPPDRAGSGIVER:	Veidekke Eiendom AS	ELEK. ARKIVKODE:	HOLD
OPPDRAGSGIVERS REF.:	Finn Hvoslef / Kari Sollie	KVALITETSSIKRING:	Trond Evanger
		ANTALL SIDER:	47
		DATO:	16.05.2017

### SAMMENDRAG:

ComputIT har, på vegne av Veidekke Eiendom AS, beregnet risikobaserte hensynssoner omkring Ranheim Paper & Board som følge av hendelser knyttet til LNG-anlegg og kjeler. Kravet til hensynssoner er hjemlet i brann- og eksplosjonsvernloven. Formålet er å sørge for at arealplanlegging rundt virksomheter som håndterer farlig stoff tar hensyn til de potensielle konsekvensene ved ulykker på anlegget. Kriteriene for hensynssoner er beskrevet av DSB i dokumentet «Sikkerheten rundt anlegg som håndterer brannfarlige, reaksjonsfarlige, trykksatte og eksplosjonsfarlige stoffer. Kriterier for akseptabel risiko». Kriteriet sier at området utenfor anleggets eiendomsgrenser ikke skal utsettes for en uakseptabel konsekvens hyppigere enn 1 gang per million år, og fanger opp at risiko er et begrep som beskriver hyppigheten for en uønsket konsekvens. Dette er et svært lavt nivå som ivaretar at den risiko man utsettes for fra anlegget er lavere eller på nivå med andre aktiviteter en typisk norsk borger utsettes for i løpet av et livsløp. Nivået satt av kriteriet er imidlertid svært mye lavere sammenlignet direkte med den risiko man er eksponert for til daglig, for eksempel en dagligdags aktivitet som bilkjøring.

Analysen har fokusert på å beregne detaljerte hensynssoner resulterende fra ulykkesutslipp av LNG som genererer en brennbar blanding av omgivende luft og gass, og foreslå mulige risikoreduserende tiltak for å bringe risiko til et så lavt nivå som mulig. Studien har imidlertid også sett på potensielle konsekvenser ved antenning av en av de største mulige lekkasjene på anlegget, risiko knyttet til eksplosjoner som følge av lekkasjer inne i kjelhus samt tankbrudd (BLEVE).

En eksplosjon inne i kjelhuset vil kunne skje gjennom en lekkasje inne i huset som antennes en viss tid etter at lekkasjen startet. Det vil da kunne forplantes en trykkbølge som brer seg utover i nærliggende omgivelser. BLEVE kan dannes ved et tankbrudd som skyldes eskalering forårsaket av en initiell brann som eksponerer LNG-tanken.

Metodikk for beregning av hensynssoner er basert på verdensledende teknologi gjennom bruk av dataverktøyet Kameleon FireEx KFX<sup>®</sup>. Verktøyet tar hensyn til LNG sin oppførsel under de rådende

ADRESSE  
Postboks 1260 Sluppen  
7462 Trondheim

TELEFON  
73 89 59 00

FAKS  
73 89 59 01

E-POST  
computit@computit.no

FORETAKSREGISTERET  
NO 981 248 252 MVA

geometriske forhold gitt av anleggets design og omkringliggende omgivelser. Beregningene i analysene fokuserer på en fremtidig situasjon hvor tilstøtende områder omkring fabrikkområdet er bebygget. Dette for å kartlegge nødvendigheten av tiltak som gir sikkerhetsteknisk robusthet for den fremtidige arealbruken i området.

Resultatene viser at beregnet risikonivå er akseptabelt. Frekvens for eksponering av areal utenfor fabrikkområdet for uakseptable ulykkeslaster er godt innenfor kriterium definert av DSB. Selv om risiko er vist å være akseptabel, er det i henhold til god praksis identifisert forslag til tiltak som vil kunne redusere risiko knyttet til anlegget ytterligere.

Det er risiko knyttet til lekkasjer som skyldes brudd på rørføringer, koplinger eller ventiler som bør reduseres. Det er flere mulige tiltak som vil redusere risiko knyttet til disse hendelsene. Beregningene viser at geometriske hindringer har stor betydning for spredning av den tunge gassen langs bakken. Egenskapen til det fysiske fenomenet kan utnyttes til å installere en gasstett vegg som omslutter anlegget i en viss avstand fra selve utslippspunktene. I tillegg har studien demonstrert en stor effekt av å forbedre evnen til å detektere lekkasjer for deretter raskt å kunne stenge ned anlegget. På listen over mulige tiltak er også et system for påføring av vann. Det vil kunne ha en positiv effekt på gasspredning idet den vil tilføre gasskyen oppdrift gjennom å blande inn luft i gasskya, men vil også kunne ha en kombinert effekt som et brannvannsystem, og dermed redusere konsekvenser ved branner i anlegget.

## Innhold

<b>1</b>	<b>INNLEDNING</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>HENSIKT</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>METODEBESKRIVELSE</b> .....	<b>5</b>
3.1	RISIKOANALYSEMETODIKK .....	5
3.2	KAMELEON FIREX KFX <sup>®</sup> .....	7
<b>4</b>	<b>MODELL AV ANLEGGET</b> .....	<b>8</b>
4.1	GENERELT .....	8
4.2	PROSESS OG SIKKERHETSSYSTEM.....	8
4.3	BILDER FRA RESULTERENDE MODELL .....	11
<b>5</b>	<b>LEKKASJEBILDE</b> .....	<b>14</b>
5.1	INNLEDNING .....	14
5.2	MODELL FOR LEKKASJEFREKVENNS .....	14
5.3	TOTAL LEKKASJEFREKVENNS .....	15
5.4	RISIKODRIVENDE LEKKASJEPUNKT.....	20
<b>6</b>	<b>BESKRIVELSE GASSPREDNINGSBEREGNINGER</b> .....	<b>24</b>
<b>7</b>	<b>RISIKOBILDE</b> .....	<b>27</b>
7.1	METODE FOR BEREGNING AV ISORISK RISIKOKONTURER.....	27
7.2	HENSYNSSONER BRENNBAR GASS.....	29
7.3	EKSPONERING FOR STRÅLING FRA ANTENT STOR LNG-LEKKASJE .....	36
7.4	BLEVE .....	38
7.5	TRYKKBØLGE VED EKSPLOSJONER I KJELHUS.....	39
7.6	EKSPLOSJON SOM FØLGE AV ANTENT GASS I FRILUFT .....	44
<b>8</b>	<b>KONKLUSJON</b> .....	<b>45</b>
<b>9</b>	<b>RISIKOREDUSERENDE TILTAK</b> .....	<b>45</b>
<b>10</b>	<b>REFERANSER</b> .....	<b>47</b>

## 1 Innledning

Denne rapporten er utført av ComputIT på vegne av Veidekke Eiendom for å bestemme risikobaserte hensynssoner omkring Ranheim Paper & Board resulterende fra LNG anlegg inklusive fabrikkens tilførselslinjer til forbrukere på fabrikk.

Arbeidsomfang inkluderer detaljert beregning av hensynssoner for eksponering av brennbar konsentrasjon av LNG i henhold retningslinjer definert av DSB (Ref. /7/). Risikoeksponering som følge av antennelse av lekkasjer er også analysert, men gjennom en forenklet metodikk funnet tilstrekkelig for formålet. Det er gjennomført én beregning av en antent stor lekkasje for å kartlegge eksponering av omgivelsene utenfor anlegget for stråling. Beregningen viser at kritisk eksponering utenfor anlegget kan sees bort fra. Forplantning av trykkbølge i omgivelsene som følge av eksplosjoner i kjelhus er analysert ved å gjennomføre én beregning av et verst tenkelig eksplosjonsscenario. Konsekvensen generert ved dette scenarioet er også funnet akseptabel i forhold til eksponering av 3. part. Til sist er det utført en kvalitativ vurdering av en BLEVE(Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion).

Metodikk for beregning av hensynssoner, samt konsekvensberegninger av brann og eksplosjon, er utført på basis av simuleringer med vårt ledende CFD verktøy Kameleon FireEx KFX<sup>®</sup>. Verktøyet tar hensyn til fenomenet (gasspredning, brann og eksplosjon) sin oppførsel under de rådende geometriske forhold gitt av anleggets design og omkringliggende omgivelser.

## 2 Hensikt

Hensikten med studien er å beregne hensynssoner omkring LNG-anlegg inklusive tilførselslinjer med gass til forbrukere på Ranheim Paper & Board, og foreslå mulige risikoreduserende tiltak for å bringe 3. part risiko knyttet til anlegget til et så lavt nivå som mulig.

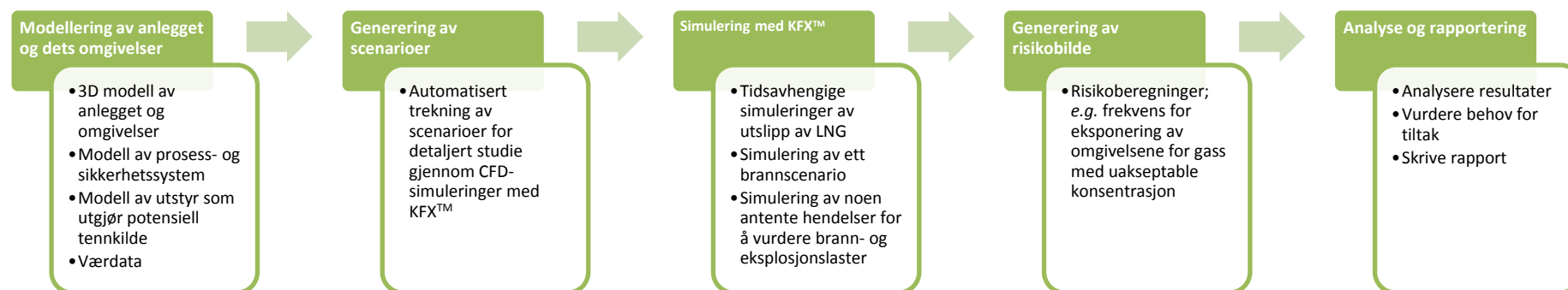
## 3 Metodebeskrivelse

### 3.1 Risikoanalysemetodikk

Metodikk for analyse av risiko er sentrert rundt simulering av konsekvenser i faktiske geometriske omgivelser ved bruk av vårt ledende CFD verktøy Kameleon FireEx KFX<sup>®</sup> (beskrevet i etterfølgende avsnitt). Egenskapene til anlegget og dets omgivelser modelleres i 3D, som gjør at vi kan ta hensyn til objektenes interaksjon med de fysiske fenomenene som utspiller seg ved et utslipp, inkludert en eventuell antennelse. Med egenskaper menes ikke bare den fysiske obstruksjonen som de ulike objektene utgjør, men også objektenes egenskaper som bidragsyttere til sannsynligheten for at de potensielle initielle hendelsene skal oppstå, samt objektets eventuelle påvirkning på utfallet av de ulike potensielle hendelsene. For LNG-anlegget er den typiske initielle hendelsen et utslipp av brennbar gass eller flytende LNG. Det etableres følgelig en fullintegrert modell av anlegget som danner et helhetlig utgangspunkt for å estimere risikobildet knyttet til anlegget. Tradisjonell risikoanalysemetodikk er typisk basert på en risikomodell hvor risikoberegningene utføres utenfor verktøyet som benyttes for å estimere konsekvensene, eller alternativt i verktøy hvor beregningen av konsekvensene er forenklet (betydning av geometriske objekter for strømningsforhold er i begrenset grad reflektert).

Modulen i Kameleon FireEx KFX<sup>®</sup> som benyttes for å bygge modellen og gjennomføre risikoberegningene heter KFX<sup>™</sup>-RBM (KFX<sup>™</sup> - Risk & Barrier Management). KFX<sup>™</sup>-RBM genererer et unikt grunnlag for å forstå samspill mellom initierende hendelse og barrierer som påvirker utviklingen av scenarioet. Modellen representerer ledende teknologi for risikoberegning, men kanskje vel så viktig er evnen verktøyet har til å kommunisere komplekse fysiske prosesser og risiko på en effektiv måte gjennom visualisering av risiko i den faktiske geometrien for anlegget/systemet. Det gir beslutningstaker nødvendig kunnskapsstyrke til å forstå hvordan risiko kan reduseres gjennom tiltak på mest mulig effektiv måte.

De overordnede trinnene i analysemetodikken for LNG-anlegget inklusive forbrukslinjer er beskrevet i Figur 1.



Figur 1: Overordnede trinn i analysemetodikk

### 3.2 Kameleon FireEx KFX<sup>®</sup>

KFX<sup>™</sup> er en 3-dimensjonal transient CFD (Computational Fluid Dynamics) programkode. Den er spesielt tilpasset beregning av strømning og varmetransport i fluider med kjemiske reaksjoner. Dette inkluderer også full termodynamikk og forbrenning. KFX<sup>™</sup> er utviklet ved NTNU/SINTEF/ComputIT (Computational Industry Technologies AS) og har i stor utstrekning blitt benyttet i brann- og gasspredningsanalyser for offshoreinstallasjoner, skip og rigger i nesten 30 år. I dag benyttes KFX<sup>™</sup> i et stort antall industrielle analyser over hele verden. I de senere årene har KFX<sup>™</sup> i økende grad blitt brukt i brann- og ventilasjonsanalyser av tunnelsystemer for vei og bane.

For analyser av gasseksplosjoner i 3-dimensjonale, komplekse geometrier benyttes den internasjonalt anerkjente eksplosjonssimulatoren EXSIM, som er en integrert del av KFX<sup>™</sup>-beregningsteknologien. EXSIM er utviklet ved Høgskolen i Telemark/Tel-Tek/Aalborg Universitet/Universitetet i Stavanger i tett samarbeid med Shell og er benyttet i industrielle eksplosjonsanalyser siden 1989.

KFX<sup>™</sup> er i dag verdens ledende simuleringsverktøy for brann og eksplosjoner, samt spredning av gasser, eksos, partikler og lignende i forhold til arbeidsmiljø i olje- og gassindustrien, spesielt innenfor offshore sektor.

I tillegg til simulering av spredning av olje, LNG, gass, samt simulering av brann og eksplosjoner, omfatter teknologien også simultan simulering av innvirkningen på brannforløp fra vannsystemer som deluge, sprinkler, vanntåke osv, for å analysere og dimensjonere brannslukkesystemer basert på vann. Videre er det direkte koplet mot strukturreponskoden Usfos for beregning av respons i bærende strukturer fra brann- og eksplosjonslaster.

Verktøyet har bidratt til en markant heving av sikkerhetsnivået gjennom forbedret design og konstruksjon både med hensyn på personellsikkerhet, for eksempel rømning og arbeidsforhold, sikring av verdier, og ikke minst forbedrede risikoanalyser. I tillegg er det dokumentert store kostnadsreduksjoner ved bruk av denne teknologien, samtidig som altså sikkerhetsnivået økes og miljøet forbedres.

Teknologien i seg selv er helt generisk og ikke knyttet til offshoreinstallasjoner i seg selv. Verktøyene er også i stor grad blitt benyttet innen for samferdselssektoren, spesielt tunneler for vei og bane, inkludert undergrunnsanlegg som tog- og metrostasjoner.

Geotrimodelleringen i KFX<sup>™</sup> er basert på import av CAD-modeller, der geometrier i CAD-modellen konverteres automatisk til faste konstruksjoner eller flate-/volum-porøsiteter i KFX<sup>™</sup>. Porøsiteter blir automatisk beregnet for objekter som er mindre enn maskevidden på beregningsnettverket. Porøsitet er svært nyttig for beregning av strømning i områder med høy grad av detaljering i konstruksjonen, uten at detaljene trenger å bli fullt ut reflektert i kontrollvolumene. Dette bidrar til å gjøre koden så anvendbar for praktiske problemstillinger.

KFX<sup>™</sup> har også muligheten til å importere elektroniske kart over terreng, bygninger, moduler og prosessanlegg fra flere ulike CAD -systemer.

For komplekse tunnel løsninger kan KFX<sup>™</sup> også kombinere tre-dimensjonale beregninger med en-dimensjonale beregninger. For lange tunneler er dette svært gunstig og effektiviserende. Å regne tredimensjonalt på tunneler som er mer enn 10 km anses som meget krevende. Dette kan forenkles ved at man beregner tre-dimensjonalt der strømningsfeltet har tre-dimensjonale effekter og går over til en-dimensjonale beregninger der strømningsfeltet blir ensrettet.

KFX™ er omfattende validert på mange ulike nivå, både mot laboratorieeksperimenter og mot realistiske fullskalaforsøk.

En egen modul for beregning av risiko, f.eks. hensynssoner og risikokonturer i henhold til DSB sitt regelverk, er implementert i KFX™, navngitt som Kameleon FireEx® Risk & Barrier Management. KFX™-RBM generer et unikt grunnlag for å forstå samspill mellom initierende hendelse og barrierer som påvirker utviklingen av scenarioet. Modellen representerer ledende teknologi for risikoberegning, men kanskje vel så viktig er evnen verktøyet har til å kommunisere komplekse fysiske prosesser og risiko på en effektiv måte gjennom visualisering av risiko i den faktiske geometrien for anlegget/systemet. Det gir beslutningstaker nødvendig kunnskapsstyrke til å forstå hvordan risiko kan reduseres gjennom tiltak på mest mulig effektiv måte.

KFX™ er utviklet i samarbeid med bl.a. Statoil, Total, ENI, ConocoPhillips, Gassco, Engie, Norges Forskningsråd, og Sandia National Laboratories, USA.

## 4 Modell av anlegget

### 4.1 Generelt

Det er etablert en fullintegret 3D modell i KFX™-RBM som inkluderer:

- Alle relevante geometriske objekter. Med relevant menes objekter som basert på erfaring har signifikant betydning for strømningsforhold
- Topografi
- Prosesssystem med ventiler, flenser, instrumenter, tanker og rørføringer
- Detektorer
- Potensielle tennkilder
- Statistiske data over vindforhold for Vold værstasjon i Trondheim

### 4.2 Prosess og sikkerhetssystem

Modell av prosesssystemet er basert på P&ID vist i Figur 2.

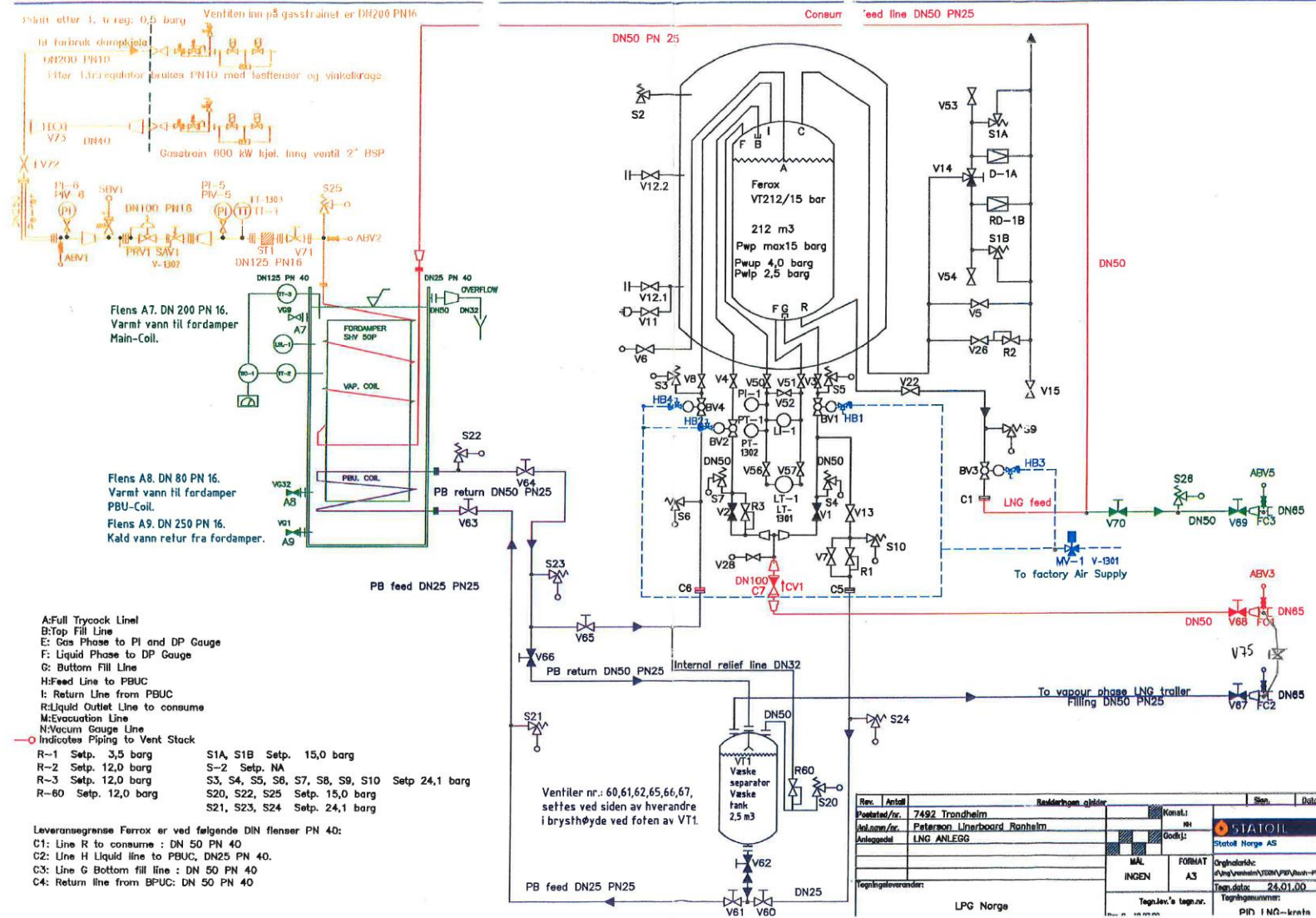
Følgende beskriver sentrale egenskaper knyttet til modellen av anlegget:

- 1) Væskeseparator (VT212) er ikke bruk. Ventil V62 og ventil V66 er antatt å være i stengt posisjon
- 2) Stengventilene BV1, BV2 og BV3 står i normalt åpent posisjon og lukker ved
  - a. brudd på tilførselssystem for ventilens aktuator (f.eks. avbrenning på grunn av brann)
  - b. aktivering av nødstoppp knapp for anlegget. Det vil i hovedsak være fyrbøter under hendelser ved daglig drift eller sjåfør av tankbil ved hendelser under lasting som forventes å initiere nødstoppp. Aktivering av nødstoppp betinger deteksjon, enten manuelt, alarm gitt av de 3 temperaturdetektorer beliggende i fangdam under LNG lagertank eller 2 stk. IR gassdetektorer lokalisert inne i kjelhus. I analysen er det benyttet en modell som reflekterer varierende sannsynlighet for suksessfull lukking av stengeventilene som funksjon av tid fra start av lekkasjen. Modellen er ytterligere



beskrevet i avsnitt 7.2.

