

BERGEN – 26.09.2008  
Ref. nr.: GexCon-08-F45543-Å-1  
Rev.: 02

**cmr** Gexcon



## RAPPORT

# Ulykkesgranskning etter eksplosjon ved Vest Tank på Sløvåg industriområde

Revisjon 02 – Åpen Anonymisert Versjon

Oppdragsgivere:

Hordaland politidistrikt, KRIPOS og DSB

Forfattere:

T. Skjold, K. van Wingerden, R. Abiven & Ø. Larsen



**Dokumentinformasjon**

Forfattere:

Trygve Skjold  
Kees van Wingerden  
Ronan Abiven  
Øystein Larsen

Klassifisering:

Åpen (Å)

Tittel:

**Ulykkesgranskning etter eksplosjon ved Vest Tank på Sløvåg industriområde**

Sammendrag:

Rapporten oppsummerer GexCon's ulykkesgranskning etter eksplosjonen som fant sted ved tankanlegget til Vest Tank AS på Sløvåg industriområde like før klokken 10:00 den 24. mai 2007. Omfanget av arbeidet er begrenset til å avdekke mulige direkte årsaker til at ulykken fant sted, samt å vurdere plausible hendelsesforløp i lys av ulykkens omfang, fysiske og kjemiske lovmessigheter, vitneobservasjoner, og et litteraturstudium som belyser liknende hendelser. Kapittel 7 oppsummerer hovedkonklusjonene, et plausibelt hendelsesforløp, og en del generelle anbefalinger for å bedre sikkerheten på liknende tankanlegg.

**Prosjektinformasjon**

Oppdragsgivere:

Hordaland politidistrikt, KRIPOS og DSB

Oppdragsgivers ref.:

0723.11705

GexCon prosjektnummer:

45543

GexCon prosjektnavn:

Granskning eksplosjon Sløvåg

**Revisjon**

Rev.:	Dato:	Forfattere:	Kontrollert av:	Godkjent av:	Årsak til revisjon:
00	31.10.2007	Trygve Skjold Kees van Wingerden Ronan Abiven Øystein Larsen	Jan Roar Bakke Olav Roald Hansen Bergitte Reiersen	Øystein Larsen	Konfidensiell versjon av rapporten til intern bruk for oppdragsgivere.
01	31.10.2007	Trygve Skjold Kees van Wingerden Ronan Abiven Øystein Larsen	Jan Roar Bakke Olav Roald Hansen Bergitte Reiersen	Øystein Larsen	Åpen versjon av rapporten for offentliggjøring: navn på vitner utelatt, ellers identisk med rev. 00.
02	26.09.2008	Trygve Skjold Kees van Wingerden Ronan Abiven Øystein Larsen	Jan Roar Bakke Olav Roald Hansen Bergitte Reiersen	Øystein Larsen	Modifisert versjon av rev. 01, med oppdatert referanseliste, utstedt i forbindelse med den engelske oversettelsen.
03	26.09.2008	Trygve Skjold Kees van Wingerden Ronan Abiven Øystein Larsen	Brian Wilkins	Øystein Larsen	Engelsk oversettelse av den åpne modifiserte versjonen av rapporten (rev. 02).

# Innholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Innledning .....</b>	<b>4</b>
1.1	Bakgrunn .....	4
1.2	Grunnleggende begreper .....	4
1.3	Ulykken .....	6
1.4	Arbeidets omfang .....	12
<b>2</b>	<b>Litteraturstudie .....</b>	<b>14</b>
2.1	Eksplosjoner i atmosfæriske lagringstanker .....	14
2.2	Ulykkeshistorikk og relevante forskningsresultater .....	16
<b>3</b>	<b>Systembeskrivelse og hendelsesforløp .....</b>	<b>18</b>
3.1	Tankanlegget forut for ulykken .....	18
3.2	Hendelsesforløpet under selve ulykken .....	21
3.3	Værdata og kart .....	30
<b>4</b>	<b>Fysisk eksplosjon .....</b>	<b>32</b>
<b>5</b>	<b>Dannelse av eksplosiv atmosfære .....</b>	<b>34</b>
5.1	Brennbart materiale inne i tank T3 .....	34
5.2	Dannelse av eksplosiv atmosfære inne i tank T3 .....	40
5.3	Dannelse av eksplosiv atmosfære utenfor tank T3 .....	43
<b>6</b>	<b>Potensielle tennkilder .....</b>	<b>51</b>
6.1	Mulige tennkilder inne i tank T3 .....	51
6.1.1	Elektrostatisk utladning inne i tank T3 .....	51
6.1.2	Selvantennelse i luftfilter med aktivt kull .....	54
6.1.3	Øvrige tennkilder inne i tank T3 .....	60
6.2	Potensielle tennkilder utenfor tank T3 .....	60
<b>7</b>	<b>Konklusjoner .....</b>	<b>61</b>
7.1	Hovedkonklusjoner .....	61
7.2	Hendelsesforløp .....	62
7.3	Anbefalinger .....	63
	<b>Referanseliste .....</b>	<b>64</b>
	<b>Kjemiske symboler .....</b>	<b>67</b>
	<b>Forkortelser .....</b>	<b>67</b>

# 1 Innledning

Litt før klokken 10 om formiddagen torsdag 24. mai 2007 eksploderte en lagringstank på tankanlegget til Vest Tank AS på Sløvåg industriområde i Gulen kommune i Sogn og Fjordane. Denne rapporten beskriver resultatene fra en ulykkesgranskning som GexCon AS har utført for Hordaland politidistrikt, KRIPOS og DSB i etterkant av ulykken. Dette kapitlet er en generell innledning til problemstillingene som behandles i øvrige deler av rapporten. Avsnitt 1.1 beskriver bakgrunnen for arbeidet, avsnitt 1.2 introduserer noen fundamentale begreper knyttet til branner og eksplosjoner, avsnitt 1.3 inneholder en enkel beskrivelse av tankanlegget til Vest Tank AS på Sløvåg industriområde samt en oppsummering av ulykken 24. mai 2007, og avsnitt 1.4 gir en oversikt over arbeidets omfang og innholdet i øvrige deler av rapporten.

## 1.1 Bakgrunn

Arbeidets omfang og mandat er definert i et oppdragsbrev fra Politiet (Politiet ref. 0723.11705a, 2007). Forøvrig vises det til oppstartsmøtet avholdt i GexCon's lokaler på Fantoft fredag 6. juli 2007, samt prosjektmøtet avholdt på Politihuset i Hordaland torsdag 13. september.

## 1.2 Grunnleggende begreper

Før selve ulykken beskrives i neste delkapittel, er det hensiktsmessig å klargjøre en del generelle begreper som er sentrale for vurderingen av hendelsesforløpet som fant sted på Sløvåg.

I en **brann** frigjøres kjemisk bundet energi ved såkalt uforblandet forbrenning når brensel og oksidant blandes og reagerer i flammesonen. Figur 1-1 viser den såkalte *branntrekanten* som ofte benyttes for å illustrere de tre faktorene som må være tilstede for at en brann skal oppstå:

- Brensel: brennbart materiale, enten fast stoff, væske eller gass.
- Oksidant: som regel oksygen fra lufta.
- Tennkilde: opphavet til energien som setter i gang en selvforplantende forbrenningsreaksjon.

Fordi blandingsprosessen i flammesonen er relativt langsom kan forbrenningsproduktene fra en brann som regel unnsnippe uten at det bygges opp vesentlig høye overtrykk i systemet.

I motsetning til en brann forbindes en **eksplosjon** generelt med at oppsamlet energi frigjøres i løpet av så kort tid at det dannes en trykkbølge. Basert på kilden til den oppsamlede energien er det vanlig å skille mellom tre hovedtyper av eksplosjoner:

- Fysiske eksplosjoner.
- Kjemiske eksplosjoner.
- Kjernefysiske eksplosjoner (har ingen relevans i denne sammenhengen).