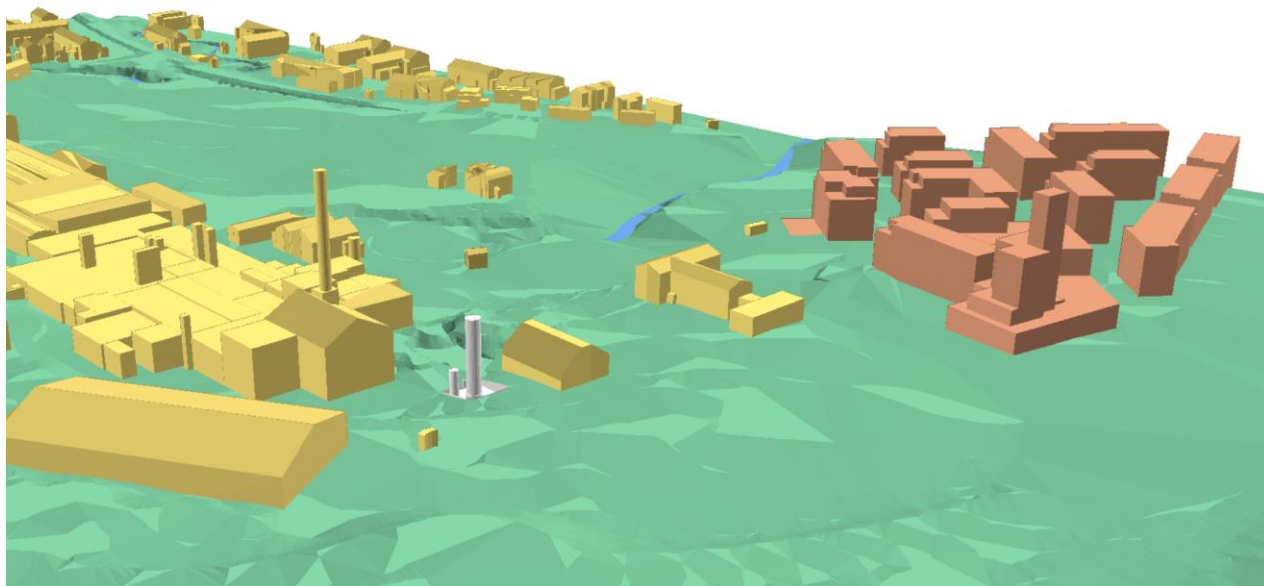
- 3) Ventilene oppstrøms ventilene V1 og V2 er kun trykksatt under lasting
- 4) Antall lasteoperasjoner er satt til i gjennomsnitt å være 50 per år.
- 5) Utstyr beliggende i fangdam er sertifisert for bruk i klassifisert sone i henhold til ATEX-direktiv. Utstyr utenfor fangdammen er ikke Ex-sikkert.
- 6) Driftstrykk for tanken er satt til 5 bara.
- 7) Sammensetning til LNG er antatt å være 91 vol% metan, 8 vol% etan og 1 vol% propan
- 8) Tetthet og temperatur i tanken er estimert til henholdsvis 448 kg/m<sup>3</sup> og -130°C for gitt trykk og sammensetning
- 9) Det er lagt inn potensielle tennkilder i modellen i henhold til MISOF (Ref. /4/). Tennkilder er lagt inn på en slik måte at tennsannsynligheten vil bli høy ved eksponering av brennbar gass utenfor anleggets område, hvor det er ikke er kontroll på tennkilder. Potensielle tennkilder på utsiden er typisk kjøretøy (tennsannsynlighet gitt eksponering av gass er 90%) og elektrisk utstyr (for eksempel veibelysning og elektrisk utstyr på utsiden av boligenheter). Det er for eksempel lysarmatur langs omkringliggende veier inne på anlegget som ikke er Ex-sikker. Inne i kjelhuset er kjelene en vesentlig tennkilde i tillegg til elektrisk utstyr som ikke er Ex-sikkert (kun utstyr i nærheten av utstyr som fører gass er Ex-sikkert)



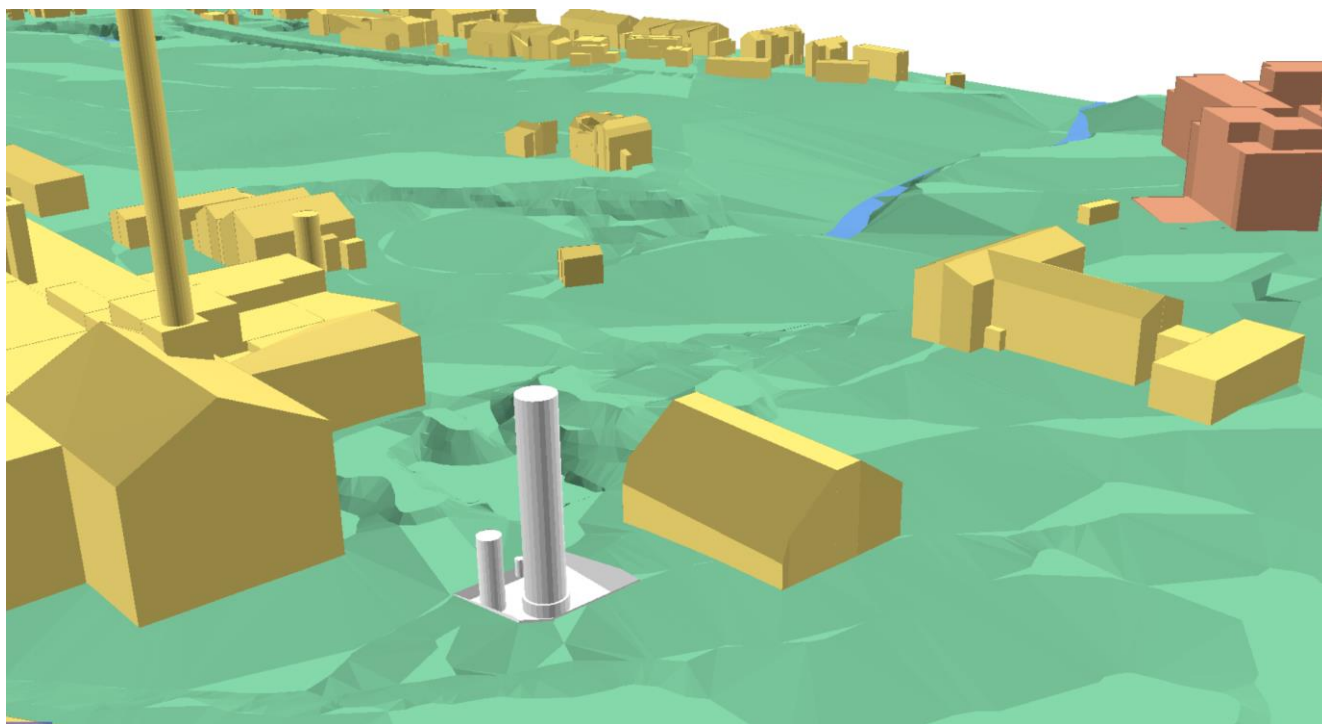
Figur 2: P&ID LNG anlegg Ranheim P&B

### 4.3 Bilder fra resulterende modell

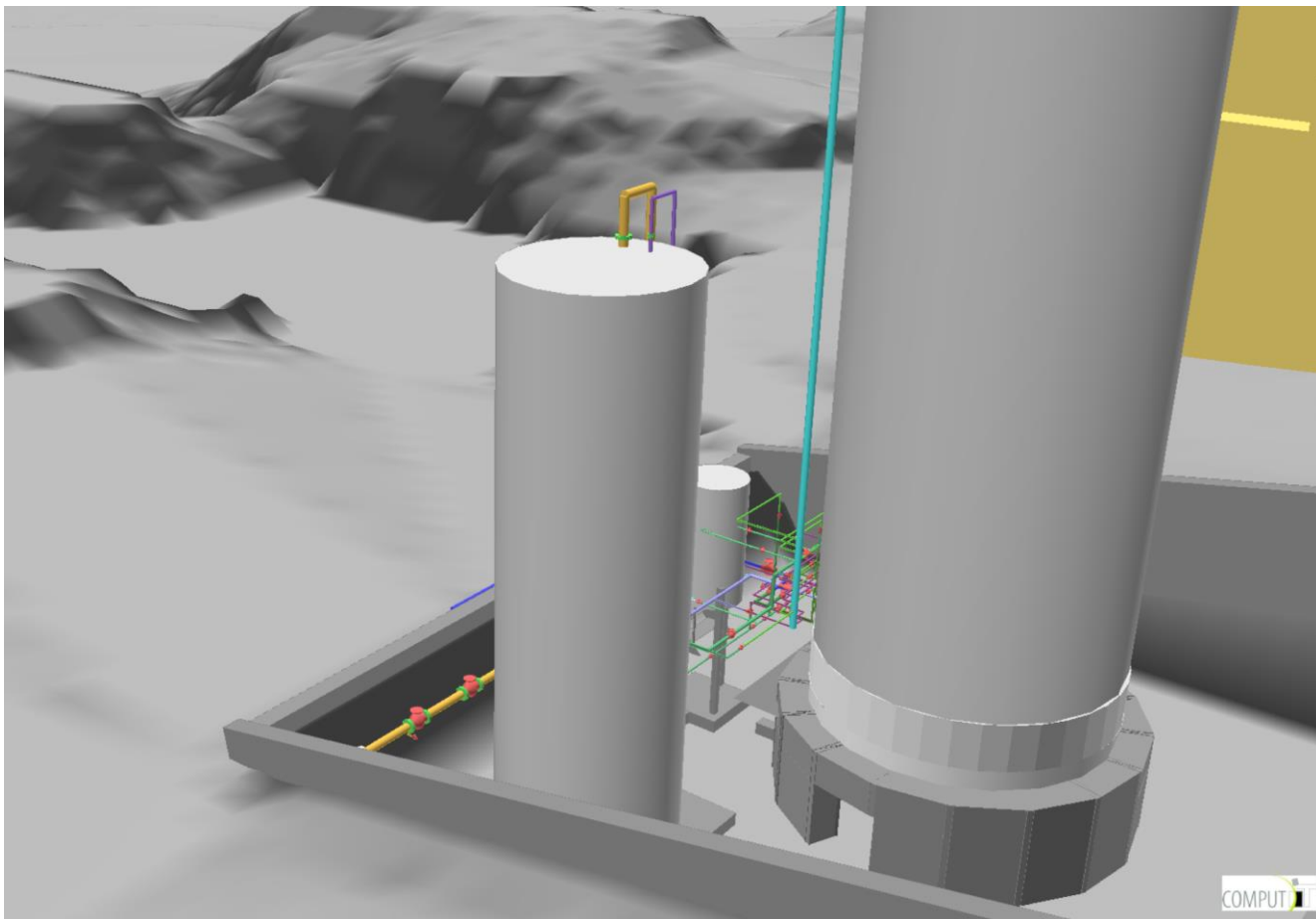
Noen bilder fra resulterende modell er vist i etterfølgende figurer. Det er viktig å påpeke at det vil være små avvik knyttet til modell for rørføringer i fangdam. Rørføringene er modellert manuelt i KFX™-RBM basert på befarings og fotografier av anlegget. Dissene avvikene har ingen betydning for modellen.



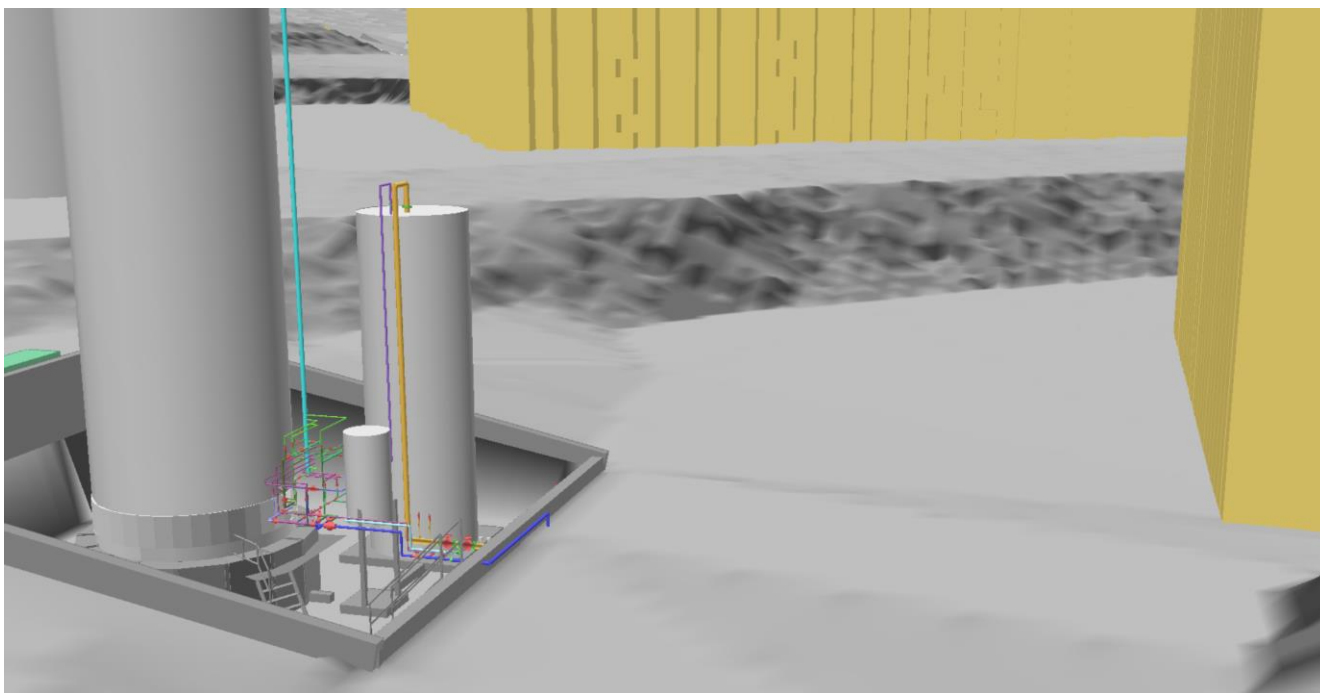
Figur 3: Deler av Ranheim P&B sett fra sørøst med fremtidige bygninger til høyre



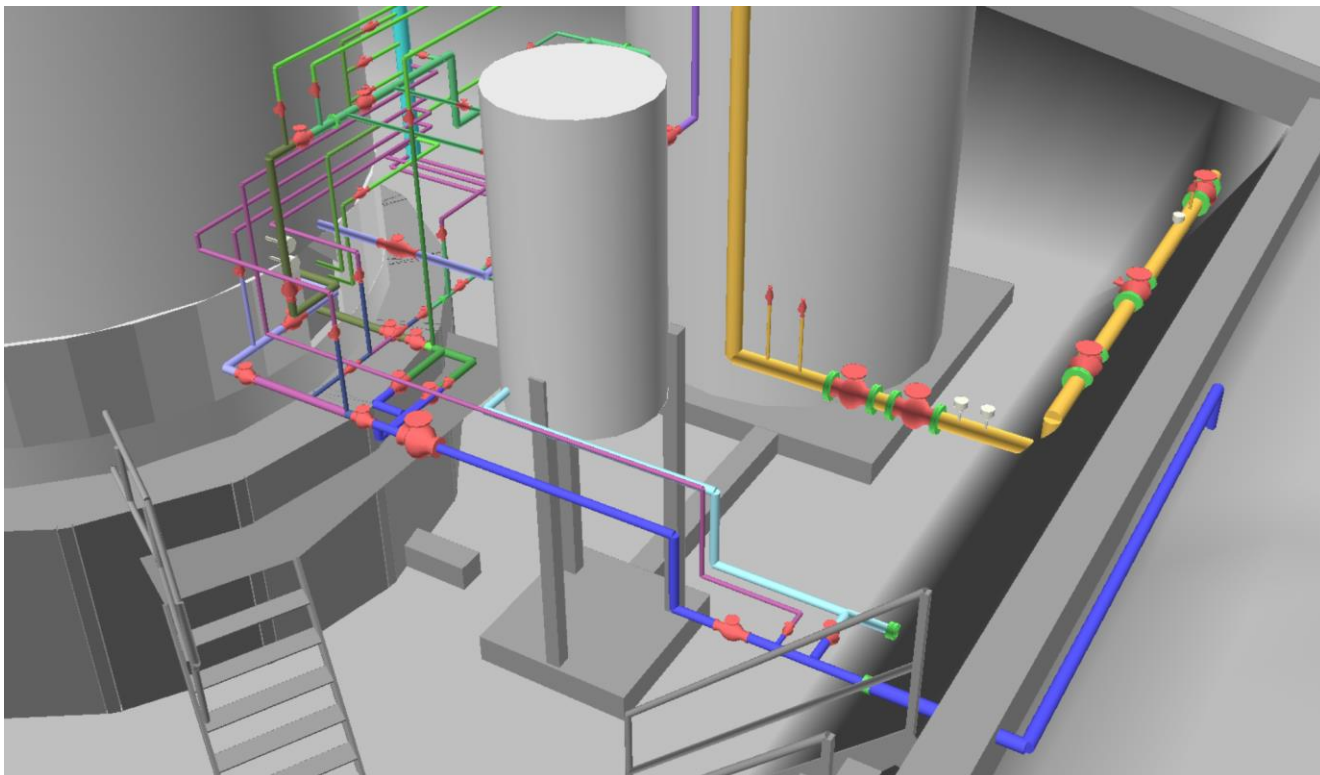
Figur 4: LNG-anlegg sett fra sørøst. Kjelhus til venstre.



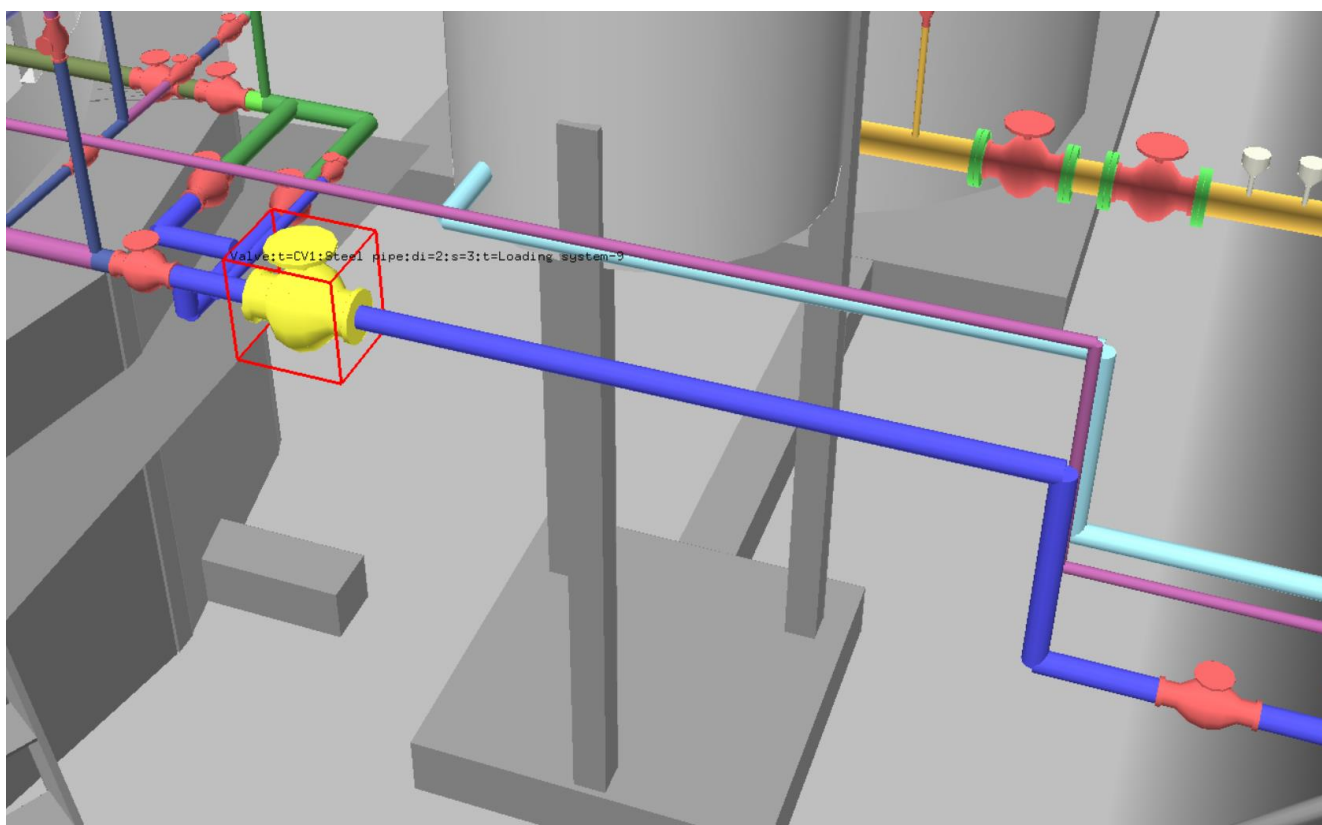
**Figur 5:** LNG-anlegg sett fra sør: nærbilde av fangdam, LNG lagertank (V212), fordamper og væskeseparator (VT1).



**Figur 6:** LNG-anlegg sett fra nord: lastesone, fangdam, LNG lagertank (V212), fordamper og væskeseparator (VT1). Kjelhus beliggende til høyre i bildet.



**Figur 7: Nærbilde av modell av rørføringer i fangdam. Grønne objekter er flenser. Røde objekter er ventiler og lyse grå enheter er instrumenter. Det er viktig å påpeke at det vil være små avvik knyttet til modell for rørføringer i fangdam. Rørføringene er modellert manuelt i KFX™-RBM basert på befaring og fotografier av anlegget. Avvik har ingen betydning for modellen.**



**Figur 8: Nærbilde av modell av rørføring. Ventilen «CV1» er markert.**

## 5 Lekkasjebilde

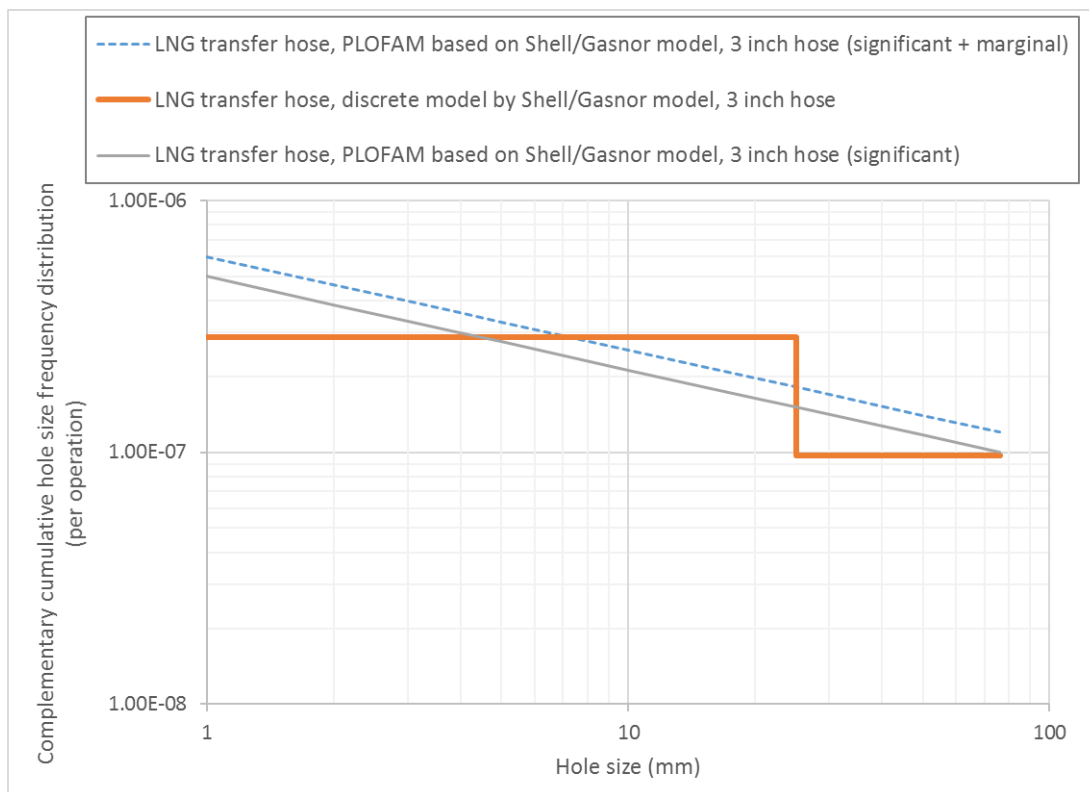
### 5.1 Innledning

Dette kapitlet beskriver resulterende beregning av lekkasjescenarioer. Beregningen utføres integrert i KFX<sup>TM</sup>-RBM basert på modellen beskrevet i foregående avsnitt.

### 5.2 Modell for lekkasjefrekvens

Frekvensen for lekkasjer fra alle komponenter bortsett fra lekkasjer under lastoperasjoner beregnes ved bruk av PLOFAM (Ref./2/). PLOFAM er utviklet av olje- og gassindustrien i Norge basert på data for offshoreinstallasjoner i Nordsjøen. Det kan hevdes at det finnes tekniske og operasjonelle forhold ved LNG anlegget som avviker fra en gjennomsnittlig offshoreinstallasjon i Nordsjøen. På den annen side er det rimelig å hevde at mange forhold er tilsvarende. Vi er ikke kjent med andre modeller som vil være mer relevant å benytte enn PLOFAM. Sammenligning med data for landanlegg for norske landanlegg rapportert i RNNP-rapporten ([www.ptil.no](http://www.ptil.no)) indikerer at PLOFAM er representativ også for anlegg på land.