Et eksempel på en **fysisk eksplosjon** er når en lukket beholder med komprimert gass revner som følge av for høyt innvendig trykk i forhold til styrken på beholderen. Det høye trykket kan for eksempel skyldes materiale som tilføres utenfra (overfylling), produksjon av gass fra materiale som befinner seg inne i beholderen (for eksempel fra faseoverganger eller kjemiske reaksjoner), og/eller ekspansjon av gassen inne i beholderen som følge av oppvarming. Eventuell oppvarming og/eller fordampning kan være et resultat av kjemiske reaksjoner som finner sted i en væskefase eller for eksempel ekstern brannlast. Et grensetilfelle oppstår dersom trykkøkningen skyldes forbrenningsreaksjoner som finner sted inne i beholderen, og for slike hendelsesforløp benyttes som regel begrepet kjemisk eksplosjon (se neste avsnitt). Tretthetsbrudd, korrosjonsskade og nedsatt materialstyrke som følge av

oppvarming er alle eksempler på forhold som kan føre til at beholderen ryker ved betydelig lavere trykk enn det opprinnelige designtrykket. For en beholder som er fullstendig lukket er det ikke nødvendig at trykket stiger spesielt hurtig for at det skal bli en fysisk eksplosjon, men dersom oppvarmingen og/eller faseovergangen er tilstrekkelig hurtig kan det bli en fysisk eksplosjon selv om beholderen ikke er fullstendig lukket. Et eksempel på en fysisk eksplosjon i et relativt åpent system er en såkalt vanddampeksplasjon som oppstår dersom vann eller is tømmes ned i et bad av smeltet metall slik at vannet fordampes i løpet av så kort tid at det oppstår høye overtrykk i den ekspanderte dampfasen.



**Figur 1-1** Branntrekanten (til venstre) og eksplosjonsfemkanten (til høyre) illustrerer de ulike kriteriene som normalt må være oppfylt for å realisere henholdsvis en brann og en kjemisk eksplosjon.

En **kjemisk eksplosjon** forbindes som regel med *forblandet forbrenning*; Figur 1-1 viser den såkalte *eksplosjonsfemkanten* som illustrerer de fem kriteriene som normalt må være oppfylt for at det skal bli en slik eksplosjon:

- Brensel: et brennbart materiale, enten gass, væsketåke, støvpartikler eller eksplosiver,
- Oksidant: som regel oksygen fra lufta (et *eksplosiv* inneholder både brensel og oksidant),
- Blanding: blandingsforholdet mellom brensel og oksidant må ligge innenfor visse grenser,
- Tennkilde: opphavet til energien som setter i gang en selvforplantende forbrenningsreaksjon, og
- En viss grad av innestenging, avhengig av reaktiviteten til den eksplosive blandingen.

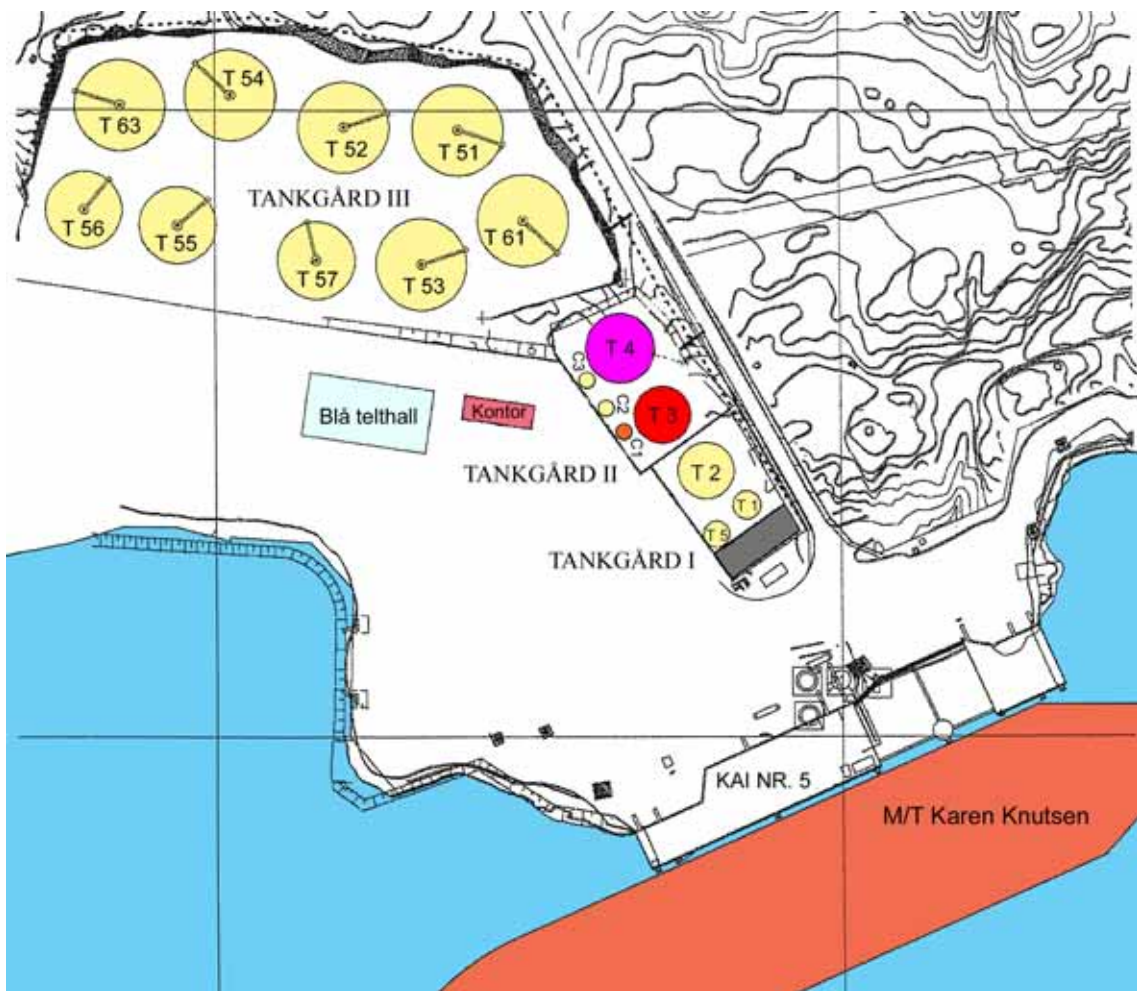
Fordi flammen i dette tilfellet forplanter seg gjennom en ferdig blanding av brensel og oksidant kan de kjemiske reaksjonene finne sted svært hurtig, og det kan derfor bygges opp høye trykk selv med relativt begrenset grad av innestenging. Forblandet flammeforplantning er kun mulig dersom blandingsforholdet mellom brensel og oksidant ligger innenfor visse konsentrasjonsgrenser:

- Nedre flammegrense, eller LFL fra engelsk 'Lower Flammability Limit', og
- Øvre flammegrense, eller UFL fra engelsk 'Upper Flammability Limit'.

Det er primært termisk ekspansjon av forbrenningsproduktene som følge av frigjort kjemisk energi (eksoterme reaksjoner) som forårsaker trykkøkningen i kjemiske eksplosjoner. Effekten av tennkilden er normalt begrenset til et lite volum av blandingen, og så lenge flammen forplanter seg utover fra tennpunktet vil volumet av eksplosiv blanding som konsumeres per tidsenhet øke raskt. I et forholdsvis lukket system vil derfor også trykkstigningshastigheten øke stadig raskere. Ekspansjonen vil i de fleste tilfeller også føre til turbulente strømningsforhold i den uforbrente blandingen som flammefronten beveger seg inn i, og dermed vesentlig raskere forbrenning som følge av økt masse- og varmetransport i flammesonen. Den positive tilbakekoplingen mellom økt turbulensintensitet og hurtigere forbrenning gjør at flammen akselererer, og trykket øker enda fortere.

### 1.3 Ulykken

Vest Tank AS holder til på Sløvåg industriområde i Gulen kommune i Sogn og Fjordane. Bedriften mottar og behandler oljeholdig/forurenset vann fra skip og offshorevirksomhet. Figur 1-2 illustrerer i grove trekk hvordan tankanlegget til Vest Tank så ut før ulykken 24. mai 2007. Den første eksplosjonen fant sted i tank T3 like før klokken 10 på formiddagen, og etterfølgende eksplosjoner og branner var hovedsakelig begrenset til Tankgård II, kontorbygget samt kjøretøyer plassert i nærheten. Ingen personer omkom i ulykken, men minst 2 personer mottok legebehandling som følge av skader de pådro seg under hendelsesforløpet. Nedenfor beskrives foranledningen for ulykken, og i grove trekk hvordan hendelsen eskalerte fra en første eksplosjon til et omfattende brannscenario. Forøvrig henvises det til Kapittel 3 for ytterligere detaljer vedrørende tankanlegget og hendelsesforløpet forut for og under ulykken.