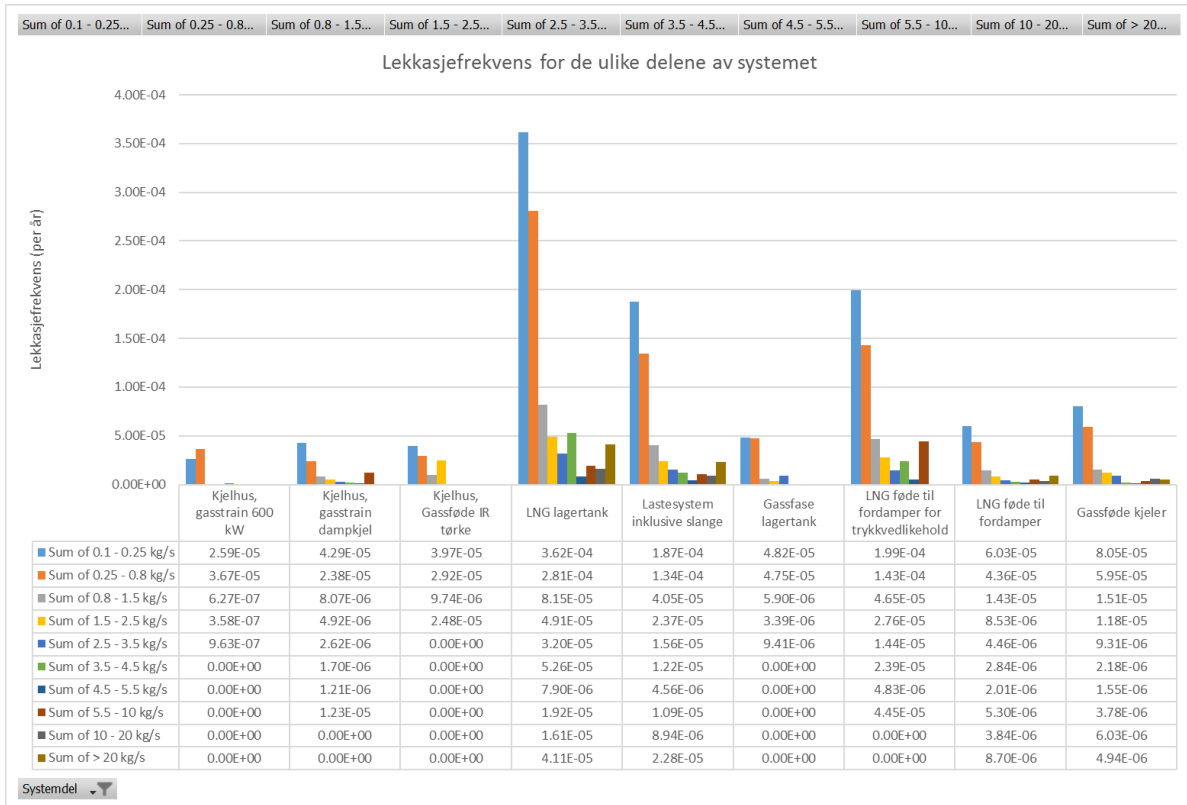
For lekkasjer av LNG under lasting er det etablert en egen modell basert på det matematiske rammeverket i PLOFAM. Basert på Ref. /3/, som kun angir frekvensen knyttet til to definerte hullstørrelser, er det tilpasset en kontinuerlig modell med hensyn på hullstørrelse. Den resulterende modellen er vist i Figur 8. Denne modellen gir et bedre grunnlag for estimering av frekvens for lekkasjer under fylleoperasjoner enn modellen typisk benyttet industrien tidligere (Ref. /5/). Modellen samsvarer bedre med at det antageligvis ikke har vært betydelige lekkasjer med LNG under losse- eller lasteoperasjoner i industrien i Norge. Dette er ikke verifisert gjennom systematisk samling av data.



**Figur 9: Tilpasset modell for LNG lasteoperasjon basert på matematisk rammeverk i PLOFAM (Ref. /2/) og diskret modell foreslått av Shell/Gasnor i Ref. /3/ (illustrert med fet grå kurve i plott)**

### 5.3 Total lekkasjefrekvens

Estimert total lekkasjefrekvens for lekkasjer med initiell rate høyere enn 0.1 kg/s for anlegget er vist i Figur 9, Tabell 2 og Tabell 3. De ulike delene av anlegget er beskrevet i Tabell 1. Total lekkasjefrekvens for alle scenarioene er  $2.6 \cdot 10^{-3}$  per år (sum for LNG anlegg utendørs, lekkasjepunkt inne i kjelhus og lekkasjepunkt knyttet til IR tørke). Det impliserer en returperiode for lekkasjer med en initiell rate på 0.1 kg/s eller høyere på ca. 400 år. I gjennomsnitt forventes altså én lekkasje hvert 400. år. Det betyr at lekkasjer forventes å være en svært sjelden hendelse på LNG anlegget, og henger sammen med at det er få potensielle lekkasjepunkt på anlegget.



Figur 10: Estimert lekkasjefrekvens for LNG anlegg på Ranheim P&B inklusive gassføde til kjeler og IR tørke



**Tabell 1: Beskrivelse av systemdeler for separat beregning av lekkasjefrekvens**

Systemdel	Beskrivelse
Gassfase lagertank	Lekkasjepunkt som kommuniserer med gassfase i LNG lagertank (for eksempel V4, V26 og BV2)
Gassføde kjeler	Lekkasjepunkt nedstrøms fordamper beliggende på utsiden av kjelhus (for eksempel V71, PI-5 og SAV1)
Lastesystem inklusive slange	Lekkasjepunkt oppstrøms V1 og V2 (for eksempel V1, V28 og LNG lasteslange koplet til FC1)
LNG føde til fordamper	Lekkasjepunkt nedstrøms stengeventil BV3 og fordamper (for eksempel C1, V70 og tilkoplingspunkt til fordamper)
LNG føde til fordamper for trykkvedlikehold	Lekkasjepunkt nedstrøms stengeventil BV1 og fordamper (for eksempel R1, V7 og V13)
LNG lagertank	Lekkasjepunkt som kommuniserer med væskeside på LNG lagertank uten stengeventil mellom seg selv og tanken (se Figur 10)
Kjelhus	Lekkasjepunkt som føder kjeler og IR tørke

Tabell 2: Lekkasjefrekvens for lekkasjepunkt presentert per type lekkasjepunkt

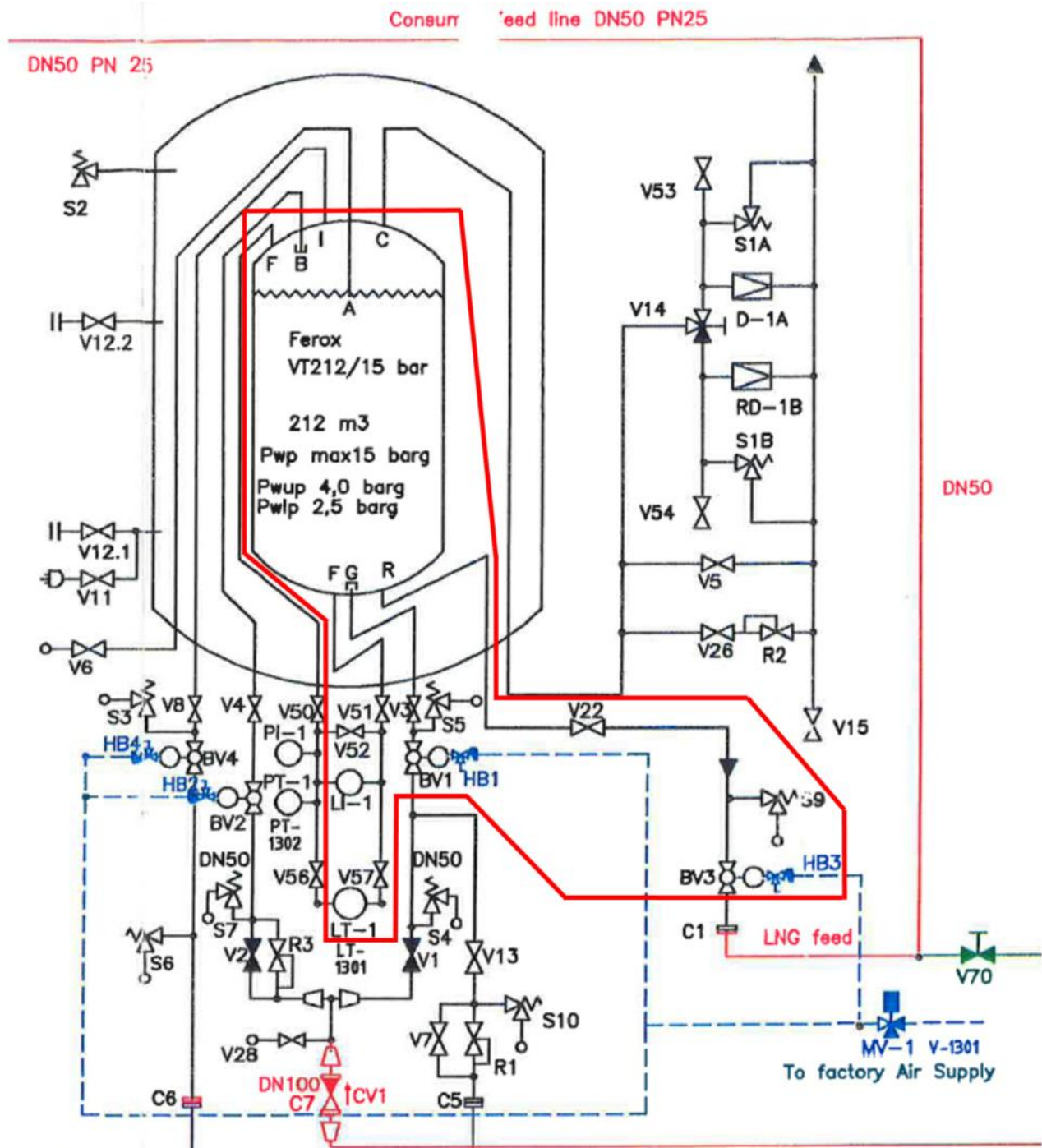
Fluidfase / type lekkasjepunkt	0.1 - 0.25 kg/s	0.25 - 0.8 kg/s	0.8 - 1.5 kg/s	1.5 - 2.5 kg/s	2.5 - 3.5 kg/s	3.5 - 4.5 kg/s	4.5 - 5.5 kg/s	5.5 - 10 kg/s	10 - 20 kg/s	> 20 kg/s
<b>LNG</b>	<b>7.70E-04</b>	<b>5.54E-04</b>	<b>1.82E-04</b>	<b>1.09E-04</b>	<b>5.69E-05</b>	<b>9.27E-05</b>	<b>2.02E-05</b>	<b>8.21E-05</b>	<b>3.07E-05</b>	<b>7.75E-05</b>
Instrument	3.40E-05	2.81E-05	1.04E-05	6.66E-06	3.67E-06	2.44E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
LNG Loading	2.56E-06	2.68E-06	1.22E-06	8.95E-07	5.44E-07	3.85E-07	2.95E-07	8.15E-07	8.38E-07	6.08E-06
Process vessel	4.44E-05	3.83E-05	1.48E-05	9.68E-06	5.44E-06	3.64E-06	2.67E-06	6.87E-06	6.27E-06	2.12E-05
Shell and tube heat exchanger	1.97E-05	1.55E-05	5.50E-06	3.43E-06	1.86E-06	1.21E-06	8.70E-07	2.16E-06	1.86E-06	4.94E-06
Standard flange	1.35E-05	1.00E-05	3.36E-06	2.03E-06	1.07E-06	6.86E-07	4.87E-07	2.53E-06	5.56E-07	1.38E-06
Steel pipe	1.22E-04	9.56E-05	3.36E-05	2.08E-05	1.12E-05	7.31E-06	5.25E-06	2.91E-05	7.04E-06	1.73E-05
Valve	5.33E-04	3.64E-04	1.13E-04	6.50E-05	3.31E-05	5.51E-05	1.06E-05	4.06E-05	1.42E-05	2.66E-05
<b>Metangass</b>	<b>2.77E-04</b>	<b>2.44E-04</b>	<b>4.04E-05</b>	<b>4.57E-05</b>	<b>3.19E-05</b>	<b>2.66E-06</b>	<b>1.89E-06</b>	<b>1.39E-05</b>	<b>4.16E-06</b>	<b>0.00E+00</b>
Instrument	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Standard flange	2.39E-05	1.77E-05	6.50E-06	6.16E-06	4.50E-06	1.05E-06	7.66E-07	7.62E-06	1.54E-06	0.00E+00
Steel pipe	6.75E-05	6.05E-05	1.43E-05	2.57E-05	8.81E-06	2.97E-07	2.11E-07	1.91E-06	0.00E+00	0.00E+00
Valve	1.85E-04	1.66E-04	1.96E-05	1.38E-05	1.86E-05	1.31E-06	9.13E-07	4.35E-06	2.62E-06	0.00E+00
<b>Grand Total</b>	<b>1.05E-03</b>	<b>7.98E-04</b>	<b>2.22E-04</b>	<b>1.54E-04</b>	<b>8.88E-05</b>	<b>9.54E-05</b>	<b>2.21E-05</b>	<b>9.60E-05</b>	<b>3.49E-05</b>	<b>7.75E-05</b>

**Tabell 3: Lekkasje frekvens for lekkasjepunkt utendørs presentert per systemdel**

Systemdel	0.1 - 0.25 kg/s	0.25 - 0.8 kg/s	0.8 - 1.5 kg/s	1.5 - 2.5 kg/s	2.5 - 3.5 kg/s	3.5 - 4.5 kg/s	4.5 - 5.5 kg/s	5.5 - 10 kg/s	10 - 20 kg/s	> 20 kg/s
Kjelhus	1.09E-04	8.97E-05	1.84E-05	3.01E-05	3.59E-06	1.70E-06	1.21E-06	1.23E-05	0.00E+00	0.00E+00
LNG lagertank	3.62E-04	2.81E-04	8.15E-05	4.91E-05	3.20E-05	5.26E-05	7.90E-06	1.92E-05	1.61E-05	4.11E-05
Lastesystem inklusive slange	1.87E-04	1.34E-04	4.05E-05	2.37E-05	1.56E-05	1.22E-05	4.56E-06	1.09E-05	8.94E-06	2.28E-05
Gassfase lagertank	4.82E-05	4.75E-05	5.90E-06	3.39E-06	9.41E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
LNG føde til fordamper for trykkvedlikehold	1.99E-04	1.43E-04	4.65E-05	2.76E-05	1.44E-05	2.39E-05	4.83E-06	4.45E-05	0.00E+00	0.00E+00
LNG føde til fordamper	6.03E-05	4.36E-05	1.43E-05	8.53E-06	4.46E-06	2.84E-06	2.01E-06	5.30E-06	3.84E-06	8.70E-06
Gassføde kjeler	8.05E-05	5.95E-05	1.51E-05	1.18E-05	9.31E-06	2.18E-06	1.55E-06	3.78E-06	6.03E-06	4.94E-06
<b>Grand Total</b>	<b>1.05E-03</b>	<b>7.98E-04</b>	<b>2.22E-04</b>	<b>1.54E-04</b>	<b>8.88E-05</b>	<b>9.54E-05</b>	<b>2.21E-05</b>	<b>9.60E-05</b>	<b>3.49E-05</b>	<b>7.75E-05</b>

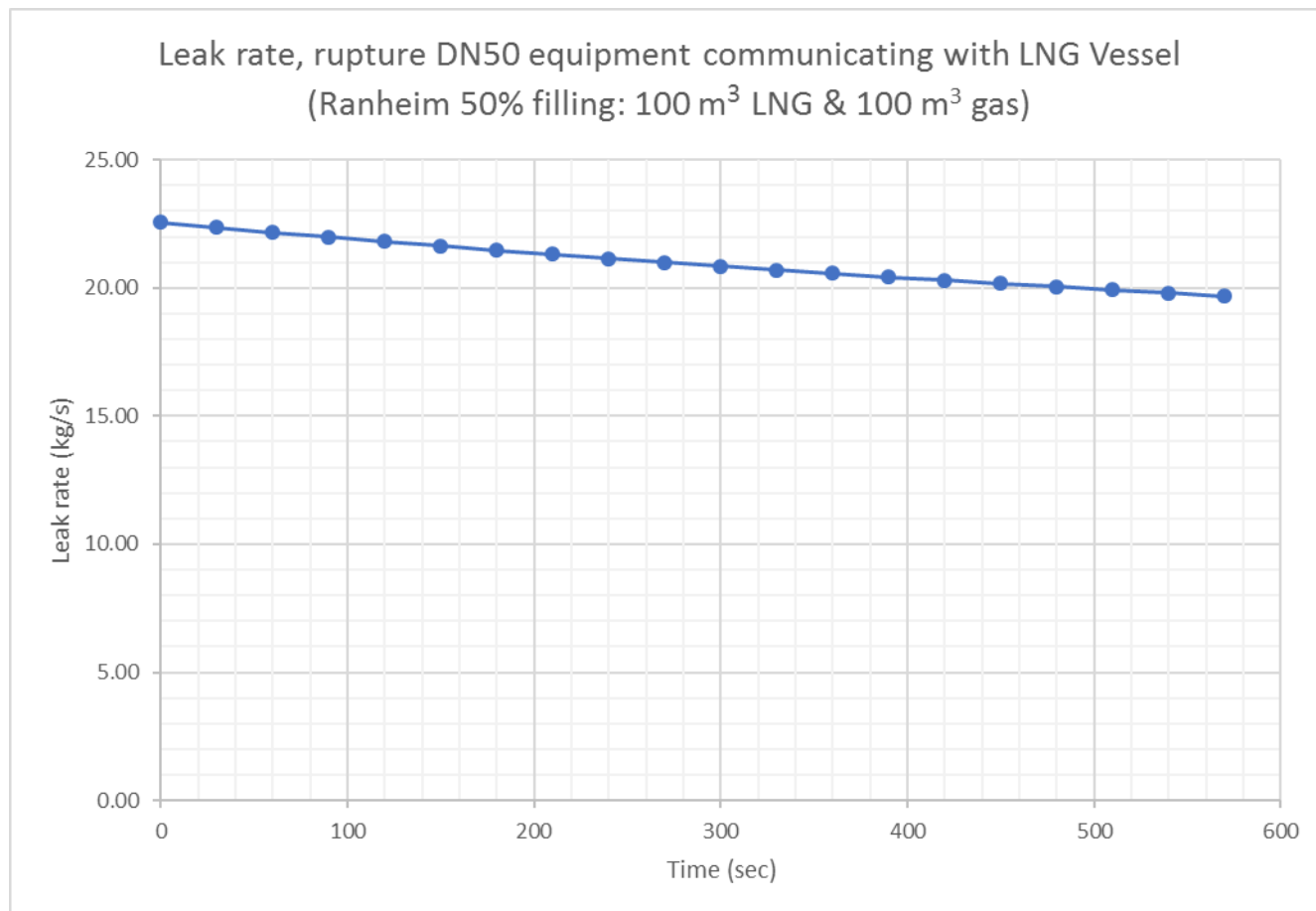
## 5.4 Risikodrivende lekkasjepunkt

Avgjørende bidragsyttere til risiko er lekkasjepunkt som kommuniserer med væskeside i LNG lagertank. Disse lekkasjepunktene er markert med omsluttende røde bokser i Figur 10. Lekkasje i selve stengeventilen (BV1 og BV3) antas (konservativt) å resultere i en lekkasje som kommuniserer med tankvolum.



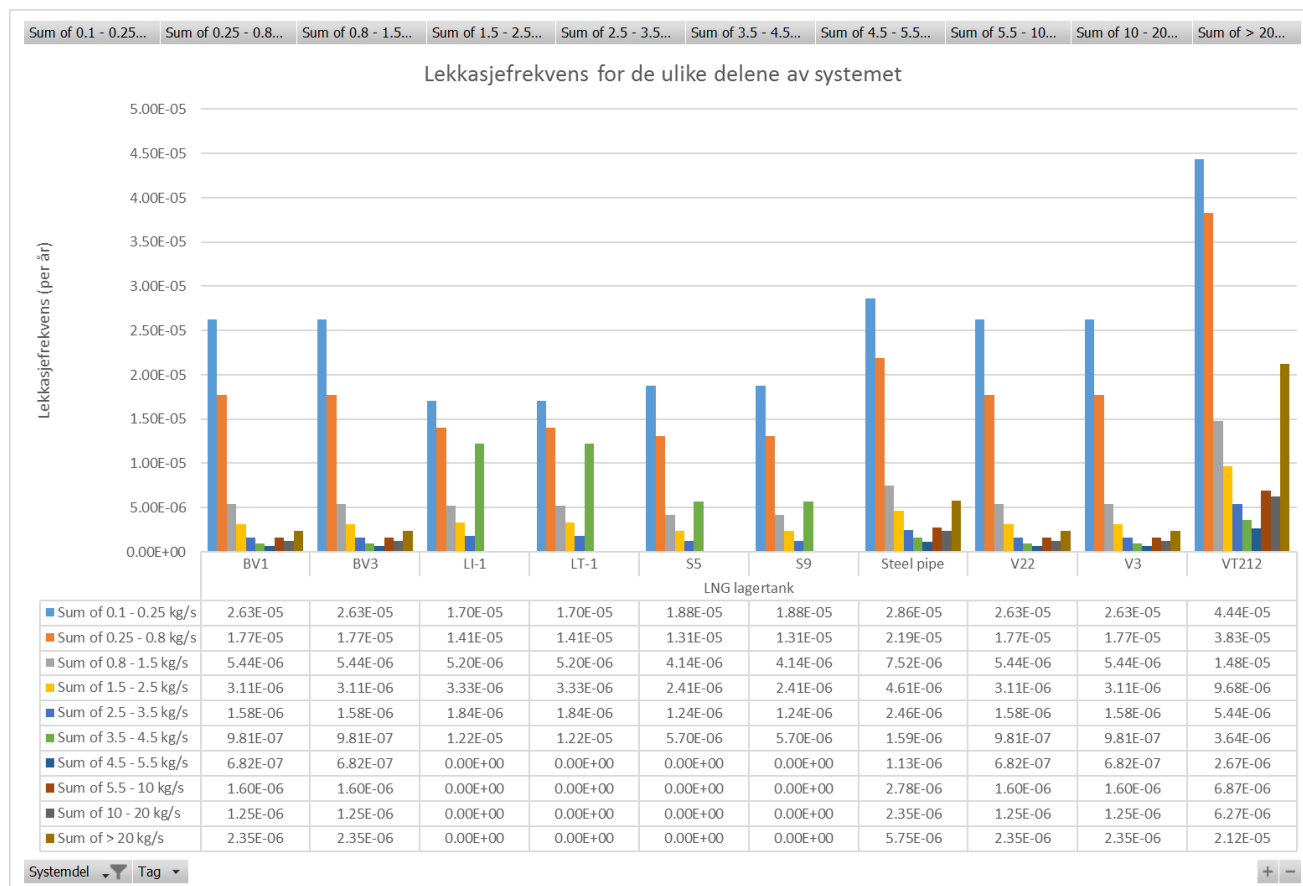
Figur 11: P&ID LNG anlegg: potensielle lekkasjepunkt som kommuniserer med væskeside i LNG lagertank uten stengeventil mellom seg selv og tankvolum. Lekkasje i selve stengeventilen (BV1 og BV3) antas (konservativt) å resultere i en lekkasje som kommuniserer med tankvolum.

Ved lekkasje i et av disse punktene vil hele tankvolumet lekke ut. Den transiente lekkasjeraten for fullt brudd på utstyr med indre diameter på 50 mm (DN50) ved bruk av Clapeyrons forhold for metan (det vil si vi antar adiabatisk prosess – ingen varmeoverføring til systemet) og 50% fylling er vist i Figur 11. Figuren viser at raten vil holde seg høy over svært lang tid. Raten vil falle litt raskere ved høyere fyllingsgrad, men raten vil fortsatt holde seg høy innenfor de første 10 minuttene.