**Figur 1-2** Illustrasjon av tankanlegget til Vest Tank forut for ulykken 24. mai 2007. Den første tanken som eksploderte var T3, og noe senere eksploderte også T4 og C1. Illustrasjonen er laget med utgangspunkt i tegning 3124-T-L-8 ('Sløvåg bunkringsanlegg tank kapasiteter' fra Bergen Engineering, rev. 1, 22.05.05). Merk at plasseringen av tankene C1-C3 er omtrentlig basert på en modifisert versjon av den originale tegningen: rev. 2, 31.05.2007 fra 'Foreløpig Uhellrapport', Vest Tank AS (Berland, 2007). Tankeren M/T Karen Knutsen lå til kai ved anlegget, men i figuren er det ikke tatt hensyn til reelle dimensjoner eller nøyaktig plassering av tankskipet.

I tiden forut for ulykken hadde Vest Tank AS behandlet (renset) et oljeprodukt kalt 'coker gasoline' (Pemex, 2005), som er en vanlig bestanddel i bensin (i vitneavhør omtales dette produktet også som 'nafta', 'bensin', 'naftabensin', 'lettbensin' eller 'blended gasoline'). Denne aktiviteten hadde pågått fra oktober 2006 til mars 2007, og i denne perioden hadde i alt 6-7 tanklaster à ca. 32 000 m<sup>3</sup> 'coker gasoline' blitt behandlet. Rengjøring av en tankbåtlast tok typisk 5-7 dager med døgntkontinuerlig rensing i de to tankene T3 og T4 (se Figur 1-2). Hensikten med behandlingen var å redusere innholdet av svovelholdige komponenter, spesielt merkaptaner (tioler). Rensingen foregikk ved at urensset 'coker gasoline' fra tankskip ble overført til tankene på land, og samtidig blandet med en natriumhydroksidløsning (30% NaOH løst i vann). Figur 1-3 viser luttanken og slangene som ble benyttet under pumpingen. Merkaptaner er relativt polare forbindelser, og løste seg derfor lettere i den polare NaOH-løsningen, sammenliknet med den mindre polare væsken 'coker gasoline'.

Etter en tids resirkulering av innholdet på tankene lot man væskefasene skille seg ved at den tyngre NaOH-løsningen med løste svovelforbindelser og bunnfall/slam samlet seg i bunnen av tanken, mens det lettere laget med rensset 'coker gasoline' fløt oppå og kunne pumpes tilbake til tankskipet. Andelen av urenheter som ble fjernet fra 'coker gasoline' på denne måten var relativt liten, og bare ca. 0,15 % av en typisk last ble igjen i tankene på Vest Tank. For 6 tanklaster à 32 000 m<sup>3</sup> (totalt 192 000 m<sup>3</sup>) utgjør 0.15% av totalvolumet ca. 290 m<sup>3</sup>. Med en antatt tetthet for 'coker gasoline' på 0.72 tonn per kubikkmeter utgjør den totale massen av 6 tanklaster 138 240 tonn, og en 0.15% rest tilsvarer ca. 210 tonn. Avfallsstoffene og luten som var igjen i tanken bestod av en flytende del, blant annet en viss andel 'coker gasoline', og en mer eller mindre fast masse eller bunnfall (omtales gjerne som 'waste', 'waste-avfall' eller 'krystallisert lut'). Det meste av det flytende avfallet som var igjen i tankene T3 og T4 ble overført til andre tanker (C1-C3), men etter hvert var det så mye fast avfall igjen på bunnen av tankene at de måtte rengjøres før man kunne behandle flere laster med 'coker gasoline'. I forkant av den videre behandlingen av det faste avfallet ble det gjennomført et pilotprosjekt i liten skala der 'wasten' ble fortynnet med vann og tilsatt saltsyre for å redusere pH-verdien i løsningen. Figur 1-3 viser apparaturen som ble benyttet i disse forsøkene. I forsøkene ble det observert en viss produksjon av gass (betegnet som 'syredamp'), og det dannet seg et tynt sjikt av en oljeaktig væske på overflaten. Tester av prøver fra det tynne sjiktet viste at denne væsken var brennbar.

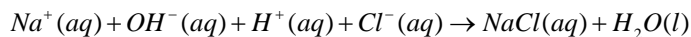


**Figur 1-3** Apparaturen som ble benyttet for å undersøke effekten av syretilsetning i liten skala (til venstre); tankanlegget sett fra kaien, med slangene som ble brukt til transport av 'coker gasoline' fra tankbåtene til tankanlegget, pumpehuset og luttanken 'De Rijke' (i midten); massen som var igjen i Tankgård II dagen etter ulykken (til høyre); bilder fra Politiet.

Før videre behandling av bunnfallet i tank T3 ble det meste av væsken i tanken (30–40 m<sup>3</sup>) pumpet over til tank T4, og øvrige væskerester ble overført til tank C1. Reststoffet som da var igjen i tanken omtales som en svampaktig masse. Over flere dager, frem til ca. 2-3 dager forut for ulykken, ble en vakuumpumpe benyttet til å suge opp ytterligere væske som samlet seg i en grop i denne avfallsmassen. Etter flere mislykkede forsøk på å antenne prøver av den siste væsken som ble fjernet fra tanken ved hjelp av en åpen flamme, ble det antatt at væsken ikke var brennbar.

Merkaptaner er beryktet for å være svært illeluktende forbindelser, og for å begrense utslippene av disse stoffene til omgivelsene ble både tank T3 og tank T4 utstyrt med luftfiltre med aktivt kull (pellets dannet av finfordelte karbonpartikler). Disse filterne var plassert langs rekkverket på toppen av tankene, og koplet til tanken ved hjelp av fleksible rør slik at all utveksling av luft eller damp mellom tankenes indre og omgivelsene måtte passere gjennom filterne. Som et ledd i de siste forberedelsene for behandlingen av det faste avfallet inne i tank T3 byttet Vest Tank filtermediet i luftfiltrene på begge tankene.