**Figur 12: Tidsavhengig lekkasje fra fullt brudd i rørføring eller utstyr med en indre diameter på 50 mm som kommuniserer med LNG lagertank uten stengeventil mellom seg selv og væskesiden i tanken. Det er antatt at tanken er halvfull med LNG. Driftstrykk er 5 bara. Hydrostatisk trykk er neglisjert (ca. 0.5 bar). Resultat frem til 10 minutter etter start lekkasje er vist**

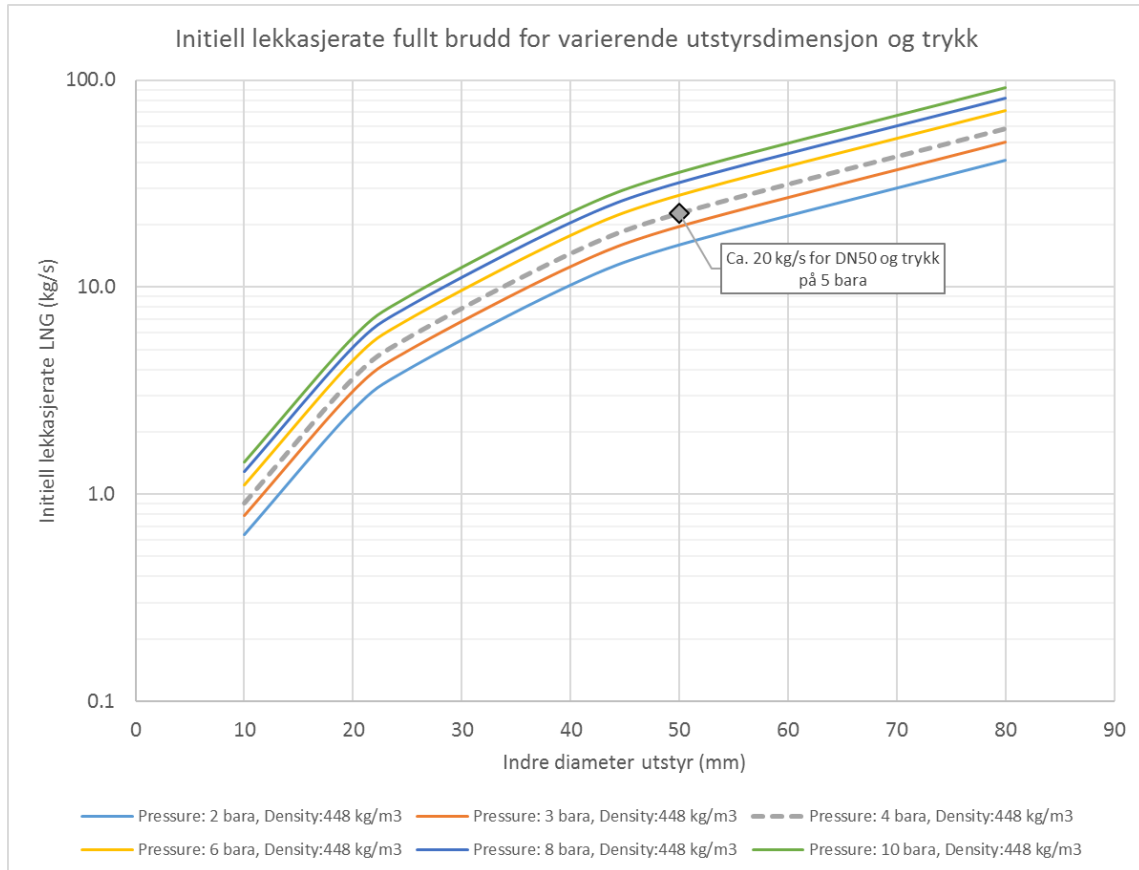
Resulterende lekkasjefrekvens relatert til disse lekkasjepunktene er presentert i Figur 13.



**Figur 13: Lekkasjefrekvens knyttet til lekkasjepunkt som kommuniserer med væskeside i LNG lagertank uten stengeventil mellom seg selv og tankvolum. Bidrag domineres av lekkasjer knyttet til lagertanken i seg selv (knyttet til koplingspunkt på væskesiden, dvs. på tanksiden av ventil V3).**

Det er lekkasjer som gir en rate høyere enn 10 kg/s initielt som er sentrale i forhold til eksponering av i lang avstand fra anlegget (se kap. 6). Den totale frekvensen for LNG-lekkasjer i intervallet 10 – 20 kg/s er  $1.0 \cdot 10^{-4}$  per år. Frekvensen for 20 kg/s (som er raten ved brudd på utstyr med indre diameter på 50 mm (DN50)) er  $7.3 \cdot 10^{-5}$  per år, noe som tilsvarer en returperiode på 13 700 år. Det betyr at det i praksis er svært lite sannsynlig at en slik lekkasje skal skje i løpet av anleggets levetid. Slike lekkasjer forekommer med en svært lav frekvens. Samlet sett for alle olje- og gassinstallasjoner på norsk og britisk sektor i Nordsjøen har det vært noen få titalls slike lekkasjer siden starten på 90-tallet (Ref. /2/). Typiske feilmøder er overtrykking under vedlikeholdsoperasjoner/oppgraderinger eller latente feil forårsaket av feil under installasjon eller vedlikehold. Generelt sett er 2/3 av årsaker til lekkasjer relatert til menneskelige feilhandlinger/feiloperasjoner.

Sammenheng mellom frekvens og rate vil være avhengig av utstyrsdimensjon og trykkforhold. Driftstrykket vil variere avhengig av forbruk og fyllingsgrad, men beregningen viser at det ikke er av stor betydning for frekvensbildet hvilket driftstrykk som legges til grunn. Utstyrsdimensjon har større effekt. Figur 14 viser effekt på initiell lekkasjerate ved brudd for varierende utstyrsdimensjon og varierende driftstrykk. Den fete lysegrå kurven representerer betingelser lagt til grunn i studien for LNG-anlegget.



**Figur 14: Initiell lekkasjerate ved fullt brudd for varierende utstørdsdimensjon og trykk**

## 6 Beskrivelse gasspredningsberegninger

Basert på modellen av anlegget og værdata for Voll værstasjon i Trondheim er det valgt ut 150 lekkasjescenarioer gjennom en separat rutine. Lekkasjescenarioene er ikke lagt ved rapporten, men kan gjøres tilgjengelig på forespørsel.

De ulike lekkasjescenarioene dekker varierende:

- Lekkasjepunkt
- Lekkasjeretning
- Medium (LNG og gass)
- Lekkasjerate (*i.e.* beregnet ut fra trykk, tetthet og lekkasjehull)
- Værforhold, dvs. vindretning og vindhastighet (10 meter over bakken). Turbulens i vindfelt er definert ut fra nøytrale atmosfæriske forhold (typisk for værforhold i Trondheim).

Alle lekkasjescenarioer er kjørt med konstant rate inntil «steady state» tilstand for gasskyen innenfor brennbarhetsområdet (som er 5 – 15 vol%) har blitt etablert. «Steady state» betyr at det er en likevektstilstand mellom tilført gass fra lekkasjen og innblanding av luft i sonen hvor skya har en konsentrasjon på nedre flammegrense (5 vol%).

Rutinen for utvalg av scenarioer styres slik at det er fokusert på scenarioer som potensielt kan gi eksponering av gass utenfor fabrikkområdet, som er lekkasjer resulterende fra fullt brudd på rørføringer eller utstyr.

Det er generelt kjørt følgende 5 værforhold for alle lekkasjescenarioer:

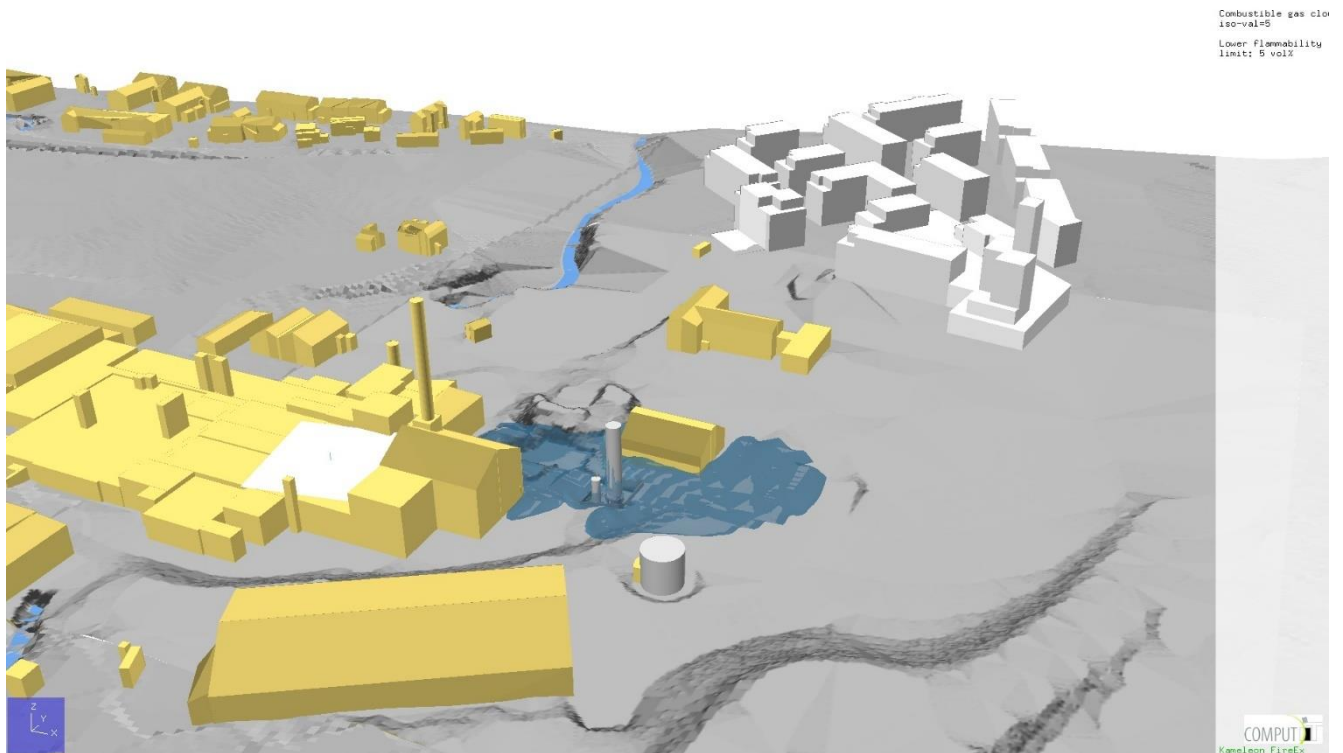
- 1,75 m/s 10 meter over bakken fra nord-nordøst
- 1,75 m/s 10 meter over bakken fra øst-nordøst
- 0,75 m/s 10 meter over bakken fra sør-sørvest
- 2,75 m/s 10 meter over bakken fra sør-sørvest
- 4,75 m/s 10 meter over bakken fra sør-sørvest

Dominerende vindretning er sør-sørvest. De tre siste vindforholdene dekker ca. 50% av værforholdene. Totalt dekker de kjørte beregningene 2/3 av værforholdene.

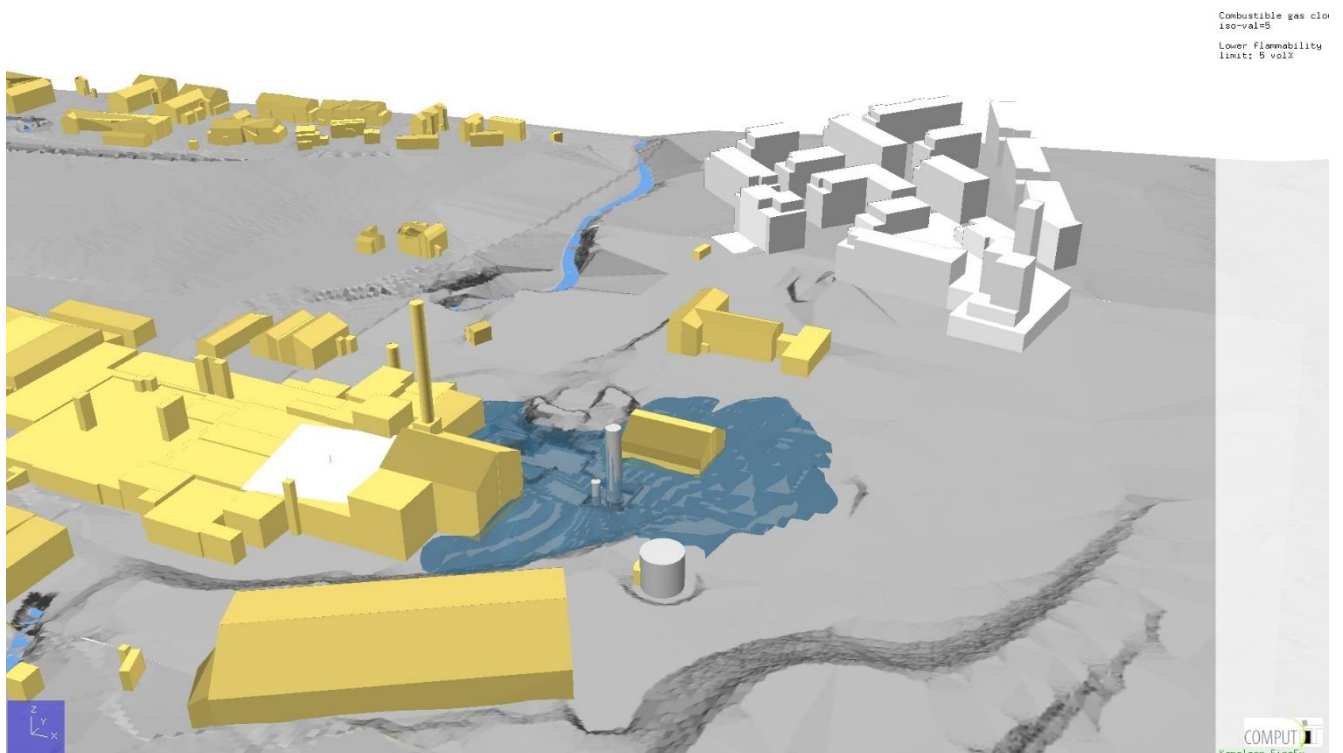
Omgivelsestemperatur er satt til 10°C i alle beregningene, som vil typisk variere mellom -10°C og 25°C over året. Omgivelsestemperaturen har imidlertid mindre betydning for resultat. Høy temperatur vil generelt ha en svakt gunstig effekt og lav temperatur en svakt ugunstig effekt i forhold til utstrekning av gassky. Dette fordi høyere temperatur vil tilføre oppdrift til gassen og øke innblanding av luft i gassen.

Figur 16, Figur 17 og Figur 18 viser brennbar gassky henholdsvis 2, 5 og ca. 10 minutter etter start av lekkasjen med konstant rate av LNG på 20 kg/s. Beregningen viser at den brennbare gassen vil nå utkanten av fabrikkområdet etter 10 minutter. Den brennbare gassen vil nå litt over 200 meter fra LNG-anlegget. Legg merke til at gassen sprer seg mot vindretningen og følger topografiske høydeforskjeller, noe som er drevet av tetthetsforskjellen mellom gassblandingen og omgivende luft. Gassblandingen har vesentlig lavere temperatur enn den omgivende luften, og gassblandingen forblir tyngre enn overliggende luft. Gassen vil derfor i hovedsak spre seg ned mot Vikelva, og i det mest ugunstige tilfelle (lekkasjeretning pekende ut av fangdam mot Vikelva (mot nordvest) kombinert med lav vind i samme retning) nå Ranheimsvegen etter lang tid (> 10 minutt). Et slikt scenario vil imidlertid være svært lavfrekvent (se neste avsnitt).

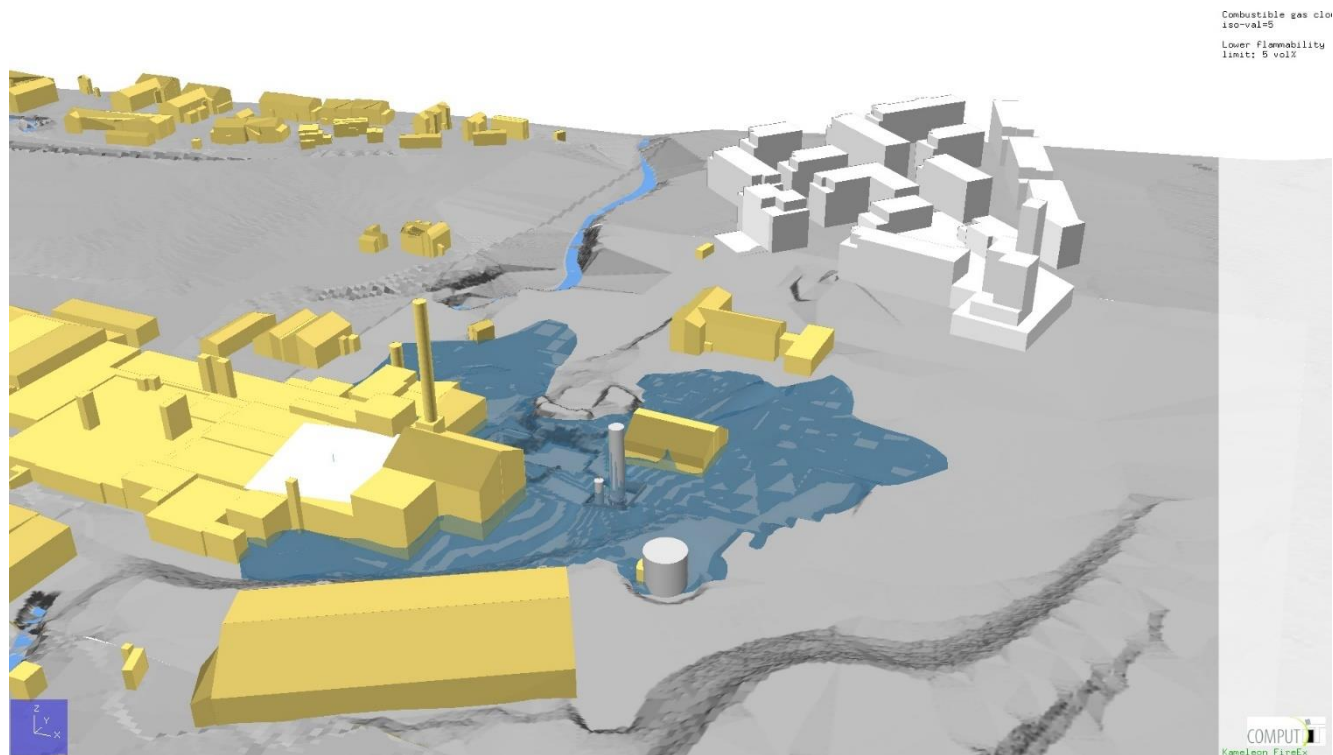




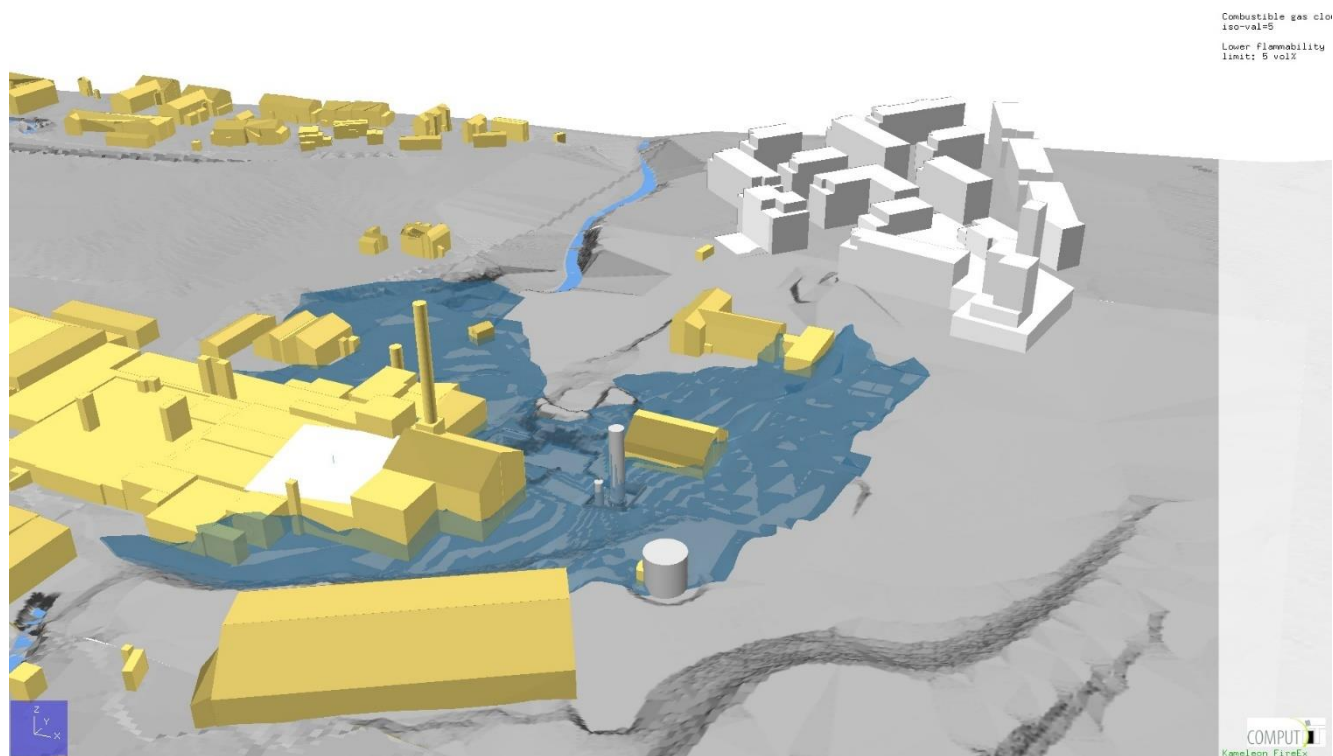
**Figur 15: Brennbar gassky 1 minutter etter start av lekkasje med rate på 20 kg/s LNG og 0.75 m/s vind fra sør-sørvest (vindretning på tvers av perspektiv i plott)**



**Figur 16: Brennbar gassky 2 minutter etter start av lekkasje med rate på 20 kg/s LNG og 0.75 m/s vind fra sør-sørvest (vindretning på tvers av perspektiv i plott)**



**Figur 17: Brennbar gassky 5 minutt etter start av lekkasje med rate på 20 kg/s LNG og 0.75 m/s vind fra sør-sørvest (vindretning på tvers av perspektiv i plott)**

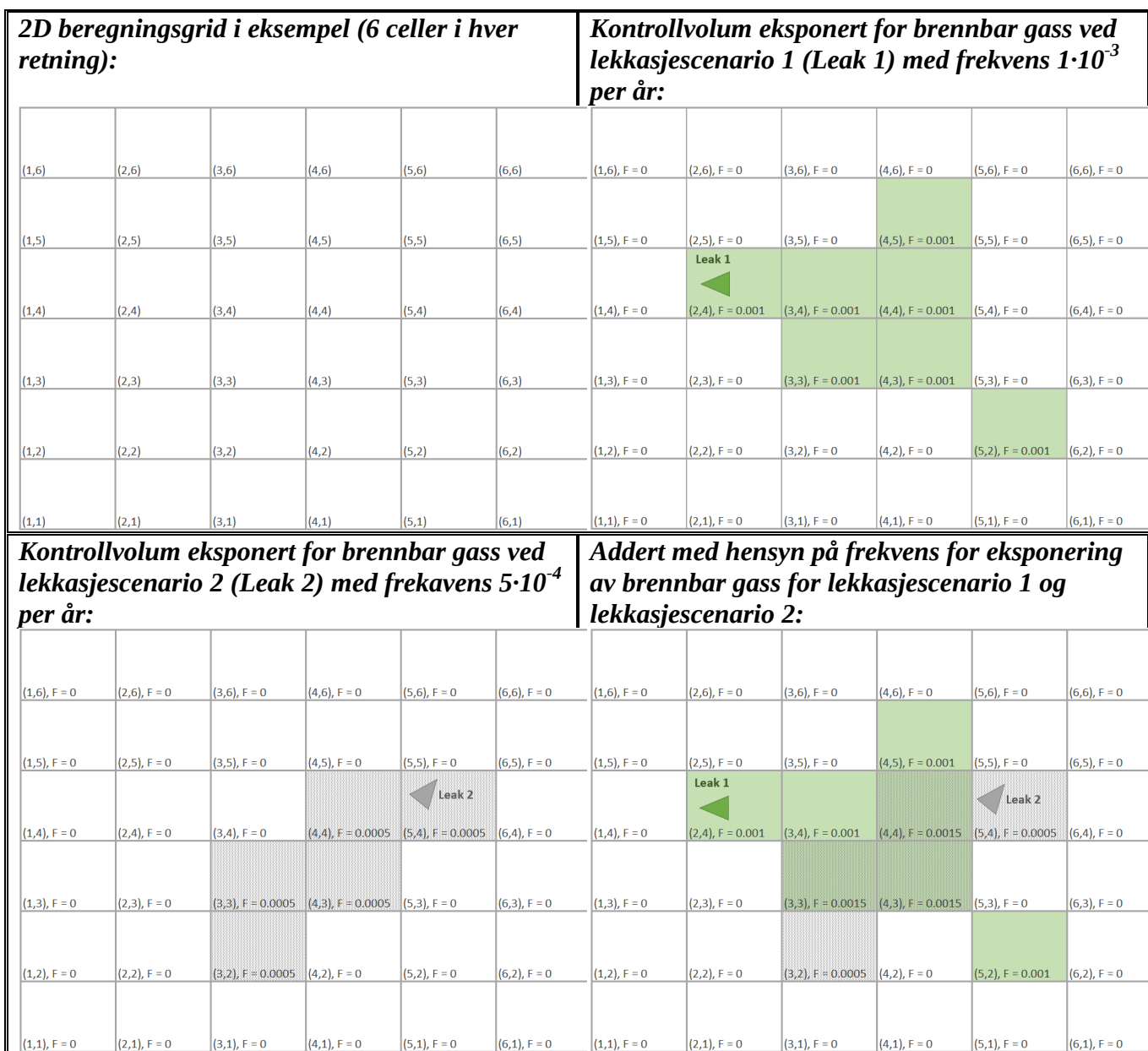


**Figur 18: Brennbar gassky 10 minutter etter start av lekkasje med rate på 20 kg/s LNG og 0.75 m/s vind fra sør-sørvest (vindretning på tvers av perspektiv i plott)**

## 7 Risikobilde

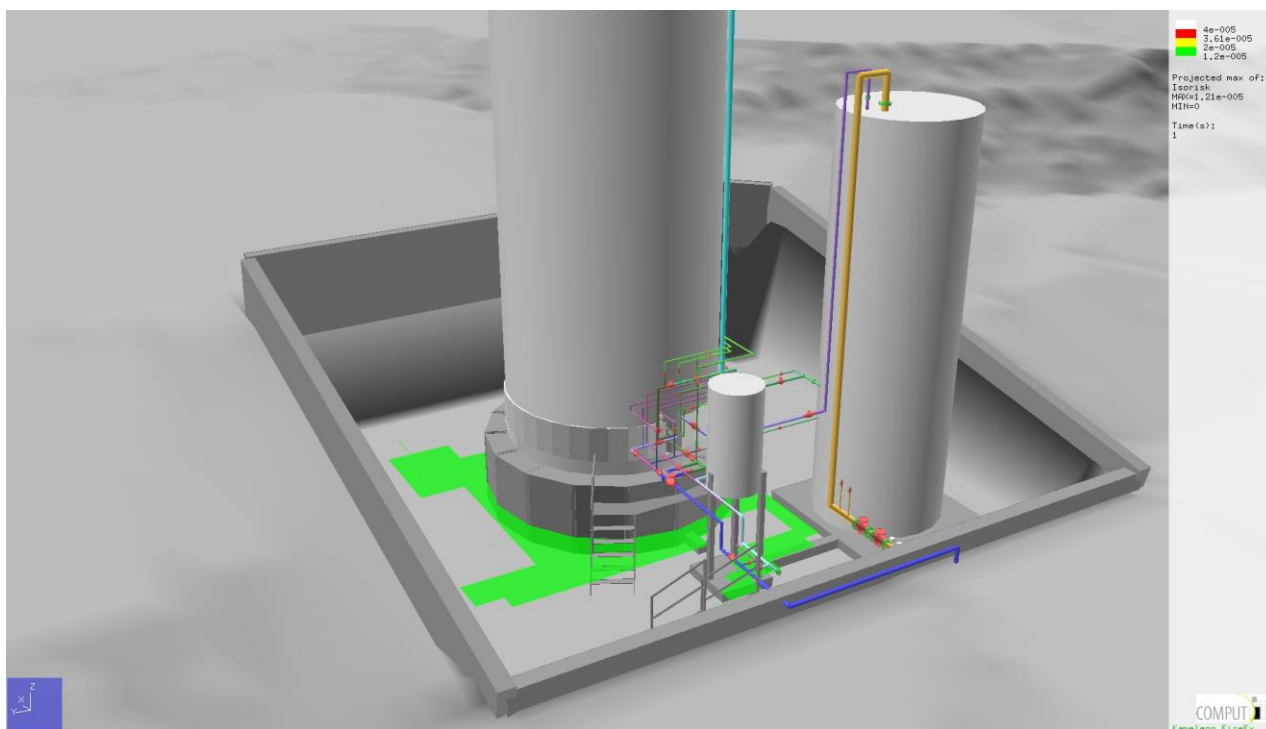
### 7.1 Metode for beregning av isorisk risikokonturer

Metoden for beregning av isorisk konturer, som er en mer generell betegnelse av fremstilling som måles mot DSB sitt risikokriterium relatert til hensynssoner, er illustrert skjematisk i Figur 19. Figuren viser hvordan frekvens adderes for kontrollvolum (gridceller) eksponert for brennbar gass for to lekkasjescenario. Denne prosedyren gjentas for alle scenarioene (150 stk) i 3 dimensjoner for Ranheim Paper & Board. Tilsvarende metode ville vært brukt om man også hadde beregnet isorisk konturer for andre ulykkeslaster (varme fra branner eller trykk generert av eksplosjoner). Ett lekkasjescenario er produktet av lekkasjefrekvens, antatt uniform sannsynlighetsfordeling for lekkasjeretning (spesifikk fordeling kan benyttes om kunnskap tilgjengelig) og sannsynlighetsfordeling værforhold (vindrose).

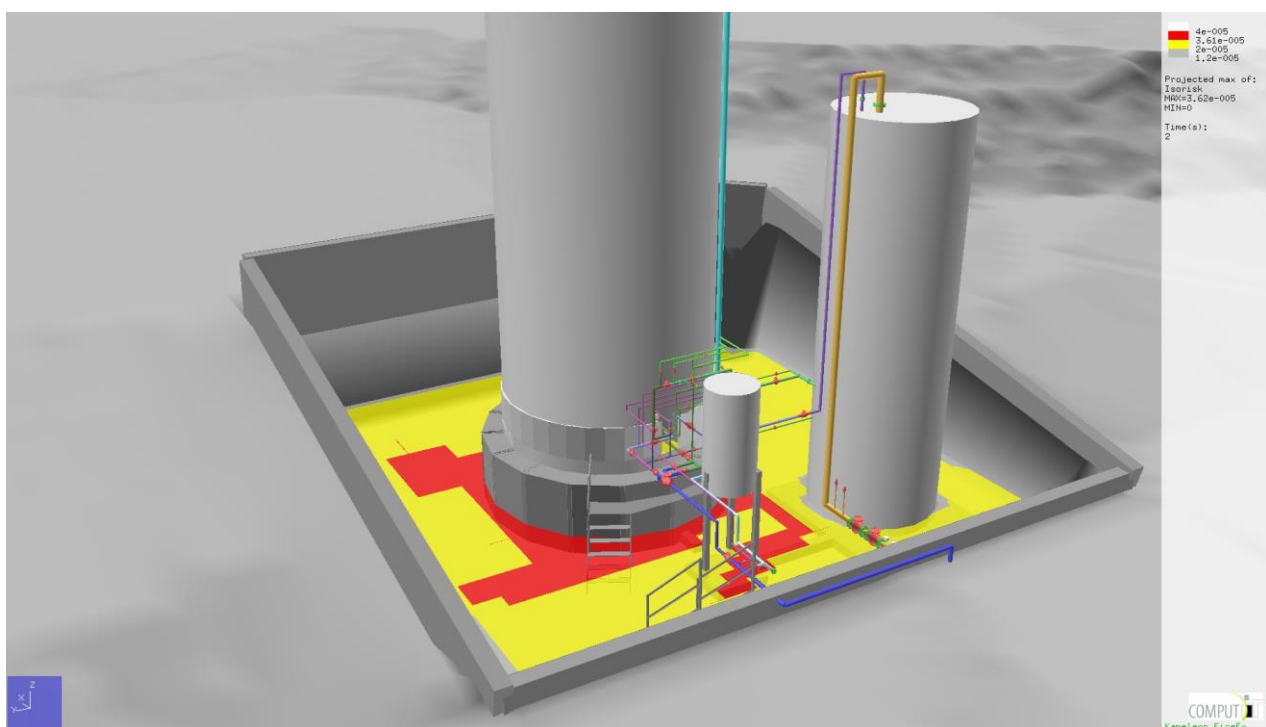


**Figur 19: Skjematisk fremstilling av hvordan isorisk kart beregnes i et 2-dimensjonalt grid for to lekkasjer med ulik frekvens. Et lekkasjescenario er produktet av lekkasjefrekvens, antatt uniform sannsynlighetsfordeling for lekkasjeretning (spesifikk fordeling kan benyttes om kunnskap tilgjengelig) og sannsynlighetsfordeling værforhold (vindrose).**

Figur 20 og Figur 21 illustrerer tilsvarende beregning som Figur 19, men i dette tilfellet for to lekkasjescenarioer simulert med KFX™ i fangdammen på Ranheim Paper & Board.



**Figur 20: Isorisk resulterende for ett lekkasjescenario (liten lekkasje) i fangdam. Lekkasjescenarioet har en frekvens på  $1.2 \cdot 10^{-5}$  per år**



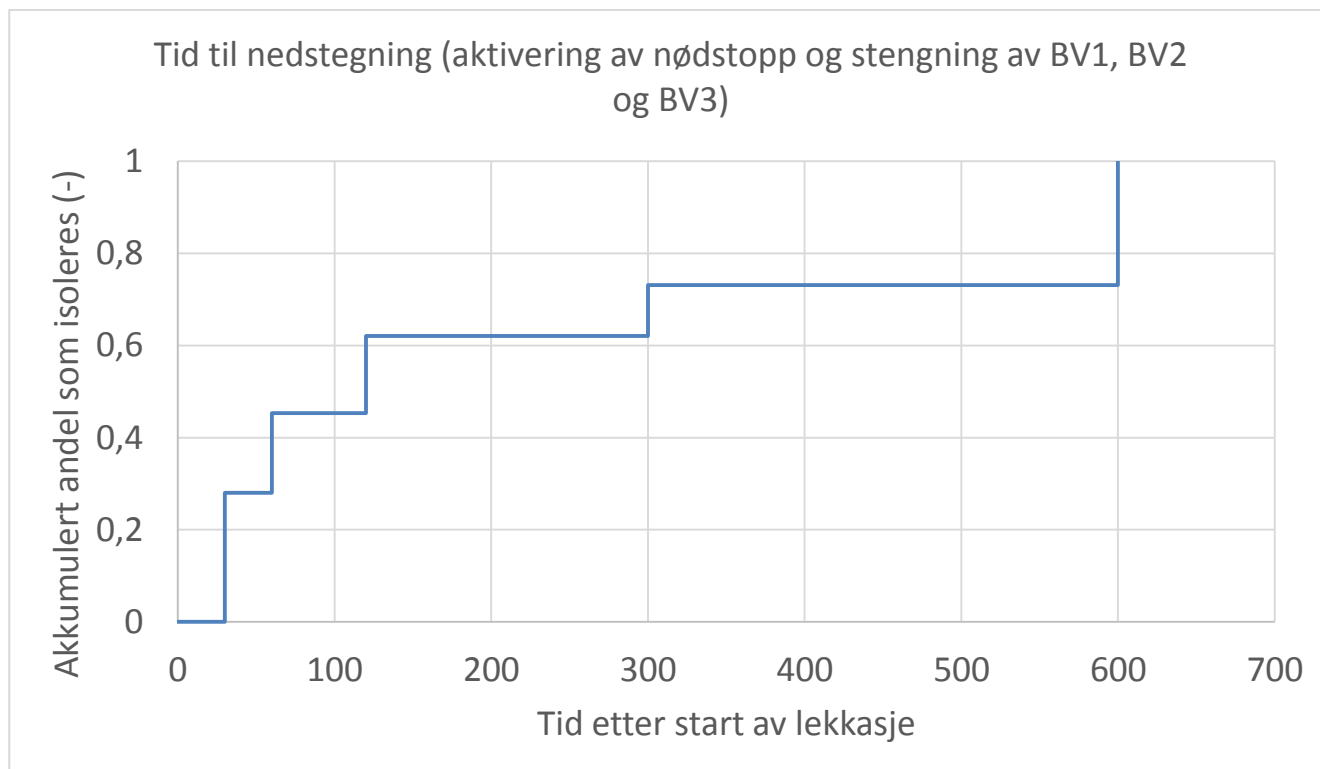
**Figur 21: Isorisk resulterende for to lekkasjescenario (begge representerer liten lekkasje) i fangdam. Lekkasjescenario 2 har en frekvens på  $2.4 \cdot 10^{-5}$  per år. Rødt område representerer området hvor eksponering av brennbar gass overlapper for de to lekkasjescenarioene. Det gule området betegner området eksponert for gass kun i lekkasjescenario 2.**

Det er viktig å være klar over at et gitt punkt i isoriskkartet representerer frekvensen for eksponering for brennbar gass i det bestemte punktet. For to tilgrensende punkt kan det være ulike scenarier som bidrar til eksponering. Det betyr at for et objekt med en vesentlig utstrekning, slik som en bygning, vil den akkumulerte frekvensen for eksponering av et eller annet punkt på bygningen kunne være høyere enn indikert av isorisk-konturene. For eksempel, anta at det er et objekt som fyller kontrollvolumene (6,2), (6,3) og (6,4) i Figur 19. Frekvens for eksponering av dette objektet for brennbar gass er summen av verdien i kontrollvolumene (6,2) og (6,4), ikke den høyeste verdien funnet i tilgrensende kontrollvolumer.

## 7.2 Hensynssoner brennbar gass

Tid til initiering av nødstop har betydning for utstrekning av gasskyen. Beregningene er gjennomført slik at man kan studere effekten av tiden fra start av lekkasjen til den stenges ned ved å aktivere nødstop. En vesentlig andel av scenarioene som er drivende for risiko vil ikke kunne isoleres (se avsnitt 5.4) fordi lekkasjepunktet er på innsiden av stengeventilene (BV1, BV2 og BV3). Det er personell tilstede (fyrbøter) til enhver tid som vil kunne aktivere nedstengning. Svakheten ved anlegget er få detektorer som vil kunne alarmere fyrbøter. Det er vurdert at det vil være trykkfall i tilførsel til kjelene som i mange tilfeller vil alarmere fyrbøter.

Modellen for beregning av hensynssoner er vist i Figur 22. Modellen må ikke betraktes som konservativ. Den er ment å gi et grovt representativt bilde da det er funnet rimelig at en vesentlig andel vil stenges ned innen noen minutter, men en mer detaljert vurdering burde vært gjort for å etablere en nøyaktig modell. Dette er ikke utført fordi det er vist at selv ved å anta at alle lekkasjene varer i 10 minutter er hensynssonene akseptable i forhold til toleransekriteriene (se Figur 23). På den annen side viser beregningene at det er et vesentlig potensial for risikoreduksjon gjennom å forbedre anleggets evne til å detektere hurtig og dermed forbedre fyrbøterens evne til å respondere raskt. Det er foreslått å se nærmere på dette som et ledd i bedriftens systematiske arbeid med å finne sikkerhetstekniske forbedringer i henhold til ALARP prinsippet (arbeide systematisk med bringe risiko ned til et så lavt nivå som mulig innenfor motsvarende rimelige rammer for investering).



**Figur 22: Antatt modell for nedstengning av anlegget (tid til initiering av nødstop). Andel ved 600 sekunder inkluderer scenarier som ikke kan stenges ned som følge av at lekkasjen er på innsiden av stengeventiler (se Figur 11). Andelen domineres av scenarier som ikke kan stenges ned, og beregningene for disse er kjørt inntil steady state med omgivelsene har blitt etablert.**

Figur 24 viser resulterende frekvens for eksponering for brennbar gass for ethvert punkt i og omkring anlegget, gitt antatt modell for nedstengning vist i Figur 22. Figur 25 og Figur 26 viser resultat om man antar at alle lekkasjer isoleres etter henholdsvis 1 og 5 minutt. De to siste figurene demonstrerer effekten av tidlig deteksjon og rask respons.

Figur 27 til og med Figur 32 gir supplerende informasjon om resulterende 3 dimensjonal hensynssone. I figur Figur 27 og Figur 28 er resultatet basert på beskrevet modell for nedstengning (Figur 22). I øvrige figurer er det antatt at steady state er oppnådd innen 10 minutter.

Kriteriene gitt i Ref. /7/ av DSB definerer  $10^{-6}$  per år som øvre grense for eksponering av brennbar gass ved båndlegging av areal.

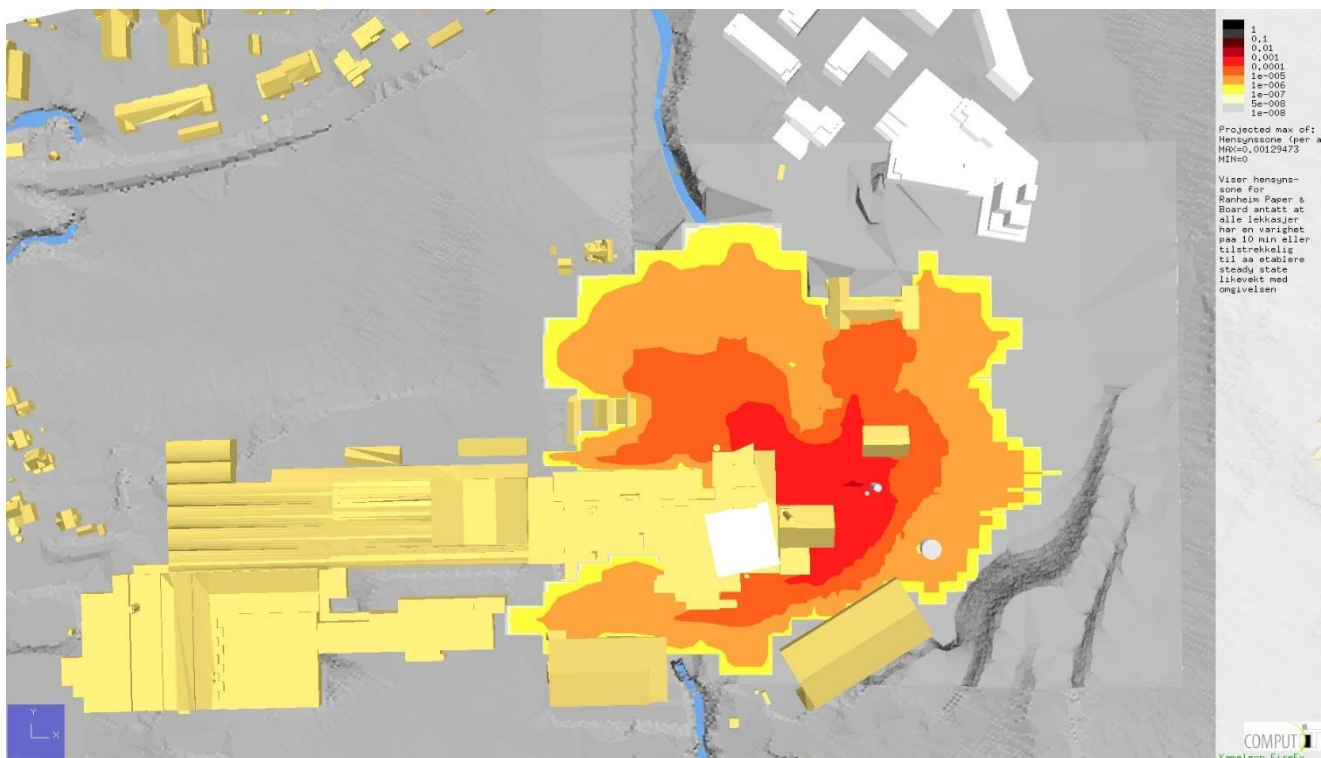
Resultatet viser at brennbar gass kun vil kunne eksponere områder utenfor anlegget i ekstreme tilfeller (frekvens for eksponering av Ranheimsvegen nord for anlegget er  $< 10^{-6}$  per år). Resultatet viser videre at brennbar gass i de aller fleste tilfeller vil fanges opp av fangdammen eller vil legge seg i området for fyllingene nordøst for anlegget.

Selv om risiko er akseptabel i henhold til toleransekriteriene, bør tiltak vurderes for å bringe risiko til et lavere nivå. Tiltak som kan vurderes er:

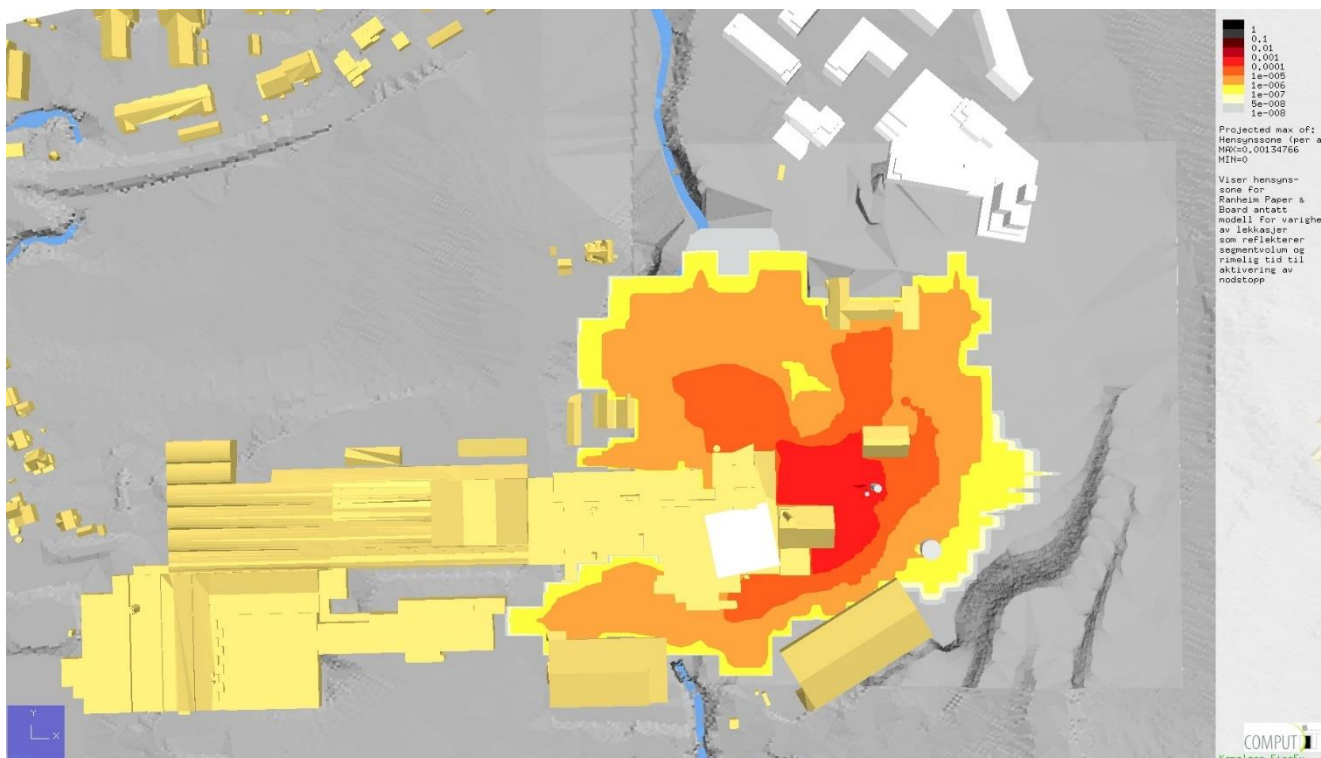
- Se på om antall lekkasjepunkt som kommuniserer med væskeside i LNG tankvolum og ikke kan isoleres med stengeventil kan reduseres, samt vurdere reduksjon av utstyrsdimensjon (f.eks. redusere dimensjon fra DN50 til DN40 eller DN32).

- Installere gassdetektorer i fangdammen og flere detektorer inne i kjelhus for å redusere responstiden for nedstengning av anlegget. Det er et betydelig potensial for risikoreduksjon knyttet til lekkasjer som er på isolerbar side i forhold til tankvolum.