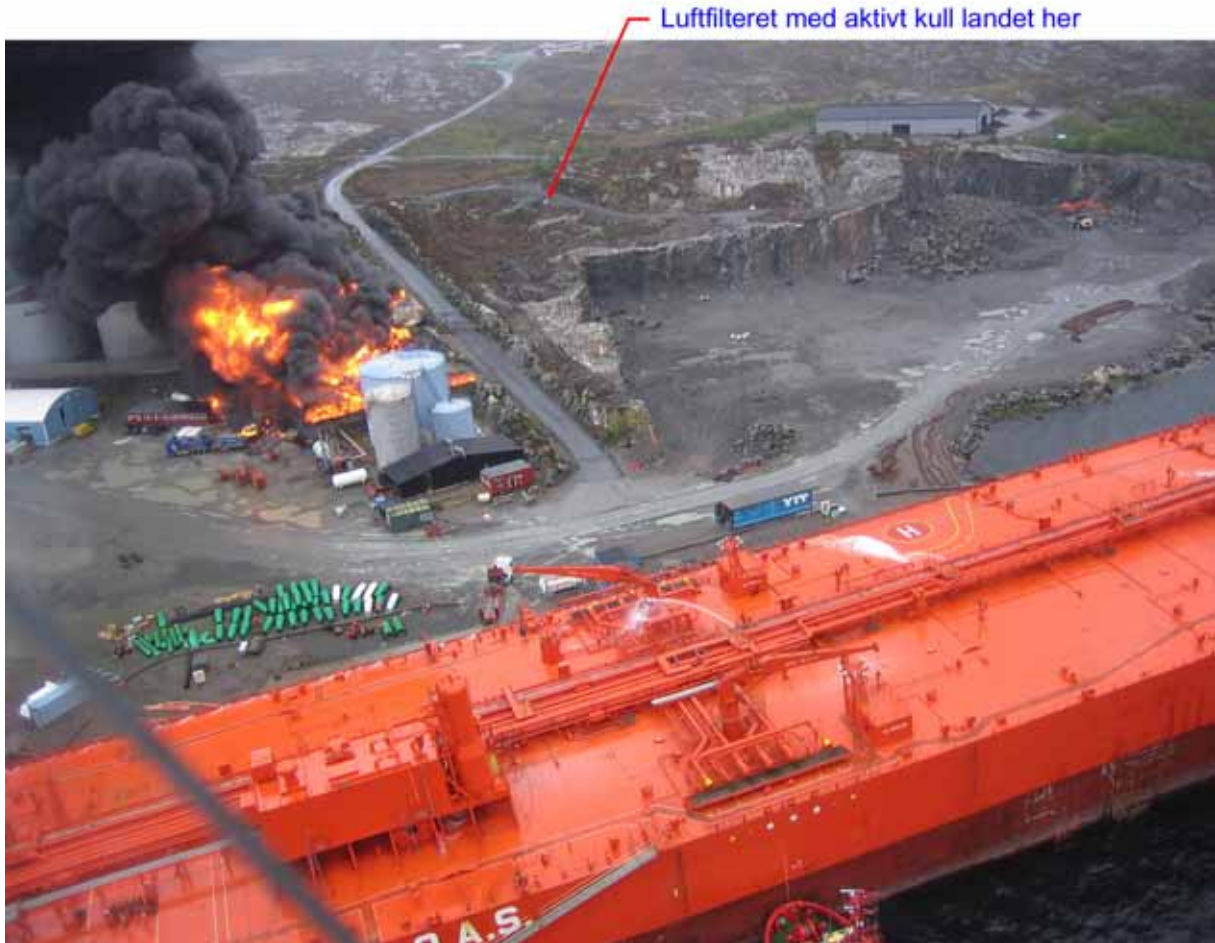
Før tilsetning av ca. 205 m<sup>3</sup> vann/avfallsvæske/rensevann fra tank T61 var det ca. 50 m<sup>3</sup> fast avfall i tank T3 (totalt 255 m<sup>3</sup> fortynnet løsning). For å nøytralisere den basiske løsningen skulle det så tilsettes totalt 18 m<sup>3</sup> saltsyreløsning (30-36 % HCl løst i vann). Hensikten med syretilsetningen var å løse opp slam/bunnfall, samt å redusere pH-verdien i løsningen ved at saltsyren reagerte med lutten og dannet vanlig salt (NaCl) og vann:



Det er verdt å legge merke til at denne reaksjonslikningen ikke inkluderer kjemiske reaksjoner, eller forskyvninger i kjemiske likevekter, som involverer andre kjemiske forbindelser enn ren natriumhydroksidløsning, blant de 50 m<sup>3</sup> med fast avfall som befant seg på tanken.

Arbeidet med tilsetning av saltsyre til tank T3 startet opp på ettermiddagen onsdag 23. mai, og like før klokken 10 på formiddagen torsdag 24. mai eksploderte tanken. Da eksplosjonen skjedde hadde det blitt tilsatt omtrent 14-15 m<sup>3</sup> saltsyre. Kort tid etter eksploderte også tank T4 som inneholdt produktrester av 'coker gasoline' (inkludert bunnslam), og tank C1 som inneholdt bunnslam og oljerester (tankene C2 og C3 var tomme).

Figur 1-4 viser et fotografi tatt fra et helikopter fra Norsk Luftambulansetre kvarter etter den første eksplosjonen. På dette tidspunktet pågikk brannen i tankgården for fullt, og kontorbygningen hadde så vidt begynt å brenne. Figur 1-5 viser en serie bilder som ble tatt av mannskap ombord på M/T Karen Knutsen i minuttene etter den første eksplosjonen. Bildene viser at brannen omfattet hele Tankgård II i løpet av mindre enn 10 minutter. Figur 1-6 er satt sammen av bilder tatt av politiet i dagene etter ulykken og illustrerer en del av skadene på Tankgård II samt kontorbygg og kjøretøyer.



**Figur 1-4** Bilde tatt fra et helikopter fra Norsk Luftambulans som illustrerer tankanlegget på Sløvåg og brannen i Tankgård II ca. 45 minutter etter den første eksplosjonen i tank T3 (bildet er i henhold til klokken i kameraet tatt 10:42). Kontorbygget har her begynt å brenne, trolig som følge av strålingsbelastningen fra brannen i tankgården. Bildet viser forøvrig en del detaljer som ikke kommer frem i Figur 1-2, samt luftfilteret med aktivt kull som opprinnelig stod oppe på tank T3. Bildet er tatt av Lasse Fossedal fra Norsk Luftambulans.



Første bilde noen minutter  
etter første eksplosjon



Ca. 4 minutter etter første bilde



Ca. 13 minutter etter første bilde

Sløvåg 24.05.2007  
Photos by Glenn Rogers  
Chief Engineer M/T Karen Knutsen

**Figur 1-5** Bilder tatt fra M/T Karen Knutsen som viser hvordan brannen i Tankgård II utvikler seg i minuttene etter den første eksplosjonen på Sløvåg 24. mai 2007. Det øverste bildet er trolig tatt bare noen få minutter etter eksplosjonen i tank T3. Bilder fra Glenn Rogers, Chief Engineer, M/T Karen Knutsen.



**Figur 1-6** Oversiktsbilder som viser tankanlegget til Vest Tank AS på Sløvåg i dagene etter ulykken 24 .mai 2007. Bildene er tatt av politiet og viser, ovenfra og ned: Tankgård II sett fra kaien (25.05.2007); restene av tank T3 sett fra veien inn til anlegget (26.06.2007); Tankgård II med Tankgård I og M/T Karen Knutsen i bakgrunnen (25.05.2007); skader på kjøretøy og den røde brakkebygningen (25.05.2007).

## 1.4 Arbeidets omfang

I tråd med mandatet definert i oppdragsbrevet fra Hordaland politidistrikt, Kripes og DSB (Politiet ref. 0723.11705a, 2007) omfatter GexCon's arbeid utelukkende undersøkelser av de direkte fysiske og kjemiske årsakene til eksplosjonen i tank T3 ved tankanlegget på Sløvåg 24. mai 2007. At den første eksplosjonen senere eskalerer til ytterligere eksplosjoner i nærliggende tanker og et omfattende brannscenario i tankgården er ikke uvanlig for denne typen ulykker, og rapporten går derfor ikke inn på detaljer fra disse sekundære hendelsesforløpene. I rapporten tas det heller ikke stilling til bakenforliggende årsaker av organisatorisk art, eventuelle juridiske betraktninger som gjerne melder seg i etterkant av denne typen hendelser, samt potensielle langvarige virkninger på helse og miljø som følge av utslipp til omgivelsene under og etter hendelsen.

Det meste tyder på at det var en kjemisk eksplosjon som fant sted i tank T3, men muligheten for at det kan ha vært en fysisk eksplosjon har også blitt vurdert. Et hypotetisk ulykkesscenario som involverer en fysisk eksplosjon innebærer at tilsetningen av saltsyre til den basiske løsningen i tanken forårsaket kjemiske reaksjoner og/eller andre prosesser som igjen førte til hurtig gassutvikling og/eller termisk ekspansjon av gassen inne i tanken. Dersom størrelsen på åpningene i tanken ikke tillot gassen å unnsnippe hurtig nok til å begrense trykket til et akseptabelt nivå ville tanken til slutt revne. Varme flater eller mekaniske gnister som følge av deformasjon av plater i tankvegg og/eller tanktopp kunne så antenne brennbare gasser og væskedamper slik at brannen startet. Muligheten for at det kan ha funnet sted en fysisk eksplosjon i tank T3 blir derfor vurdert på bakgrunn av mulige mekanismer som kan ha ført til så stor produksjon eller ekspansjon av gass inne i tanken at utstrømning gjennom åpningene i tanken ikke var tilstrekkelig til å begrense overtrykket til akseptabelt nivå.