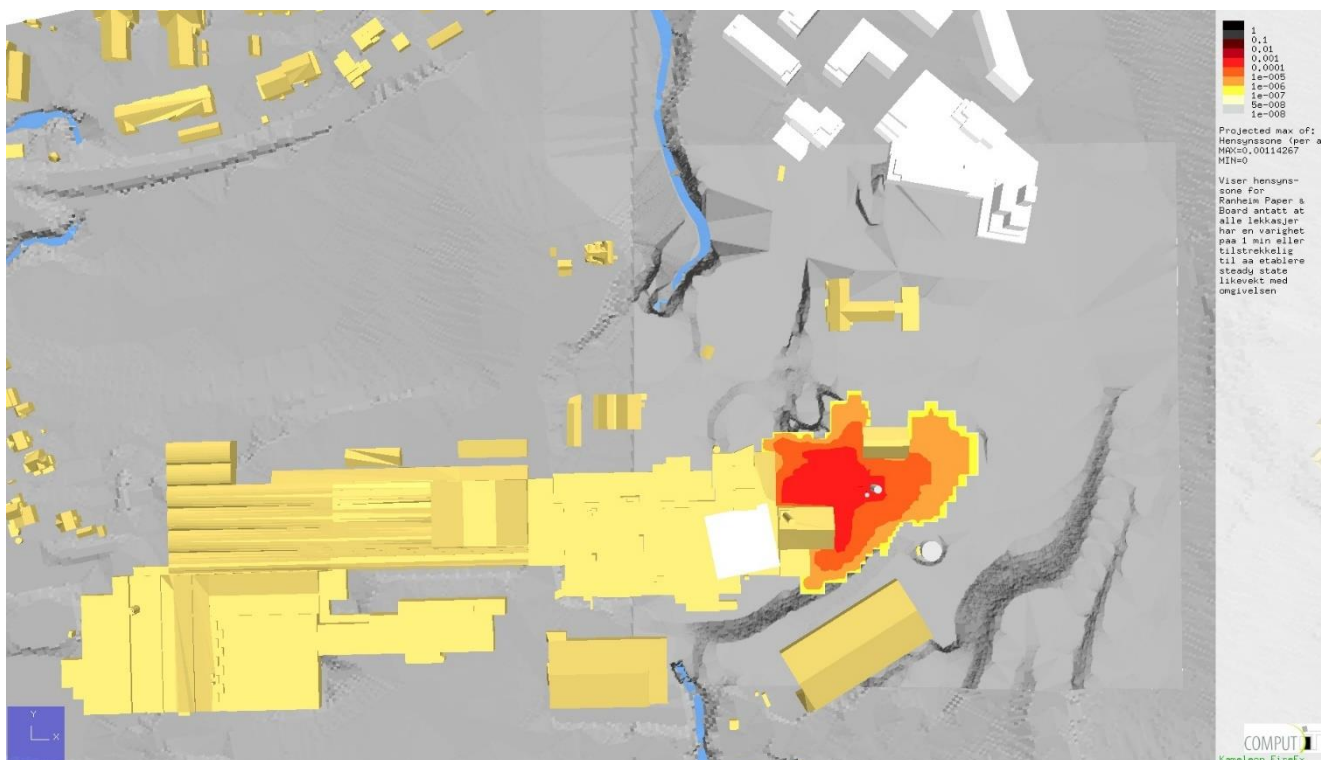
I en eventuell fremtidig situasjon med kortere avstand til 3. part vil eksponering kunne reduseres ved å implementere en fysisk vertikal barriere mellom LNG-anlegget og 3. part. Dette demonstreres godt av effekten av fyllingene som ligger nordøst for LNG-anlegget. Hindringene reduserer spredningen mot nord-nordvest. I tilknytning til et eventuelt fremtidig prosjekt inne på anleggsområdet mellom LNG anlegget og Ranheimsvegen anbefales at det sees nærmere på og installeres en fysisk barriere mot nord-nordvest. Dette vil være et godt risikoreduserende tiltak iht. ALARP-prinsippet.



**Figur 23: Isorisk konturer for eksponering av brennbar gass sett ovenfra. I dette tilfellet er det gitt at alle lekkasjer resulterer i steady state likevekt mellom gassky og omgivende luft innen 10 minutter. Kravet gitt av DSB er  $10^{-6}$  per år. Lys orange farge indikerer punkter med frekvens høyere enn  $10^{-6}$  per år.**

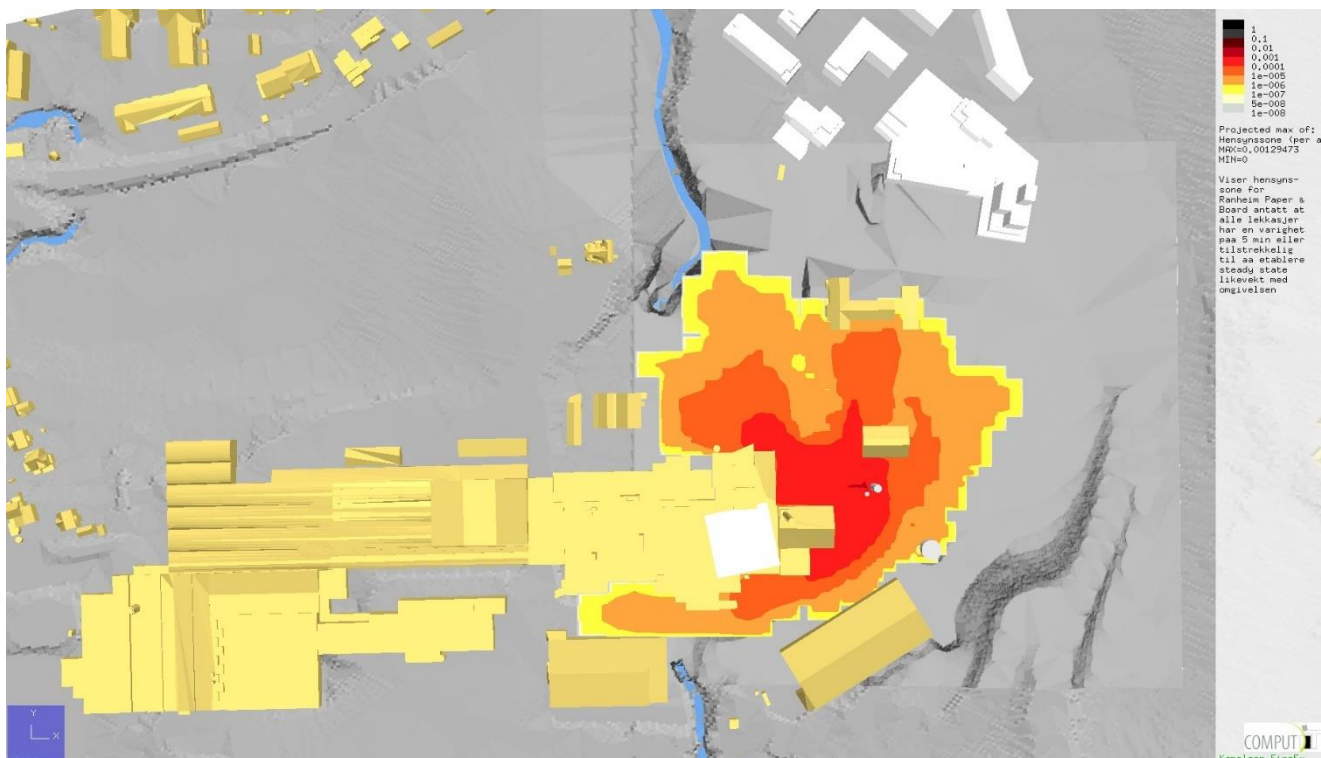


Figur 24: Isorisk konturer for eksponering av brennbar gass sett ovenfra. I dette tilfellet er modellen for nedstengning vist i Figur 22 benyttet. Kravet gitt av DSB er  $10^{-6}$  per år. Lys orange farge indikerer punkter med frekvens høyere enn  $10^{-6}$  per år.

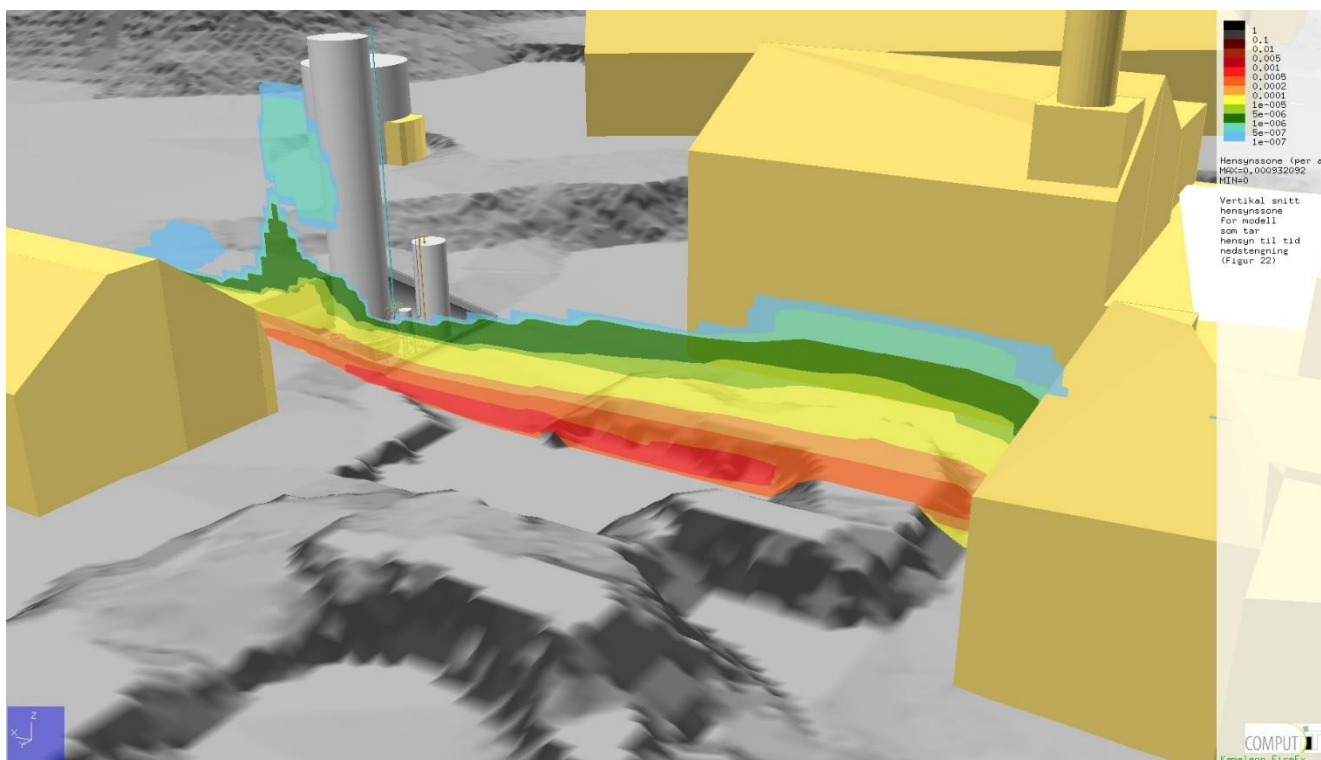


Figur 25: Isorisk konturer for eksponering av brennbar gass sett ovenfra. I dette tilfellet er det gitt at alle lekkasjer resulterer kan stenges ned innen 1 minutt. Kravet gitt av DSB er  $10^{-6}$  per år. Lys orange farge indikerer punkter med frekvens høyere enn  $10^{-6}$  per år.

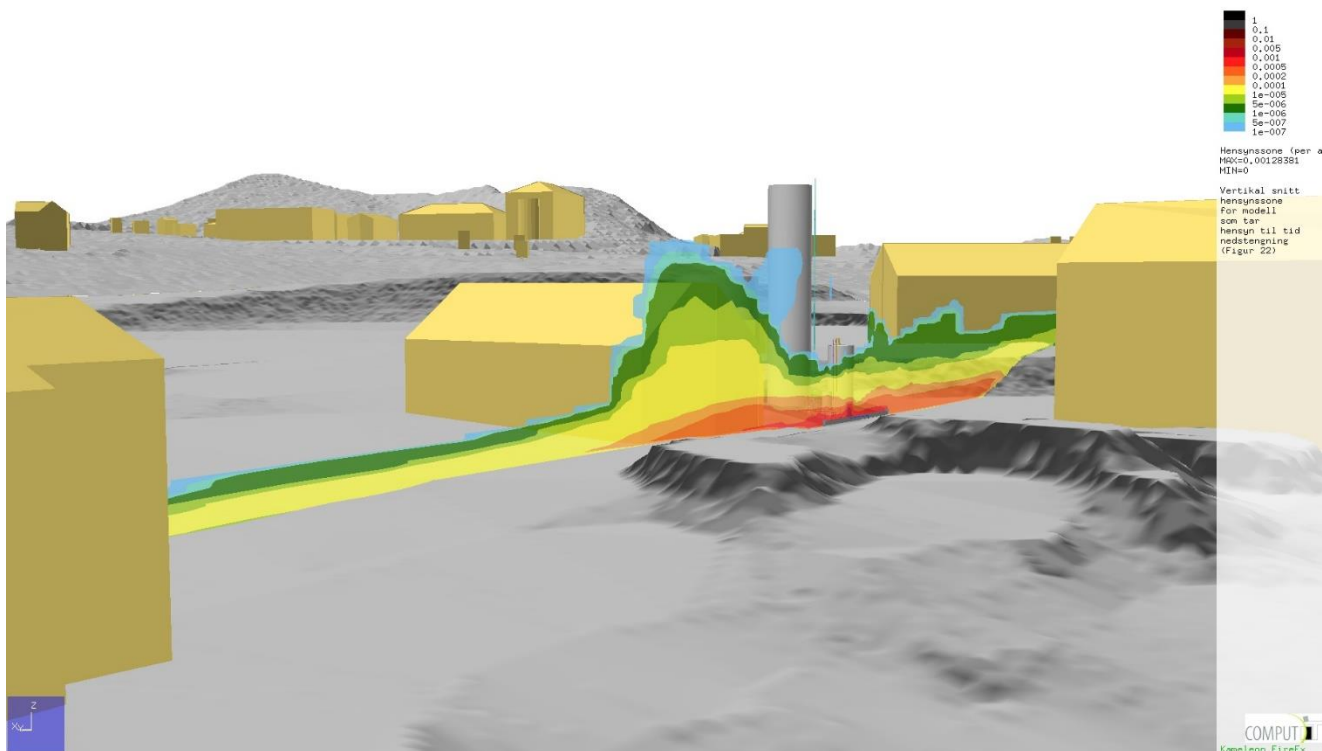




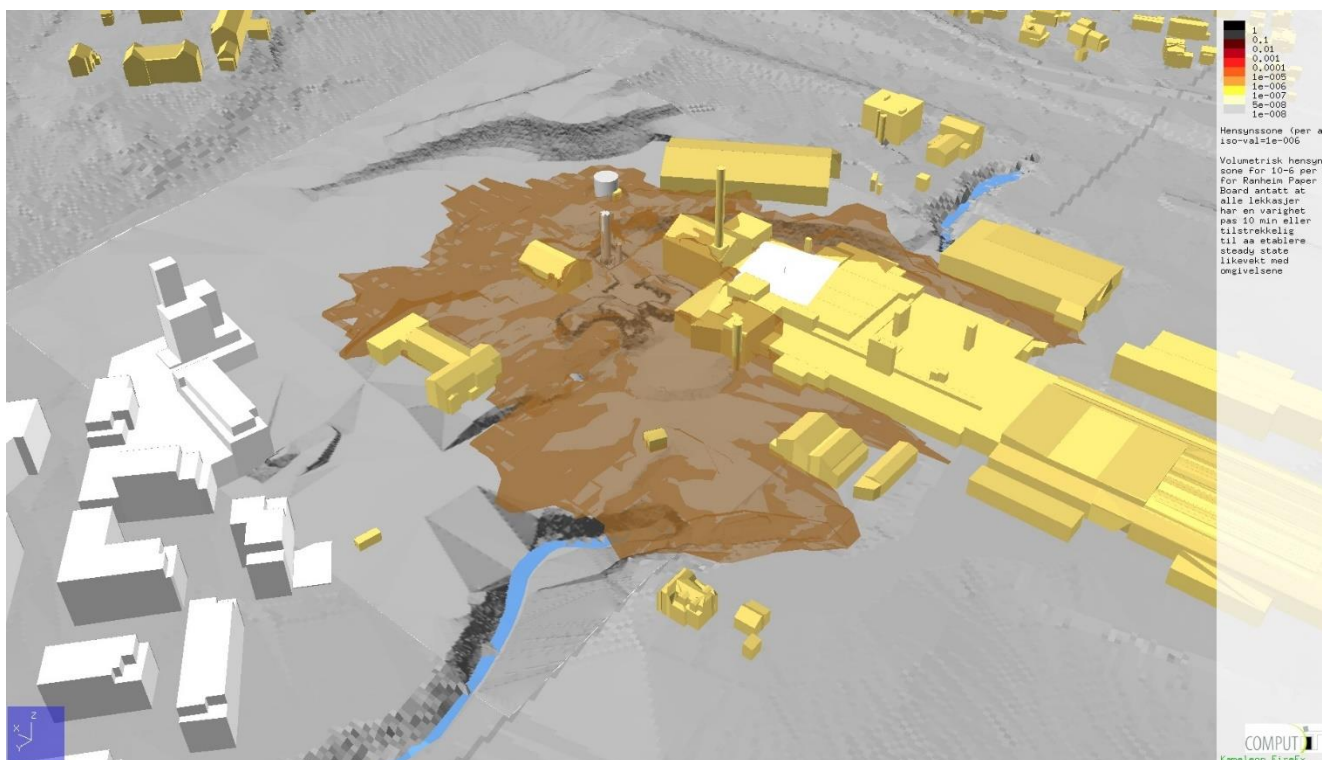
**Figur 26: Isorisk konturer for eksponering av brennbar gass sett ovenfra. I dette tilfellet er det gitt at alle lekkasjer resulterer kan stenges ned innen 5 minutt. Kravet gitt av DSB er  $10^{-6}$  per år. Lys orange farge indikerer punkter med frekvens høyere enn  $10^{-6}$  per år.**



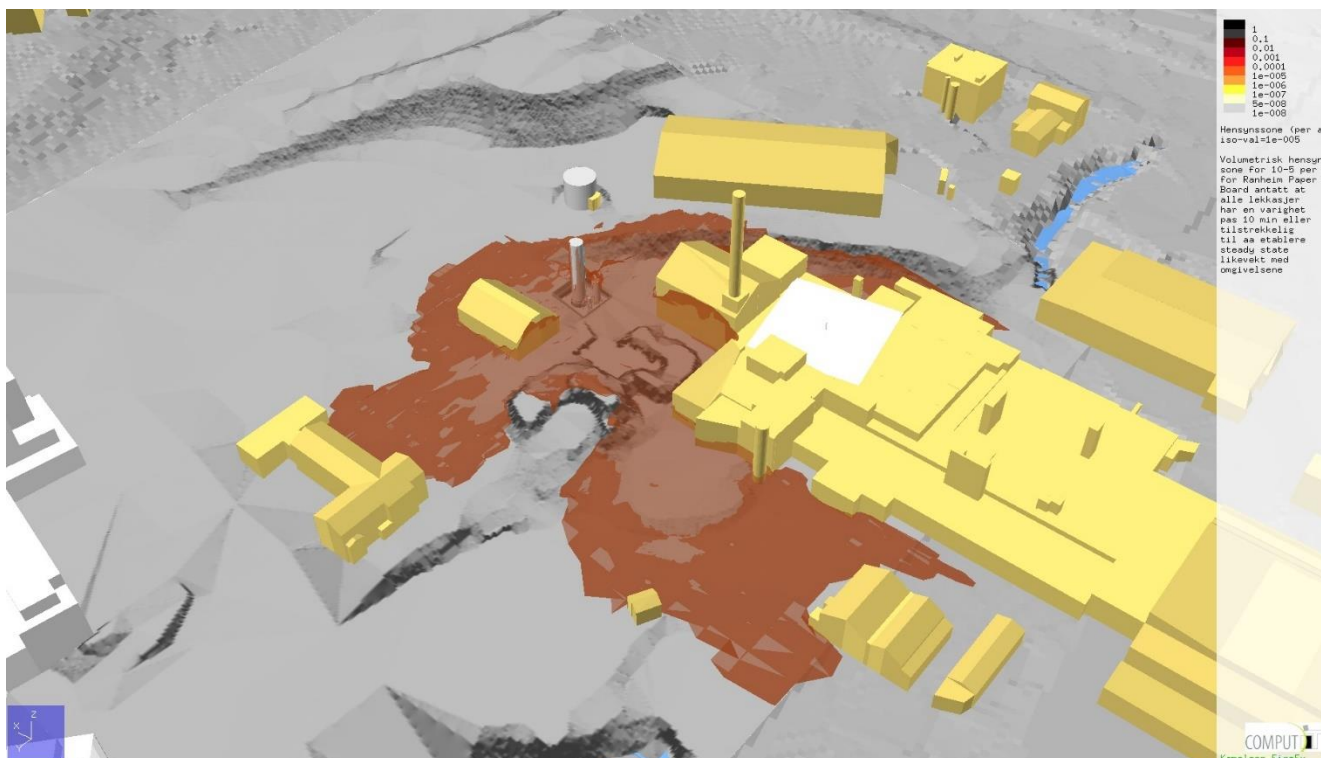
**Figur 27: Vertikale isorisk konturer for eksponering av brennbar gass. Kravet gitt av DSB er  $10^{-6}$  per år (mørk grønn farge indikerer punkter med frekvens høyere enn  $10^{-6}$  per år). Legg merke til effekt av fyllingene på nordvestsiden av anlegget.**



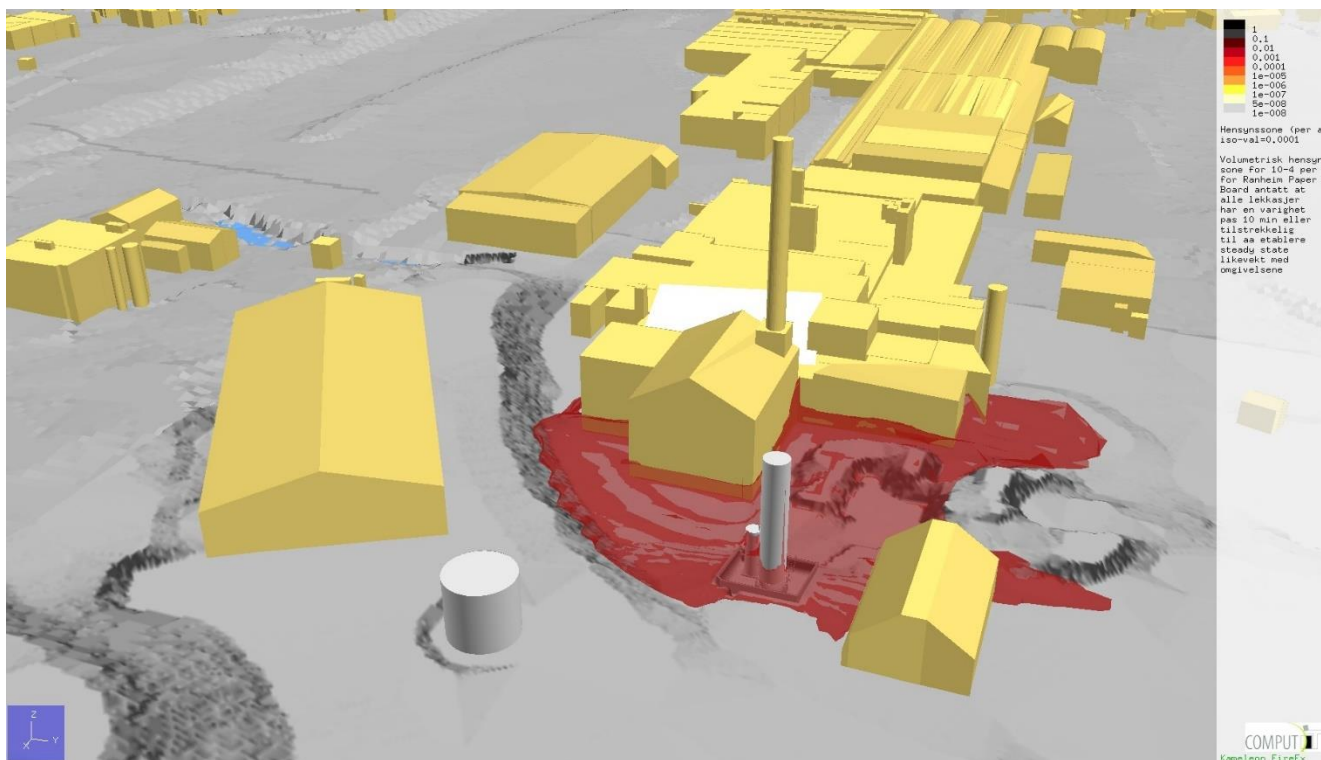
**Figur 28: Vertikale isorisk konturer for eksponering av brennbar gass. Kravet gitt av DSB er  $10^{-6}$  per år (mørk grønn farge indikerer punkter med frekvens høyere enn  $10^{-6}$  per år). Legg merke til effekten av at gassen spredes langs bakken i en avstand fra anlegget.**