Gitt at det kan sannsynliggjøres at ulykken ikke skyldtes en fysisk eksplosjon, er det overveiende sannsynlig at det var en kjemisk eksplosjon som fant sted i tank T3. For å vurdere slike scenarioer er det naturlig å vurdere hver enkelt av de fem årsaksfaktorene som inngår i eksplosjonsfemkanten (Figur 1-1):

- **Brensel:** Det synes åpenbart at det var en brennbar gass i tank T3 forut for eksplosjonen, men det er allikevel viktig å undersøke/avklare hvordan denne gassen ble dannet, og hva slags kjemisk sammensetning gassen hadde.
- **Oksidant:** Oksidanten var etter alt å dømme oksygen fra lufta som befant seg inne i tanken.
- **Eksplosiv blanding:** Tank T3 hadde et totalt volum på 4000 m<sup>3</sup>, og siden volumet av væsken i bunnen av tanken bare utgjorde omlag 270 m<sup>3</sup> (eller mindre enn syv prosent av tankens totale volum), var det over væsknivået et betydelig volum som i utgangspunktet hovedsakelig var fylt med luft. Over tid må hele eller deler av atmosfæren inne i tanken ha blitt eksplosiv som følge av at brennbar damp ble frigjort fra væskeoverflaten. Det vurderes også hvorvidt brennbar gassblanding kan ha unnsloppet fra åpninger i tanken og senere blitt antent av tennkilder på utsiden.
- **Tennkilde:** Det må ha vært en tennkilde tilstede for å initiere den kjemiske eksplosjonen. Denne tennkilden kan enten ha befunnet seg inne i tanken, eller utenfor tanken men samtidig innenfor rekkevidde av eksplosiv blanding som eventuelt unnslopp fra åpninger i tanken.
- **Innestenging:** Volumet inne i tanken var i utgangspunktet så innestengt at en eventuell eksplosjon ikke ville kunne trykkavlastes gjennom de svært begrensede åpningene i tanken: inspeksjonsluken og utluftingen som passerte gjennom luftfilter med aktivt kull.

For å sannsynliggjøre et hendelsesforløp med kjemisk eksplosjon er det derfor primært av interesse å finne frem til opprinnelsen, og derved den kjemiske sammensetning, til den brennbare blandingen, samt tennkildens type og plassering.

Som nevnt tar GexCon's bidrag til granskningen av hendelsesforløpet ved Sløvåg 24.05.2007 utgangspunkt i oppdragsbrevet (Politiet ref. 0723.11705a, 2007). Hensikten med arbeidet har vært å bidra til å avdekke årsakene til eksplosjonen i tank T3. Arbeidet har hovedsakelig bestått av følgende aktiviteter:

#### **Litteraturstudie fokusert på lignende hendelser**

*Kapittel 2* presenterer en litteraturstudie som har blitt gjennomført for å kartlegge tidligere ulykker ved lignende installasjoner. Søket omfatter relevante lærebøker, oppslagsverk, vitenskapelige artikler og andre kilder.

#### **Systembeskrivelse og hendelsesforløp**

*Kapittel 3* beskriver i korte trekk tankanlegget forut for ulykken, hendelsesforløpet som ledet frem til ulykken, og vitneobservasjoner som beskriver selve ulykken. Formålet med dette arbeidet var primært å kartlegge momenter som har betydning for analysen i øvrige deler av rapporten.

#### **Vurdering av fysisk eksplosjon som utløsende årsak**

*Kapittel 4* inneholder en vurdering av hvorvidt produksjon av gass fra prosesser inne i tanken, for gitte åpninger i tanken, samt hendelsesforløpene som beskrives av vitner, er forenlige med en eventuell fysisk eksplosjon i tank T3.

#### **Vurdering av dannelse av eksplosiv atmosfære**

*Kapittel 5* vurderer muligheten for at brennbare gasser/væskedamper dannet en eksplosiv atmosfære inne i tanken, samt at eksplosive atmosfærer eventuelt unnsnapp fra åpninger i tanken og kunne bli antent av en tennkilde på utsiden av tanken. Simuleringer med CFD-koden FLACS har blitt utført for å vurdere dannelsen av eksplosiv sky inne i tanken, samt mulig spredning av eksplosive skyer utenfor tanken.

#### **Vurdering av potensielle tennkilder**

*Kapittel 6* vurderer muligheten for at brennbare gasser/væskedamper ble antent av en tennkilde inne i tanken. Luftfilteret med aktivt kull som var koplet til tanken regnes i denne sammenheng som en del av tanken. Aktuelle tennkilder kan være elektrostatiske utladninger, diverse elektrisk og mekanisk utstyr, samt selvantennelse i filtermassen. Dette arbeidet omfatter måling av ledningsevnen til relevante væskeprøver for å vurdere muligheten for akkumulering av elektrisk ladning på væskeoverflaten, og dermed muligheten for antennelse som følge av elektrostatiske utladninger.

*Kapittel 7* oppsummerer hovedkonklusjonene fra GexCon's granskning av ulykken ved Vest Tank AS på Sløvåg 24. mai 2007.

## 2 Litteraturstudie

Hensikten med litteraturstudiet som presenteres i dette kapitlet var å kartlegge tidligere ulykker ved lignende tankinstallasjoner som den på Sløvåg, samt å identifisere andre momenter som kunne kaste lys over hendelsesforløpet under ulykken 24. mai.

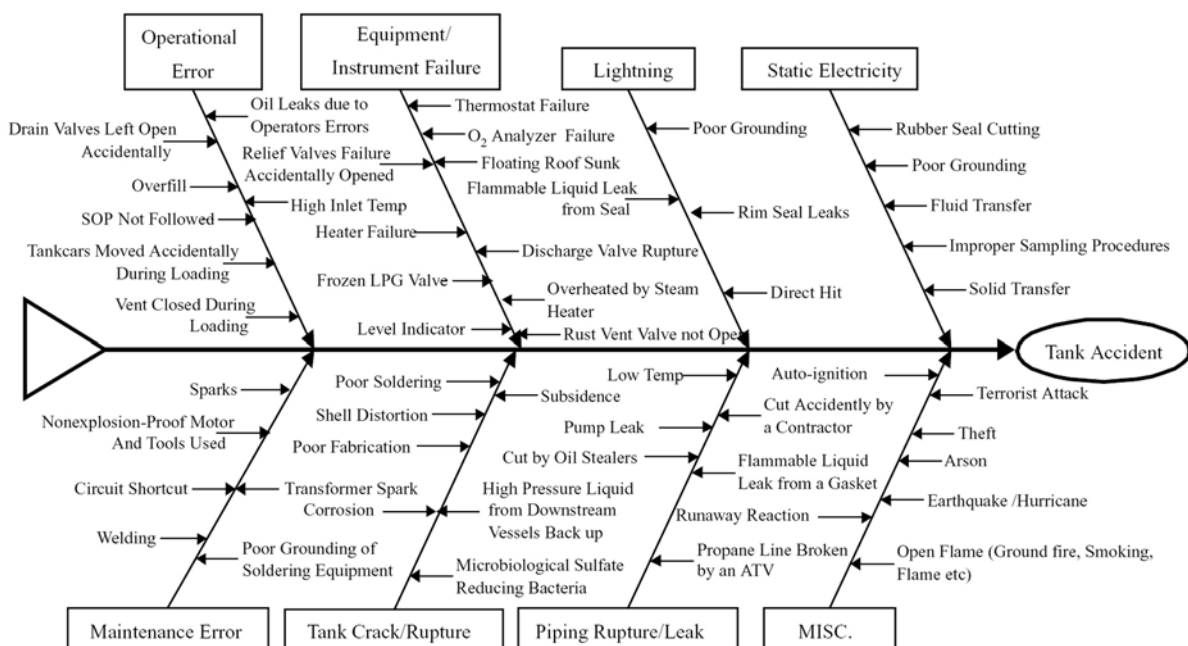
### 2.1 Eksplosjoner i atmosfæriske lagringstanker

En vesentlig andel av ulykkene som finner sted i prosessindustrien kan knyttes til lagringstanker, enten som følge av overfylling, kollaps grunnet innvendig undertrykk (innsuging), eller eksplosjon (Kletz, 1988):

*“No item of equipment is involved in more accidents than storage tanks, probably because they are fragile and easily damaged by slight overpressure or vacuum. Fortunately, the majority of accidents involving tanks do not cause injury, but they do cause damage, loss of material, and interruption of production.”*

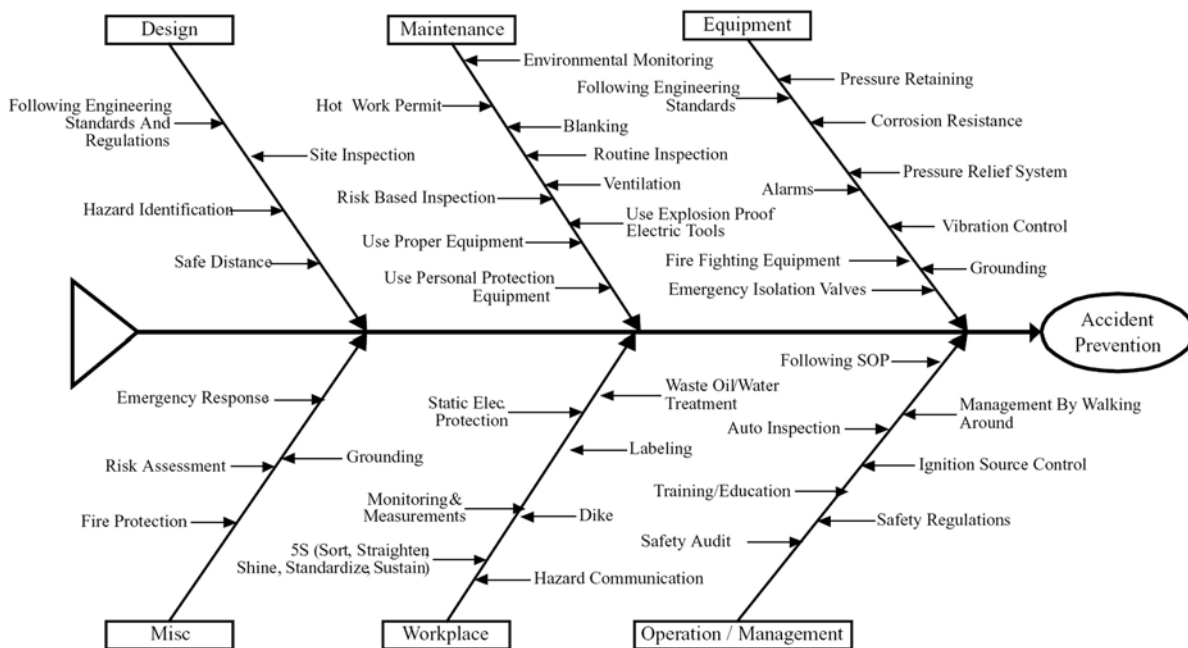
Historiske data for lagringstanker antyder en generell sannsynlighet for eksplosjon på i størrelsesorden 1 eksplosjon per 1000 år per tank (Kletz, 1988; Mannan, 2005). Denne relativt høye frekvensen er hovedsakelig et resultat av følgende forhold:

- Det er ikke uvanlig at lagringstanker inneholder eksplosive blandinger av væskedamper og luft.
- Det er svært vanskelig å forebygge alle former for tennkilder i forbindelse med lagringstanker, blant annet fordi lynnedslag utgjør en hyppig tennkilde, og spesielt dersom væsken i tanken har tilstrekkelig lav ledningsevne til at statisk elektrisitet kan akkumuleres på væskeoverflaten.
- Lagringstanker er vanligvis designet for svært lave overtrykk.
- Selv om de fleste lagringstanker er designet slik at det er sveisen mellom vegg og tanktopp som skal revne først (og derved begrense utslipp av væske til tankgård), vil ofte sveisen mellom vegg og tankbunn være så svekket som følge av korrosjon at det er denne som i praksis ryker først.



Figur 2-1 Fiskebeinsdiagram som oppsummerer ulike årsaker til tankulykker (fra Chang & Lin, 2006).

Chang & Lin (2006) analyserte i alt 242 ulykker som involverte lagringstanker, hvorav brann og eksplosjon var representert i 85 % av hendelsene. Figur 2-1 viser et såkalt fiskebeinsdiagram som oppsummerer ulike årsaker til tankulykker, og Figur 2-2 viser et fiskebeinsdiagram som oppsummerer ulike metoder for å forebygge tankulykker. Av de 242 ulykkene som ble analysert var 80 (33%) forårsaket av lynnedslag, og 72 (30%) av menneskelig svikt som for eksempel operasjonsfeil eller manglende vedlikehold.



Figur 2-2 Fiskebeinsdiagram som oppsummerer ulike metoder for å forebygge tankulykker (Chang & Lin, 2006).

De vanligste metodene som benyttes for å redusere risikoen knyttet til tankeksplisjoner er (Kletz, 1988, 1990; DBE, 1994; EPA, 1997abcd, 2001; BP, 2006ab; Mannan, 2005; Chang & Lin, 2006):

- Flytende tanktopp (eng. 'floating roof tanks'): forebygger eksplosjoner ved å eliminere muligheten for at det dannes en innelukket eksplosiv atmosfære fordi tanktoppen flyter direkte på væskeoverflaten.
- Inertisering, vanligvis med nitrogen (eng. 'blanketing'): forebygger tenning ved elektrostatiske utladninger fordi atmosfæren inne i tankene ikke lenger er brennbar.
- Antistatiske tilsetningsstoffer og jording av utstyr: forhindrer at elektrisk ladning akkumuleres på væskeoverflaten, og forhindrer dermed elektrostatiske utladninger som kunne forårsaket antennelse.
- Minimalisere dannelsen av statisk elektrisitet under fylling av tankene: pumpehastigheten bør være lav (under 3 m/s for rene væsker, og under 1 m/s når det er vann tilstede), man bør unngå at væske tilsettes over væskeoverflaten i tanken (eng. 'splash filling'), og en innsnevring (for eksempel et filter) bør etterfølges av en relativt lang rett rørlengde slik at den elektriske ladningstettheten i væsken reduseres.
- Fornuftig planløsning for tankgårder, for eksempel god avstand mellom tankene, separate spillkanter rundt hver tank for å fange opp væske dersom tanken revner, alle pumper og mest mulig rør på utsiden av spillkanten, etc.
- Flammesperre på lufting fra tanker som inneholder brennbare væsker.

- Områdeklassifisering: Forebygger tennkilder ved at det stilles krav til elektrisk utstyr i henhold til eksplosjonsrisikoen i aktuelle områder.

For mange av disse tiltakene finnes det imidlertid eksempler på at feilaktig montering eller mangelfullt vedlikehold allikevel kan resultere i ulykker (Kletz, 1988, 1990). I enkelte tilfeller kan det finne sted kjemiske reaksjoner i væskefasen som befinner seg inne i tanken. I slike situasjoner, når de kjemiske reaksjonene er tilsiktede, og spesielt i tilfeller der reaksjonene er sterkt eksoterme eller det produseres betydelige mengder gass, kan det diskuteres hvorvidt tanken skal betraktes som en ren lagringsenhet, eller snarere som en kjemisk reaktor. Reaksjoner kan også være utilsiktet, for eksempel som følge av at feil stoffer blandes, at urenheter tilføres tanken, eller ved at andre prosessparametre (for eksempel temperatur eller trykk) kommer ut av kontroll (Mannan, 2005).

## 2.2 Ulykkeshistorikk og relevante forskningsresultater

Det ble funnet begrenset informasjon i den åpne litteraturen om ulykker som kan sies å ha betydelige fellestrekk med hendelsen som fant sted på Sløvåg. Det ble for eksempel funnet svært lite informasjon om eksplosjonsulykker der den eksplosive atmosfæren bestod av merkaptaner, og praktisk talt ingen henvisninger til faremomenter knyttet til rensing av 'coker gasoline' ved hjelp av natriumhydroksid. Litteraturstudiet avdekket ikke desto mindre en god del informasjon om relaterte problemstillinger som kan være relevante. I det følgende beskrives ulike fenomener som kan ha hatt betydning for hendelsesforløpet ved Sløvåg 24. mai 2007.

### Elektrostatiske utladninger som mulig tennkilde

Historiske data fra eksplosjonsulykker i lagringstanker viser at elektrostatiske utladninger kan antenne brennbare blandinger av væskedamp og luft. Væskers evne til å generere og akkumulere elektrostatisk ladning er nært knyttet til væskens elektriske ledningsevne.