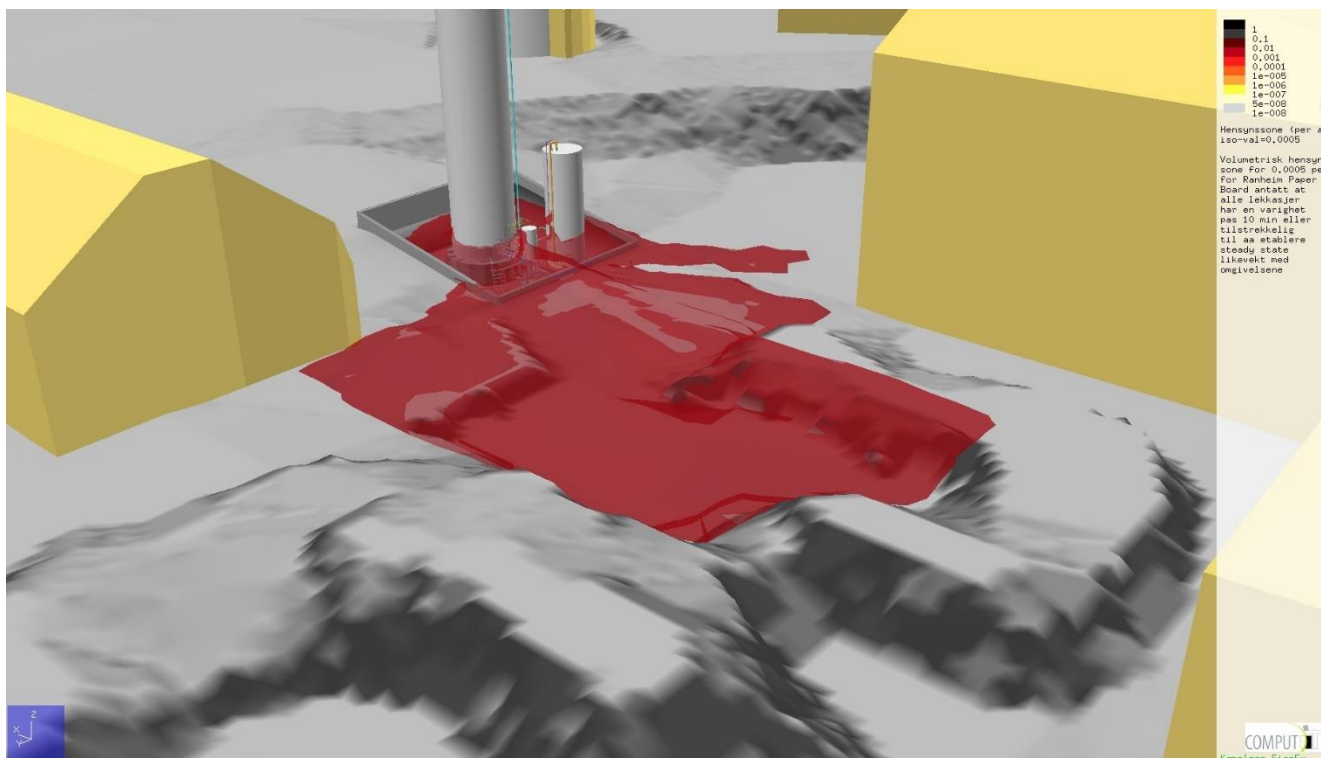
**Figur 29: 3D isorisk flate for en frekvens på  $1 \cdot 10^{-6}$  per år eller høyere for eksponering for brennbar gass. I dette tilfellet er det gitt at alle lekkasjer resulterer i steady state likevekt mellom gassky og omgivende luft. Legg merke til effekten av at gassen spredes langs bakken.**



**Figur 30: 3D isorisk flate for en frekvens på  $1 \cdot 10^{-5}$  per år eller høyere for eksponering for brennbar gass I dette tilfellet er det gitt at alle lekkasjer resulterer i steady state likevekt mellom gassky og omgivende luft. Legg merke til effekten av at gassen spredes langs bakken.**



**Figur 31: 3D isorisk flate for en frekvens på  $1 \cdot 10^{-4}$  per år eller høyere for eksponering for brennbar gass. I dette tilfellet er det gitt at alle lekkasjer resulterer i steady state likevekt mellom gassky og omgivende luft. Legg merke til effekten av at gassen spredes langs bakken.**



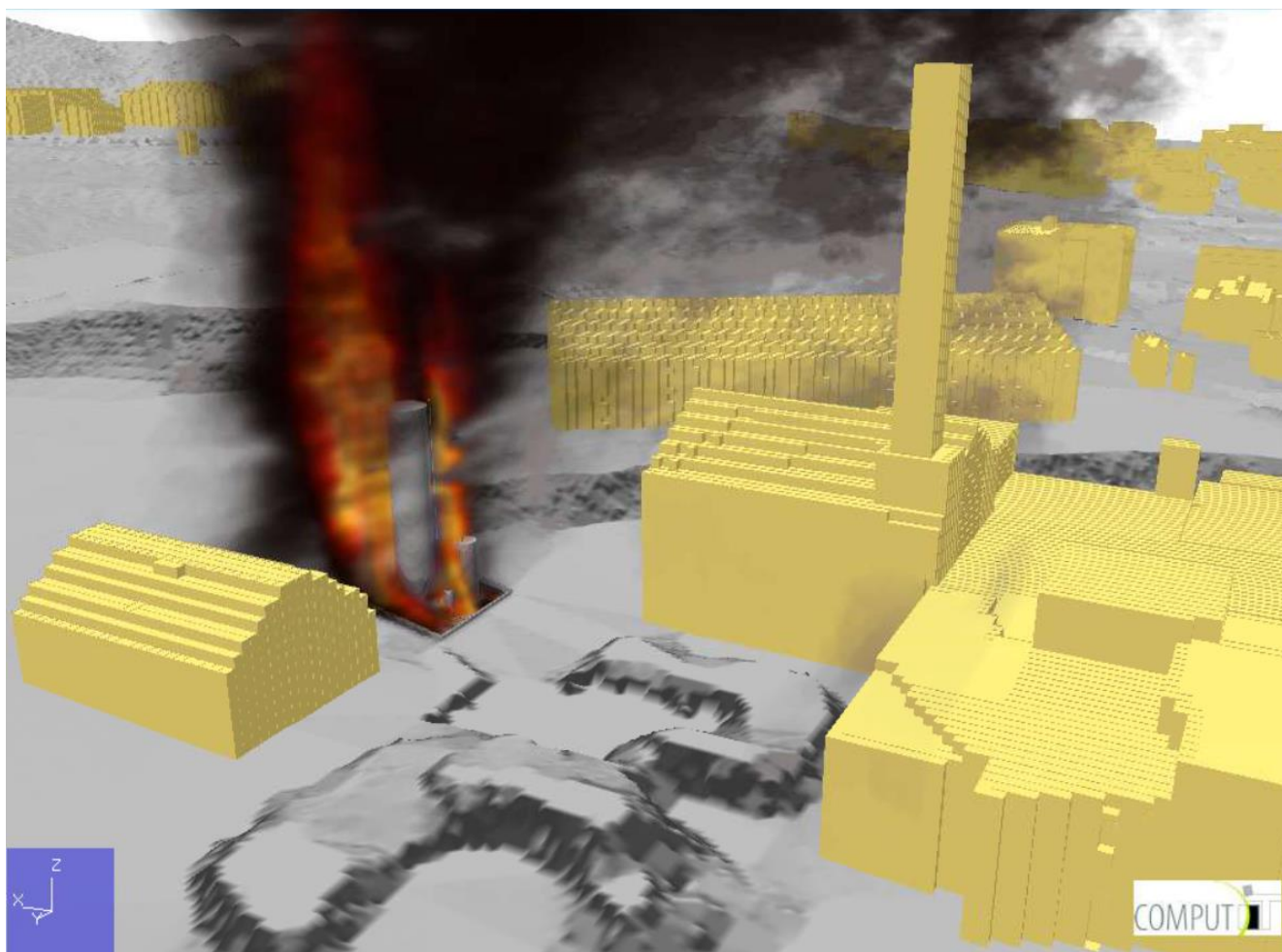
**Figur 32:** 3D isorisk flate for en frekvens på  $5 \cdot 10^{-4}$  per år eller høyere for eksponering for brennbar gass. I dette tilfellet er det gitt at alle lekkasjer resulterer i steady state likevekt mellom gassky og omgivende luft. Legg merke til effekten av at gassen spredes langs bakken.

### 7.3 Eksponering for stråling fra antent stor LNG-lekkasje

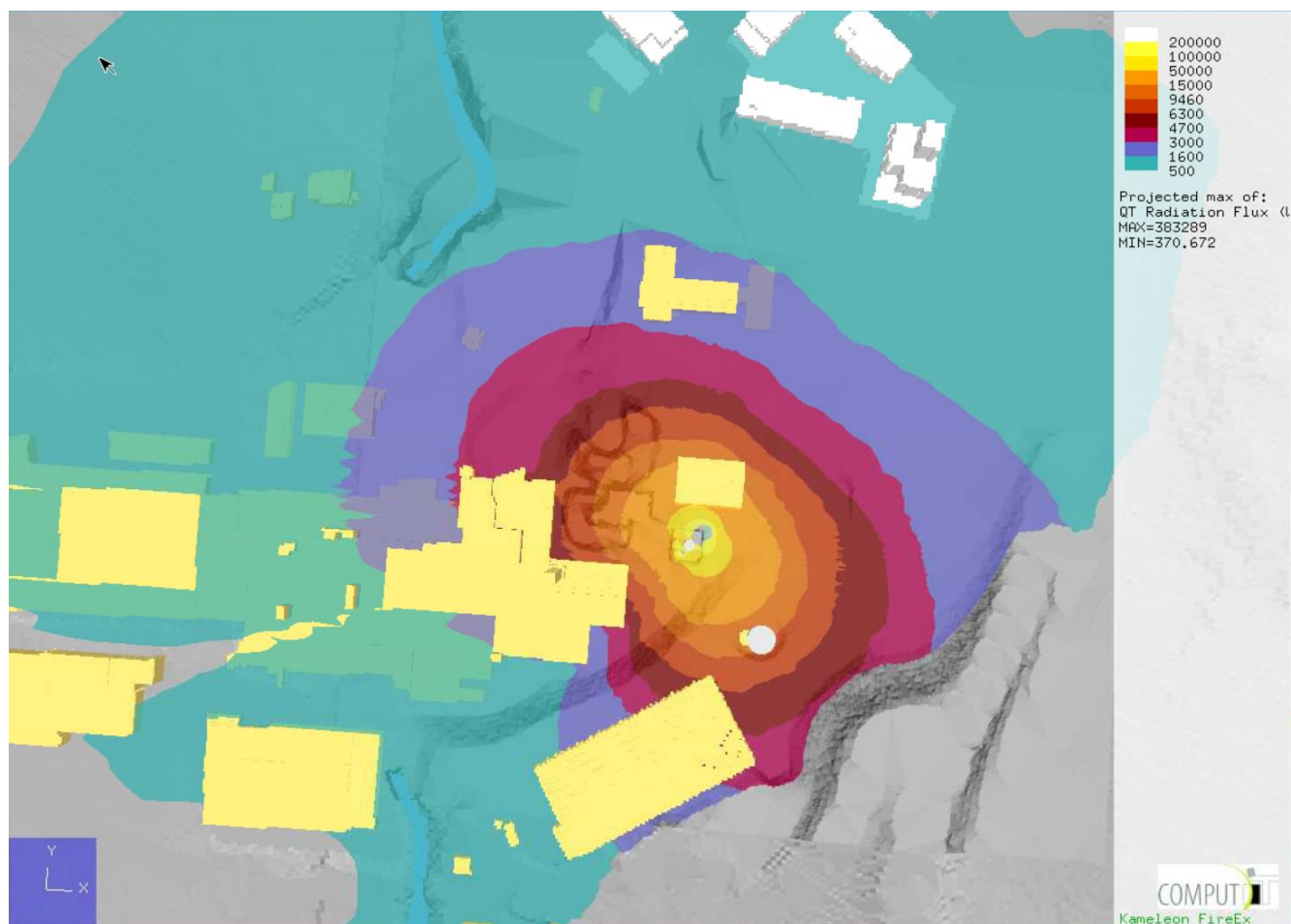
Figur 34 viser konturplott for strålingsfluks generert for antent 20 kg/s LNG spray (samme scenario som vist i Figur 16 til Figur 18). Brannen er illustrert grafisk i Figur 33. Resultat viser at de nærmeste bygningene nord for Ranheimsvegen eksponeres for strålingsflukser som er uproblematisk for mennesker å oppholde seg i. Risiko for 3. part i forhold til eksponering for uakseptable brannlaster kan følgelig neglisjeres.

Inne på anlegget vil eksponering være betydelig, og vil kunne lede til fatal eksponering av personell og antennelse av brennbart materiale på området. For å unngå eskalering bør derfor lager av papir inne på området plasseres i så god avstand som mulig fra LNG anlegget. På den annen side vurderes sannsynligheten for andre brannscenarioer på fabrikkområdet - som gir antenning av lagret papir - som betydelig høyere enn antent lekkasje knyttet til LNG-anlegget.

Reduksjon av antall lekkasjepunkt og/eller reduksjon av utstyringsdimensjon, samt tiltak for å redusere responstid, foreslått for å redusere risiko knyttet til gasspredning, vil også ha en risikoreducerende effekt på brannrisiko.



**Figur 33: Antent 20 kg/s LNG spray (samme scenario som vist i Figur 17)**



Figur 34: Strålingsfluks fra antent 20 kg/s LNG spray (samme scenario som vist i Figur 17)

## 7.4 BLEVE

Følgende er hentet fra Ref. /8/ og beskriver BLEVE som fenomen på en god måte:

«BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) opptrer normalt når en trykktank med væske lagret betydelig over kokepunktstemperaturen ved omgivelsene går til brudd. Avhengig av scenariet vil dette kunne generere betydelige varmelaster, flygende fragmenter og eventuelt trykkbølger til omgivelsene. I og med at begrepet BLEVE ofte brukes noe upresist er det imidlertid viktig å vurdere hva som faktisk kan skje ved brudd på en tank. Brudd kan enten skje ved svekkelse av tanken på grunn av branneksporing eller svikt av tanken av andre grunner uten ytre brannpåvirkning, for eksempel godstogavsporing og kollisjon. En BLEVE karakteriseres ofte som fysisk hvis eksplosjonen kun er fysisk (ekspansjon av gass som følge av faseovergang ved trykkfall) eller som kjemisk hvis kjemiske reaksjoner (brann eller eksplosjon) ytterligere bidrar til konsekvensbildet.»

Lagertanken består av en indre og ytre tank, begge produsert i stål, hvor volumet mellom tankene består av perlitt i vakuum. Forenklet kan man betegne lagertanken som en termos. For at ett innledende brannscenario, som vist i Figur 33, skal kunne resultere i en BLEVE, må varmeovergangen fra yttersiden til den indre tanken resultere i en trykkoppbygning i den indre tanken utover designkapasiteten til den indre tanken. For at dette skal skje må trykkoppbygningen være raskere enn trykkavlastningen besørget av ventilene som åpner på følt overtrykk inne i tanken.

Varmeovergang til den indre tanken kan beregnes i detalj gjennom å lage modell som reflekterer tankens design (varmeledningsevne til de ulike bestanddelene) for mulige brannscenarier (for eksempel Figur 33)). Det er vår forståelse at industripraksis er å legge til grunn at en slik tank vil bibeholde sin integritet gjennom et slikt scenario. Varmeovergang inn til det indre skallet vil være langsom, og det ytre skallet har robusthet i forhold til spenninger gitt av trykkforskjell mellom hulrom (vakuum) og omgivende atmosfære. Det er derfor vanlig å se bort fra BLEVE som scenario for denne typen tanker. For å endelig verifisere dette må det gjennomføres beregning med en detaljert modell (som angitt over), eventuelt dokumenteres av leverandør av tank.

BLEVE knyttet til tankbilen er imidlertid et mulig scenario, demonstrert gjennom historiske hendelser i Spania de siste 20 årene (Zarzalico i Murcia i 2011 og Tivissa (Tarragona) i 2002). Begge disse hendelsene var initiert av støt på grunn av kollisjon som resulterte i en antent lekkasje fra lasten. Beskrivelsen av konsekvensen ved hendelsen i Murcia indikerer akseptable ulykkeslaster for mennesker utenfor en radius på 200 meter. Hendelsene viste at tankbiler konstruert med enkelt tankskall kan være sårbare i forhold til BLEVE, og bør konstrueres med dobbeltskall og vakuum (slik som lagertanken). Det vurderes imidlertid at BLEVE knyttet til tankbilen er svært lite sannsynlig inne på anlegget. Det er lite trafikk inne på anlegget, og området er oversiktlig. Det vil videre være personell til stede under fylling som kan sette i verk tiltak. Det er også en robusthet i forhold til avstand til omkringliggende områder (avstand til nærmeste 3. part er omkring 200 meter). Dette er ikke verifisert gjennom eksplisitte beregninger da det vurderes at et slikt scenario kan sees bort fra ut fra en sannsynlighetsbetraktning. BLEVE knyttet til tankbil utgjør et betydelig mer relevant scenario under transport til anlegget, dokumentert gjennom de to ulykkene i Spania.

## 7.5 Trykkbølge ved eksplosjoner i kjelhus

Potensialet for at sent antente store lekkasjer inne i kjelhuset vil kunne gi en gasseksplosjon som utgjør en trussel for 3. part er vurdert i dette avsnittet. En gasseksplosjon kan skje ved at en brennbar gassky dannes som følge av en lekkasje inne i huset og antennes etter viss tid. En gassky kan imidlertid også dannes inne ved at gass fra en lekkasje utendørs migrerer inn i kjelhuset hvis port inn til kjelhuset er åpen (se Figur 16).

En brennbar sky vil kunne forbrennes svært hurtig. Et høyt trykk vil kunne generes i løpet av svært kort tid på grunn av hurtig frigjøring av den kjemiske energien uten at huset evner å ventilere trykket raskt nok til omgivelsene. En viktig grensebetingelse for trykket er egenskapene til vegger, vindu, dører og tak. Hvis vesentlige deler av husets bestanddeler svikter ved lavt trykk vil det forhindre oppbygning av et høyt trykk. Både vinduer og tak er tiltenkt å fungere som ventilasjonsareal i en eksplosjon, og er reflektert i vurderingen.

Både trykk og strømningsrate i fødelinjene til forbrukere er lave. Overtrykket er 0.5 barg og strømningsraten er lavere enn 0.1 kg/s. En lekkasjerate i området 0.1 - 1 kg/s vil kunne generere en stor sky inne i huset om den forblir udetektert over en lang tidsperiode. Etter en viss tid vil lekkasjeraten konvergere mot forbruksraten idet reservoaret inne systemet vil tømmes (volum i rørføringer mellom stengeventiler).

Det er to detektorer inne i kjelhuset som vil varsle fyrbøteren, som dermed vil kunne initiere nødstop. To detektorer gir imidlertid begrenset dekning, og en relativt stor sky vil kunne bygges opp uten at detektorene eksponeres. Det vurderes for øvrig som lite sannsynlig at en sky som fyller store deler av kjelhuset ikke vil detekteres. Dette vil kreve en stor lekkasje, som vil både medføre driftsmessige forstyrrelser i tillegg til at en eller to av detektorene med stor sannsynlighet vil bli eksponert for gass.

Men antennelse kan også skje lenge etter at anlegget er nedstengt, idet det til ta noe tid å ventilere ut gassen fra huset.

Utstyr inne i kjelhuset er ikke Ex-sikkert, og det er stor sannsynlighet for at antenning vil kunne skje etter en viss tid. På grunn av den høye antennelsessannsynligheten kan det argumenteres for at en lekkasje vil antennes relativt raskt etter lekkasjestart, og dermed redusere muligheten for oppbygning av en stor sky inne i kjelhuset.

En detaljert analyse av gasspredningsforløp og antennelsesrisiko (gjennom modellering av tennkildene i rommet) inne i kjelhuset ville kaste lys over hvor store skyer som vil kunne dannes, og dermed danne grunnlag for å vurdere behov for tiltak. Det relevante tiltaket for å bringe risiko til et lavere nivå ville vært å installere flere detektorer for å redusere tid til deteksjon. Det er imidlertid ikke nødvendig å gjennomføre en slik detaljert analyse for å forstå risiko knyttet til 3. part. Det er god avstand til nærmeste 3. part, og ved å analysere et verste tenkelig eksplosjonsscenario vil potensialet for kritisk eksponering av 3. part kunne vurderes.

En eksplosjonsberegning med KFX<sup>TM</sup>-EXSIM har blitt gjennomført for en svært stor gassky inne i kjelhuset. Dette for å vurdere om det er et potensial for at sent antente store lekkasjer inne i kjelhuset vil kunne utgjøre en trussel for 3. part. Følgende danner rammen for eksplosjonsscenarioet som er kjørt:

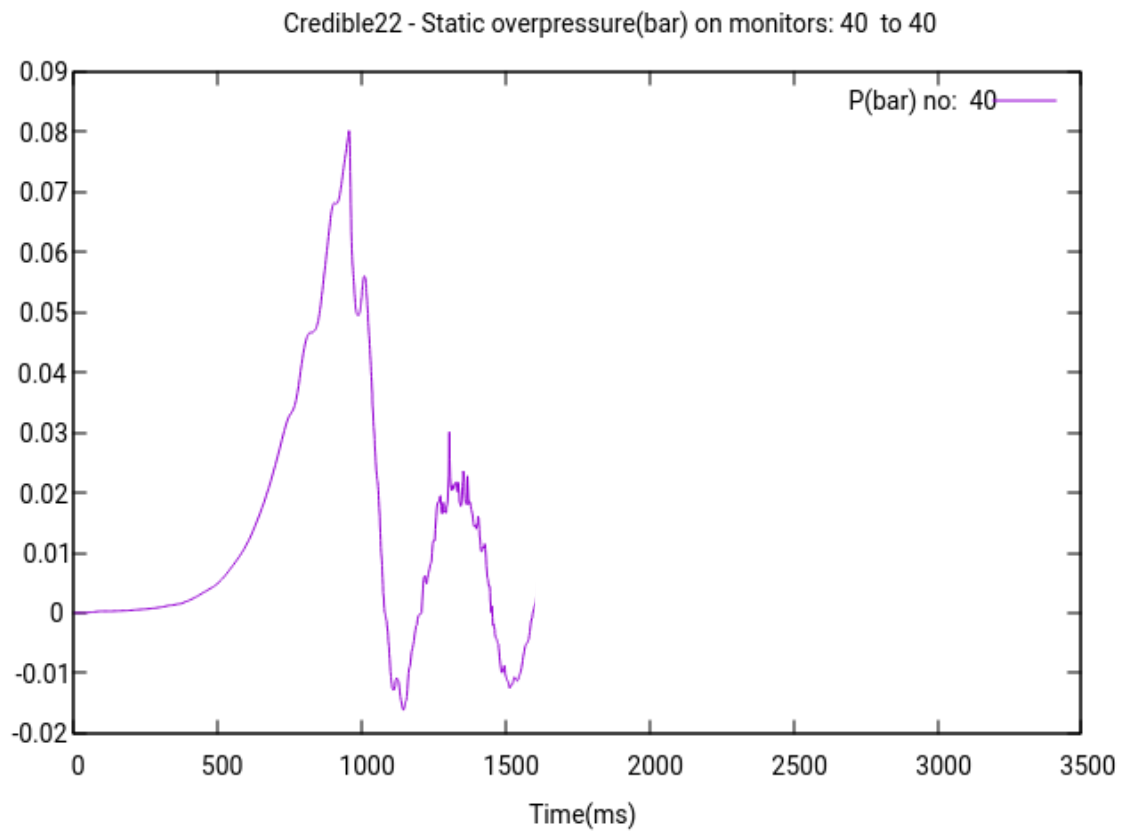
- vinduer i front av bygningen er antatt å kollapse ved et overtrykk på 0.03 barg. Dette er konservativt fordi det vil forsinke start av ventilering av trykk. Den mest sannsynlige verdien ligger i området 0.01 – 0.02 barg.
- Takplatene er antatt å gi etter ved et trykk på 0.08 barg. Det er også vurdert som konservativt.
- Skystørrelsen ved antennestidspunktet er satt til omkring 25% av kjelhusets totale volum og med en konsentrasjon litt høyere enn støkiometrisk. Dette tilsvarer en masse metan på et par hundre kg. Dette er en skystørrelse som er svært stor, og vil bare kunne dannes ved et brudd på tilførselslinjer og etter at lekkasjen har fått stått udetektert i lang tid.