Den elektriske ledningsevnen til væsker skyldes tilstedeværelsen av ioner (Mannan, 2005; BP, 2006c). Hydrokarboner har generelt lavere ledningsevne enn andre væsker, men typiske unntak er stoffer med symmetriske molekyler som for eksempel dietyler og karbondisulfid. Dersom ledningsevne til en væske er lavere enn  $5 \times 10^{-11} \text{ S m}^{-1}$  (Siemens per meter) er det en reell fare for at det kan bygge seg opp tilstrekkelig elektrisk ladning til at elektrostatiske utladninger kan finne sted (Babrauskas, 2003; BP, 2006c). For væsker med ekstremt lav ledningsevne, typisk lavere enn  $1 \times 10^{-13} \text{ S m}^{-1}$ , vil imidlertid de ioniserte komponentene som kan bidra til ladningsoppbygging være praktisk talt fraværende. Den reelle faren forbundet med elektrostatiske utladninger er derfor knyttet til væsker med ledningsevne i området fra  $1 \times 10^{-13}$  til  $5 \times 10^{-11} \text{ S m}^{-1}$  (se Figur 6-2 i Kapittel 6).

Elektrostatiske utladninger utgjør en potensiell tennkilde overalt hvor det finnes brennbare blandinger av gass, damp, dråper eller støv (Mannan, 2005; Babrauskas, 2003; BP, 2006c). Antennelse ved elektrostatiske utladninger i systemer som inneholder væske diskuteres av Mannan (2005). Mannan beskriver også mekanismer for å generere og lade ut elektrisk ladning i systemer som inneholder væske, samt metoder for å estimere slike fenomener. Det finnes også metoder for å estimere styrken på det elektriske feltet inne i delvis fylte lagringstanker (Klinkenberg & van der Minne, 1958). Når væske tilføres en tank gjennom et rør kan det oppstå en 'ladestrøm' som transporterer ladning inn i tanken (Mannan, 2005). Faktorer som påvirker denne ladningstransporten er blant annet:

- Rørets diameter og materialtype
- Væskens viskositet og elektriske ledningsevne
- Strømningshastigheten i røret
- Urenheter, og da særlig vann (Klinkenberg & van der Minne, 1958)

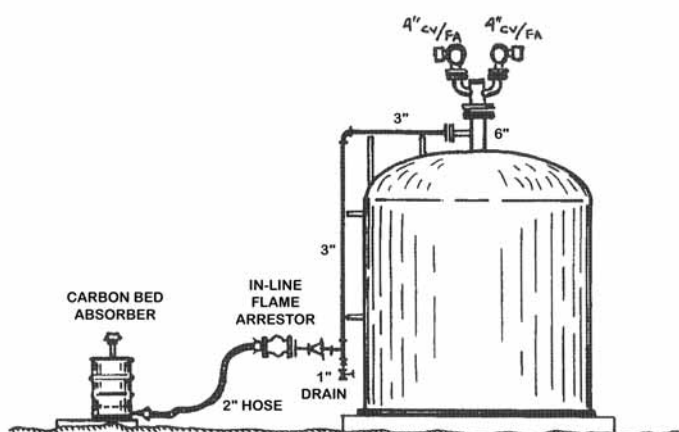
Når vann er tilstede i systemet kan ladningstransporten øke opp til 50 ganger, og dette har resultert i mange ulykker. Obstruksjoner i rørledningen, som ventiler og filter, kan også øke ladningstransporten betraktelig. Kraftig omrøring av væsken kan på samme måte som rørstrømning føre til separasjon av ladning. Mannan beskriver også risikoen forbundet med elektrostatiske utladninger i olje- og kjemikalietanker, samt i forbindelse med brannslukking i lagringstanker.

Kletz (1988) beskriver en 'typisk' tankeeksplosjon som fant sted i en stor tank 40 minutter etter at man startet å blande to ulike kvaliteter av nafta. Den etterfølgende brannen ble slukket relativt raskt, og naftaen ble overført til en annen tank. Blandingsprosessen fortsatte dagen etter i den andre tanken, og etter 40 minutter skjedde det en ny eksplosjon. Tankene var ikke inertisert, og det var derfor en eksplosiv blanding av naftadamp og luft over væsknivået i tankene. Tennkilden var utlading av statisk elektrisitet fra væskeoverflaten til tak eller vegg i tanken. Ladningstettheten på væskeoverflaten var et resultat av for høy pumpehastighet.

### Selvantennelse i luftfilter med aktivt kull som mulig tennkilde

Det er kjent at kombinasjonen av et filter med aktivt kull for å fjerne vond lukt, og brennbare organiske forbindelser som metylmerkaptan, ketoner, aldehyder, etc., kan resultere i antennelse av brennbare gassblandinger i lagringstanker (EPA, 1997e).

Harrell *et al.* (1978) og Zerbonia *et al.* (2001) beskriver reaksjonen mellom visse hydrokarbonforbindelser og aktivt kull som en eksoterm adsorpsjonsprosess som kan frigjøre tilstrekkelig varme til at temperaturen overskrider tenntemperaturen for kullpartiklene. Figur 2-3 viser en installasjon der de illeluktende avgassene fra en lagringstank ledes gjennom et filter med aktivt kull, og en flammesperre mellom filter og tank hindrer tilbakebrenning til tanken i tilfelle det skulle oppstå selvantennelse i filteret. I tillegg er filterhuset plassert på bakkenivå slik at det er enkelt å skifte ut dersom det begynner å brenne i filtermassen.



Figur 2-3 Installasjon av luftfilter med aktivt kull i forbindelse med en tank (fra Harrell *et al.*, 1978).

## 3 Systembeskrivelse og hendelsesforløp

Dette kapitlet oppsummerer hendelsesforløpet som ledet frem til ulykken på Sløvåg 24. mai 2007. Beskrivelsen fokuserer primært på operasjoner i tilknytning til Tankgård II der ulykken skjedde, samt vitneobservasjoner som beskriver selve ulykken. Formålet med dette arbeidet har vært å kartlegge momenter som har betydning for analysen i øvrige deler av rapporten. Det legges spesielt vekt på å identifisere informasjon som belyser hva den eksplosive atmosfæren inne i tank T3 bestod av, samt informasjon egnet til å vurdere den relative sannsynligheten av ulike tennkilder inne i eller utenfor tanken.

### 3.1 Tankanlegget forut for ulykken

Vest Tank AS holder til på Sløvåg industriområde i Gulen kommune i Sogn og Fjordane. Bedriften mottar og behandler oljeholdig/forurenset vann fra skip og offshorevirksomhet. Renset vann slippes til sjø i henhold til utslippstillatelse fra Statens forurensningstilsyn (SFT, 2001).

Forut for ulykken bestod tankanlegget på Sløvåg av 3 tankgårder med totalt 17 tanker (illustrert i Figur 1-2). Nedenfor oppsummeres innholdet i hver enkelt tank i de ulike tankgårdene på tidspunktet for ulykken 24. mai. Tankvolumer er angitt i parentes, sammen med innerdiameter, ID, og høyde, TT, for noen av tankene. Informasjonen er basert på vitneavhør samt tegninger fra Bergen Engineering.