Resulterende trykk inne i huset er illustrert i Figur 35. Resultat viser at det maksimale trykket balanserer trykket som taket er antatt å kollapse ved. Figur 36 og Figur 37 viser flammer som slikker ut av åpninger av huset (vinduer og tak svikter ved hhv. 0.03 og 0.08 barg overtrykk). Figur 38 viser trykkbølgen som forlater eksplosjonen etter at det meste av gassen er forbrent.

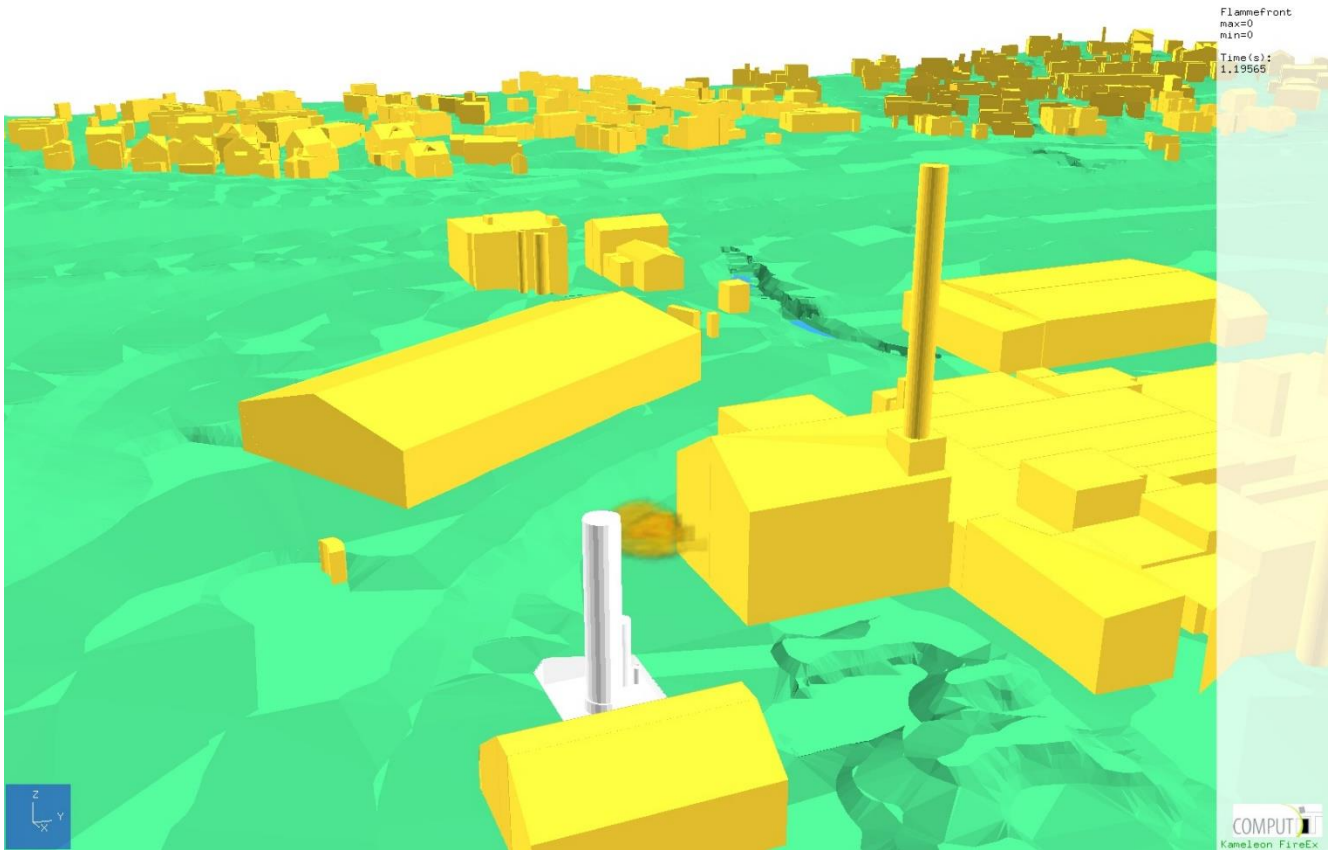
For å vise hvordan trykket propagerer ut i omgivelsene er multi-energi-metoden brukt (Ref. /6/). Dette fordi å gjennomføre en simulering av trykkbølgen er svært tidskrevende. Multi-energi-metoden er en anerkjent metode for ekstrapolasjon av trykkbølgen gitt et kjent eksplosjonstrykk i kilden (i vårt tilfelle beregning med KFX<sup>TM</sup>-EXSIM av antent gassky i kjelhuset). Resultatet viser at eksplosjoner inne i kjelhuset ikke vil kunne medføre kritisk skade på 3. part bygninger. Den menneskelige toleranseverden for trykk er høyere enn 0.1 barg. For mennesker utenfor eksplosjonen er fragmenter som dannes under eksplosjonen mest kritisk. Fragmenter vil kun være relevant i nærsone, dvs. i umiddelbar nærhet av kjelhuset.

Inne på anlegget vil eksplosjonen kunne medføre vesentlige skader. Det er rimelig å anta at en slik katastrofal hendelse vil kunne medføre fataliteter inne på anlegget. For personell som befinner seg inne i kjelhuset vil hendelsen være dødelig. Sannsynligheten for en slik hendelse vil imidlertid være svært lav, men er ikke estimert i detalj. Det vurderes at frekvensen ligger godt under  $1 \cdot 10^{-5}$  per år, noe som tilsvarer en svært lav FAR-verdi. FAR-verdi for arbeidere i bygg- og anleggsbransjen i Norge er en faktor 100 høyere enn dette.

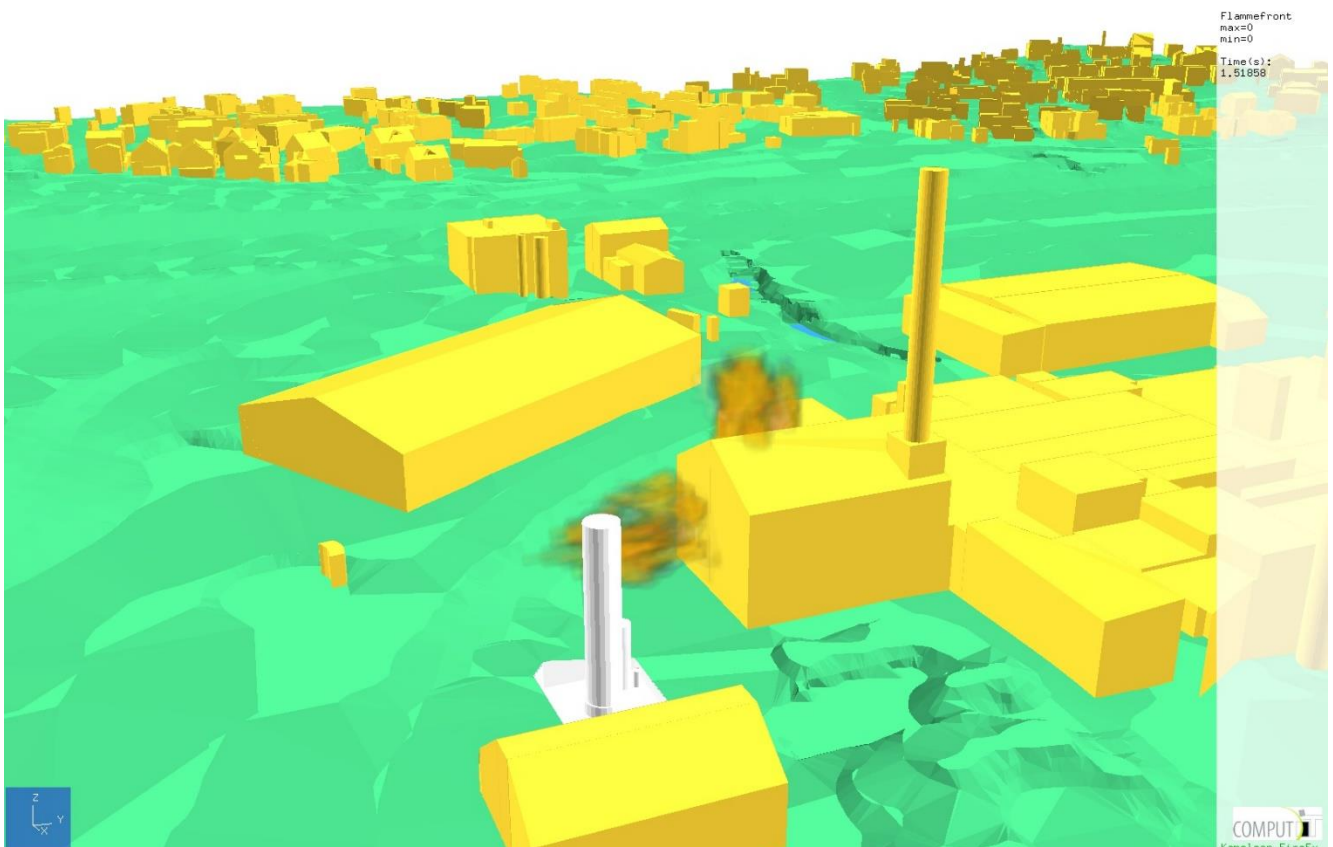




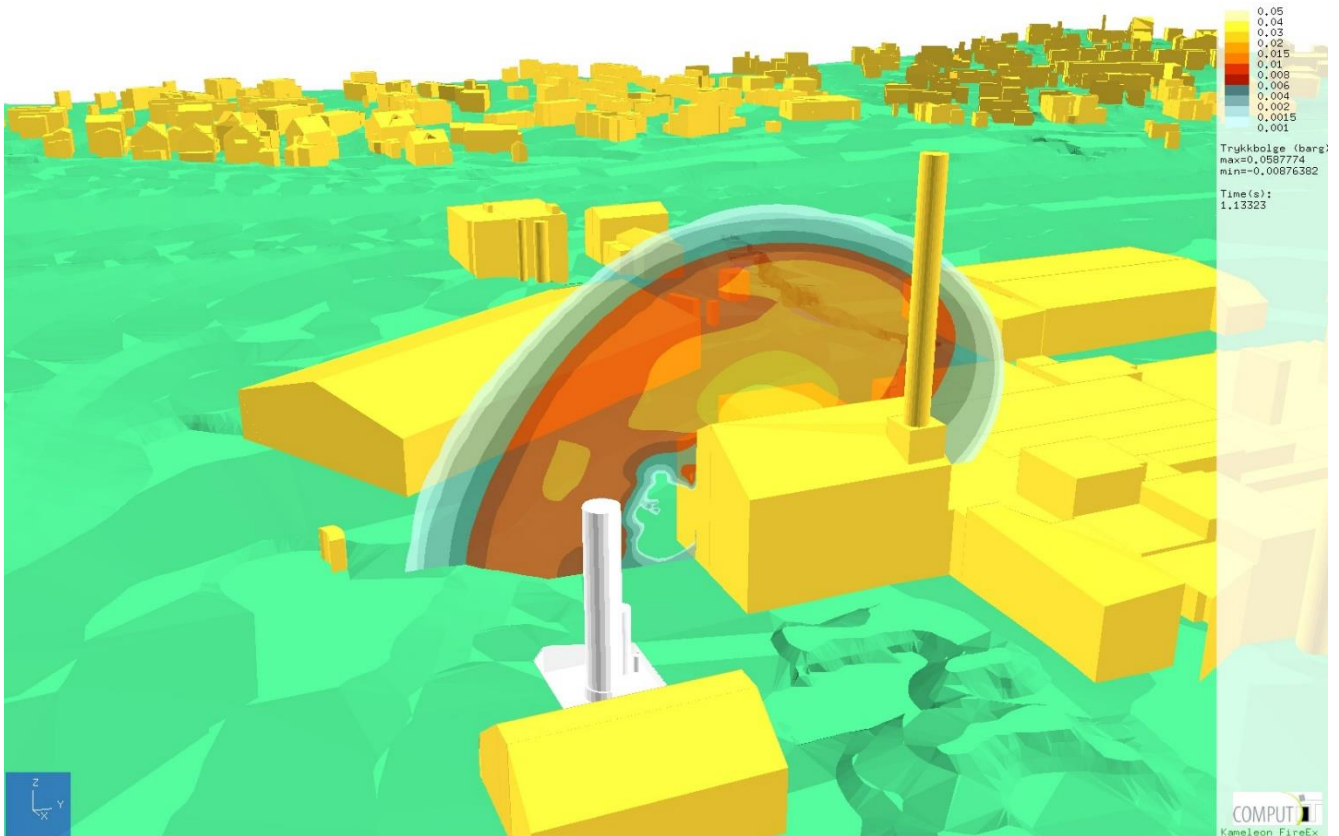
Figur 35: Simulering med KFX<sup>TM</sup>-EXSIM: trykkpuls inne i kjelhuset for et verste eksplosjonsscenario.



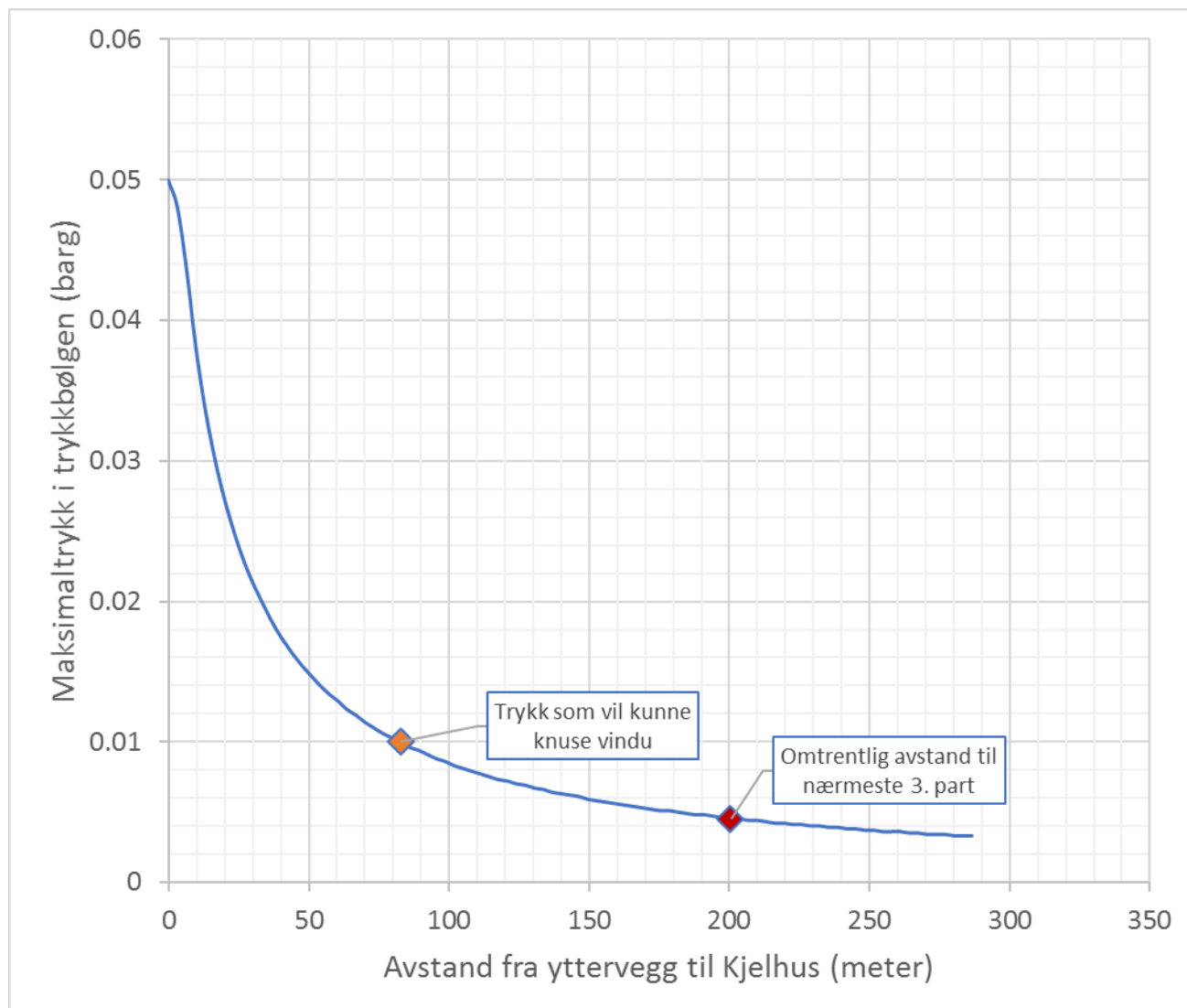
**Figur 36: Simulering med KFX™-EXSIM: bilde som viser flammer som slikker ut av to vinduer som kollapser som følge av at trykk inne i huset overstiger 0.03 barg. Dette skjer i tidlig fase av eksplosjonen. Senere kollapser alle vinduene.**



**Figur 37: Simulering med KFX™-EXSIM: bilde som viser flammer som slikker ut av ødelagte vinduer og tak som følge av at trykk inne i huset overstiger integriteten til objektene (hhv. 0.03 og 0.08 barg).**



**Figur 38: Simulering med KFX™-EXSIM: trykkbølge som forlater eksplosjonen etter at forbrenningshastigheten faller under lydshastigheten. Trykket i bølgen er omkring 0.01 barg 20-30 meter unna huset.**



Figur 39: Ekstrapolasjon av trykkbølgen ved bruk av multi-energy metoden.

## 7.6 Eksplosjon som følge av antent gass i friluft

Det bemerkes at eksplosjonstrykk også vil kunne genereres ved antennelse av LNG gassky (som vist i Figur 16, Figur 17 og Figur 18) om det er objekter inne i skyen som kan generere turbulens. Ulykken på Buncefield oljelager i Hemel Hempstead i England i 2005 demonstrerte at svært høye trykk kan oppstå som følge av turbulent forbrenning forårsaket av vegetasjon. Det anbefales at området ryddes for eventuell vegetasjon som kan generere turbulens.

## 8 Konklusjon

Overordnet er konklusjon er at estimerte hensynsoner er innenfor kriterium definert av DSB. Beregningen viser at brennbar gass kun vil kunne eksponere områder utenfor fabrikkområdet i ekstreme tilfeller. Frekvensen for eksponering av det mest sårbare området, det vil si nord for Ranheimsvegen, er lavere enn  $10^{-6}$  per år, som er under definert kriterium. Resultatet viser at brennbar gass i de aller fleste lekkasjetilfeller vil fanges opp av fangdammen eller vil legge seg i området for fyllingene nordøst for anlegget.

Kriteriene for hensynssoner er beskrevet av DSB i dokumentet «Sikkerheten rundt anlegg som håndterer brannfarlige, reaksjonsfarlige, trykksatte og eksplosjonsfarlige stoffer. Kriterier for akseptabel risiko». Kriteriet sier at området utenfor anleggets eiendomsgrenser ikke skal utsettes for en uakseptabel konsekvens hyppigere enn 1 gang per million år, og fanger opp at risiko er et begrep som beskriver hyppigheten for en uønsket konsekvens. Dette er et svært lavt nivå som ivaretar at den risiko man utsettes for fra anlegget er lavere eller på nivå med andre aktiviteter en typisk norsk borger utsettes for i løpet av et livsløp. Nivået satt av kriteriet er imidlertid svært mye lavere sammenlignet direkte med den risiko man er eksponert for til daglig, for eksempel en dagligdags aktivitet som bilkjøring.

## 9 Risikoreducerende tiltak

Selv om risiko er akseptabel i henhold til toleransekriteriene, bør tiltak vurderes for å bringe risiko til et lavere nivå. Dette som et ledd i bedriftens systematiske arbeid med å finne sikkerhetstekniske forbedringer i henhold til ALARP prinsippet (arbeide systematisk med å bringe risiko ned til et så lavt nivå som mulig innenfor motsvarende rimelige rammer for investering).

Effektive tiltak som kan vurderes for å redusere eksponering av omgivelsene for brennbar gass er som følger:

- Se på om antall lekkasjepunkt som kommuniserer med væskeside i LNG tankvolum og ikke kan isoleres med stengeventil kan reduseres, samt vurdere reduksjon av utstyrsdimensjon (f.eks. redusere dimensjon fra DN50 til DN40 eller DN32).
- Installere gassdetektorer i fangdammen og flere detektorer inne i kjelhus for å redusere responstiden for nedstengning av anlegget. Det er et betydelig potensial for risikoreduksjon knyttet til lekkasjer som er på isolerbar side i forhold til tankvolum.
- I en eventuell fremtidig situasjon med kortere avstand til 3. part vil eksponering for brennbar gass kunne reduseres ved å implementere en fysisk vertikal barriere mellom LNG-anlegget og 3. part. Det demonstreres godt av effekten av fyllingene som ligger nordøst for LNG-anlegget. I tilknytning til et eventuelt fremtidig prosjekt inne på anleggsområdet mellom LNG anlegget og Ranheimsvegen anbefales at det sees nærmere på og installeres en fysisk barriere mot nord-nordvest.

Simuleringer av et verste branntilfelle, samt et verste eksplosjonsscenario i kjelhuset, viser at antente scenarioer ikke vil kunne utgjøre en trussel for 3. part (områder utenfor fabrikkområdet). Tiltak bør imidlertid vurderes for å redusere risiko for eksponering av personell og tap av økonomiske verdier inne på anlegget. Det er særlig et forbedret gassdeteksjonssystem som er relevant å vurdere idet det vil redusere tid til nedstengning av anlegget. Det vil redusere sannsynlighet for at scenarioet vil antenne samt utstrekning av initiell gassbrann/eksplosjon hvis antent.

Eksplisjonsstrykk vil kunne generes ved antennelse av LNG gassky dannet i friluft om det er objekter inne i skyen som kan generere turbulens. Ulykken på Buncefield oljelager i Hemel Hempstead i England i 2005 demonstrerte at svært høye trykk kan oppstå som følge av turbulent forbrenning forårsaket av vegetasjon. Det anbefales at området ryddes for eventuell vegetasjon som kan generere turbulens ved lekkasjer av LNG.

Til sist påpekes at beskrevne scenarier må være innlemmet i beredskapsplan for anlegget. Selv om sannsynligheten for en ulykke er svært lav er det viktig at aktørene er kjent med riktig og effektiv respons om ulykken materialiserer seg.

## 10 Referanser

- /1/ Epost fra Magne Solberg, Ranheim P&B, til Ingar Fossan, ComputIT, datert 13. januar 2017.
- /2/ Lloyd's Register Consulting: "Process leak for offshore installations frequency assessment model – PLOFAM", report no: 105586/R1, Rev: Final B, Date: 18.03.2016
- /3/ Shell Global Solutions (US) Inc.: "LNG Hose Failure Probability", B.A. Otis (PTS/TPTS), SR.14.11417
- /4/ Lloyd's Register: "Modelling of ignition sources on offshore oil and gas facilities - MISOF", report no: 106364/R1, Rev: Final, Date: 25.11.2016.
- /5/ National Institute of Public Health and the Environment (RIVM): "Reference Manual Bevi Risk Assessments", version 3.2.
- /6/ A.C. van den Berg: "The multi-energy method: A framework for vapour cloud explosion blast prediction", Journal of Hazardous Materials, Volume 12, Issue 1, December 1985, Pages 1-10.
- /7/ DSB: «Sikkerheten rundt anlegg som håndterer brannfarlige, reaksjonsfarlige, trykksatte og eksplosjonsfarlige stoffer. Kriterier for akseptabel risiko», Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) 2012, ISBN 978-82-7768-310-2.
- /8/ Lloyd's Register: «Retningslinjer for kvantitative risikovurderinger for anlegg som håndterer farlig stoff», Rapport nr. 106535/R1, Eksternt høringsutkast, datert 12. april 2017.