- **Tankgård I** blir brukt til lagring, behandling/rensing og gjenvinning av væske. Tankgården har lavmur og lukket/kontrollert avrenning av drennann til sjø. Denne tankgården inneholder tre tanker som ikke ble ødelagt under brannen 24. mai:
  - **T1** (580 m<sup>3</sup>) inneholdt lasten fra M/T "Probo Emu" og muligens 50 m<sup>3</sup> surt vann.
  - **T2** (4000 m<sup>3</sup>) inneholdt ikke-brennbar avfallsvæske ('mud'/'slurry') fra Nordsjøen.
  - **T5** (1000 m<sup>3</sup>) er en behandlingstank for 'mud'/'slurry' (inneholdt ca. 750 m<sup>3</sup>).
- **Tankgård II** ble brukt for lagring, behandling og gjenvinning av væsker. Tankgården var omgitt av ringmur og hadde lukket/kontrollert avrenning av drennann til sjø. Alle de fem tankene i tankgården ble ødelagt i ulykken 24. mai (se Figur 3-2 og Figur 3-3):
  - **T3** (4000 m<sup>3</sup>, ID 18 m, TT 16 m) inneholdt på eksplosjonstidspunktet omtrent 270 m<sup>3</sup> væske: ca. 50 m<sup>3</sup> slam ('waste-avfall'), ca. 205 m<sup>3</sup> vann fra tank T61, og 14-15 m<sup>3</sup> saltsyreløsning (fylling fra tankbil pågikk da eksplosjonen inntraff). Det anmerkes at det totale væskevolumet noen steder oppgis til 255 m<sup>3</sup> inklusiv syren; en slik justering vil uansett ikke ha innvirkning på analysen i denne rapporten. Tanken var den første som eksploderte under ulykken 24. mai.
  - **T4** (5000 m<sup>3</sup>, ID 22 m, TT 13 m) inneholdt på eksplosjonstidspunktet ca. 350 m<sup>3</sup> rester fra rensing av 'coker gasoline', deriblant brennbar væske som hadde blitt pumpet over fra tank T3. Denne tanken eksploderte kort tid etter tank T3.
  - **C1** (120 m<sup>3</sup>) inneholdt på eksplosjonstidspunktet ca. 60 m<sup>3</sup> avfallsvæske fra rensing av 'coker gasoline' (pumpet over fra tankene T3 og T4). Det pågikk tømning av denne tanken da ulykken inntraff (tømningen hadde da pågått i ca. 10 minutter). Under hendelsesforløpet 24. mai ble tanktoppen blåst av (se Figur 3-2).
  - **C2** (120 m<sup>3</sup>) var tom på eksplosjonstidspunktet, men tanken ble totalt ødelagt under hendelsesforløpet 24. mai (se Figur 3-2).
  - **C3** (120 m<sup>3</sup>) var tom på eksplosjonstidspunktet, men tanken ble totalt ødelagt under hendelsesforløpet 24. mai (se Figur 3-2).

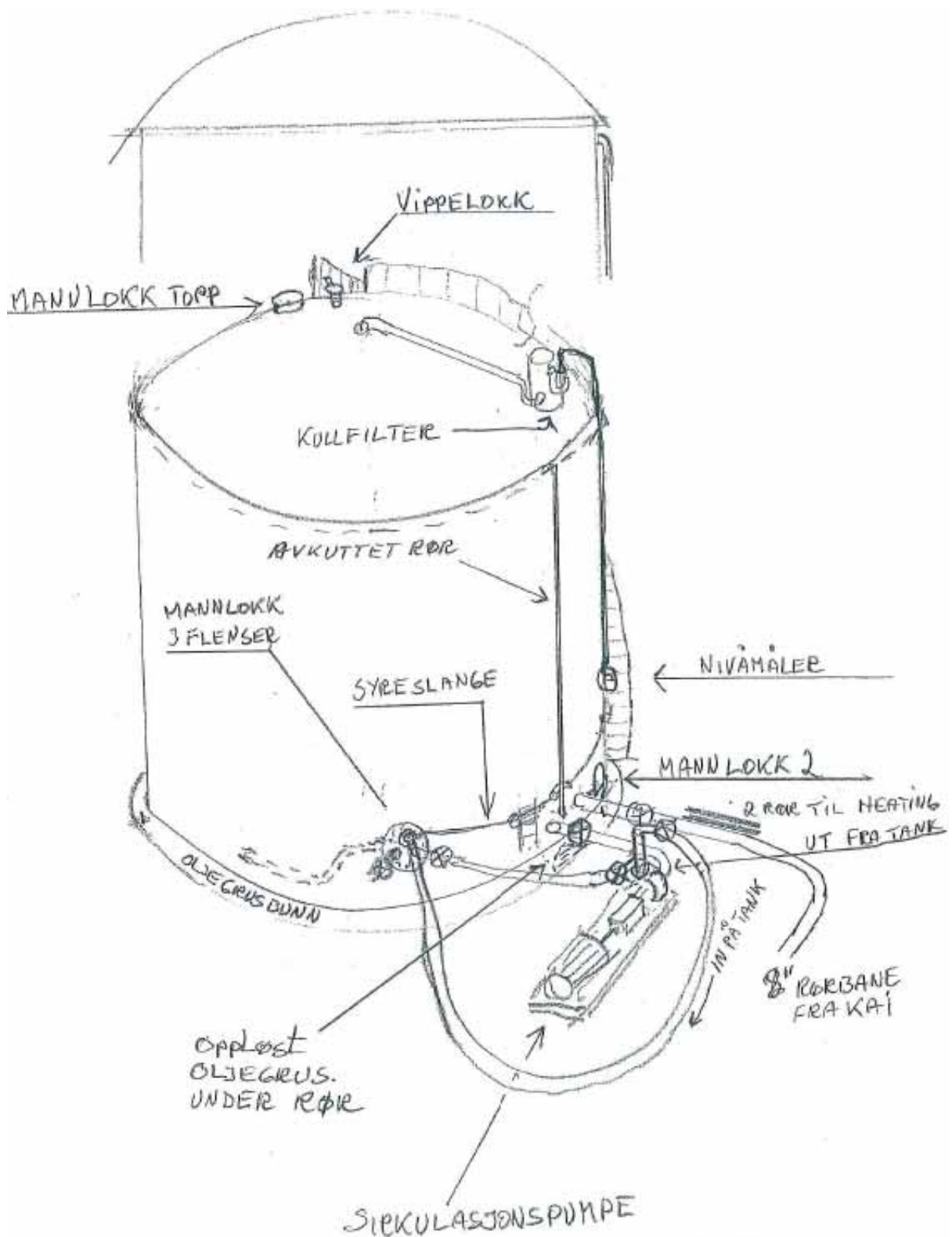
- **Tankgård III** blir brukt for mottak av mer eller mindre farlig avfall fra skip samt offshore- og industrivirksomhet. Tankgården har ringmur og væsketette rørkulverter. Ingen av de ni tankene i tankgården ble rapportert skadet i ulykken 24. mai:
  - **T51** (12290 m<sup>3</sup>) inneholdt på eksplosjonstidspunktet 'slop'-vann og 'mud'.
  - **T52** (12290 m<sup>3</sup>) inneholdt på eksplosjonstidspunktet surt vann fra Mongstad, var nesten tom.
  - **T53** (11060 m<sup>3</sup>) inneholdt på eksplosjonstidspunktet 'slop'-vann.
  - **T54** (11060 m<sup>3</sup>) var ikke i bruk på eksplosjonstidspunktet.
  - **T55** (8534 m<sup>3</sup>) inneholdt på eksplosjonstidspunktet 'slop'-vann med 'mud'-fraksjon.
  - **T56** (8534 m<sup>3</sup>) inneholdt på eksplosjonstidspunktet en blanding av vann og spylevann fra rensing av andre tanker ved Vest Tank.
  - **T57** (8534 m<sup>3</sup>) har inneholdt surt vann, men var tom på eksplosjonstidspunktet.
  - **T61** (12290 m<sup>3</sup>) inneholdt på eksplosjonstidspunktet 2000–2500 m<sup>3</sup> spillolje og vann fra C1.
  - **T63** (12290 m<sup>3</sup>) inneholdt på eksplosjonstidspunktet 'slop'-vann med 'mud'-fraksjon.

For ulykkesgranskningen beskrevet i denne rapporten er det primært forhold vedrørende Tankgård II, og spesielt tank T3, som er av interesse.

Figur 3-1 viser en skisse som ett av vitnene har laget av tank T3 forut for ulykken 24. mai. Skissen illustrerer åpningene i tanken, samt prosessen med tilsetning av syre mens innholdet i tanken ble sirkulert ved hjelp av en pumpe. Med hensyn til diskusjonen i øvrige deler av rapporten er det verdt å legge merke til følgende detaljer på denne tegningen:

- For å redusere utslippene av illeluktende forbindelser var luftingen midt oppe på tanktoppen koplet til et luftfilter med aktivt kull via en fleksibel ventilasjonslange.
- Alle mannlokkene i tanken var skrudd igjen.
- Vippelokket på tanktoppen fungerte som trykkavlastning, og under fylling av syre i timene forut for ulykken ble lokket gjentatte ganger benyttet til å overvåke prosessene som foregikk inne i tanken.
- Et avkuttet rør gikk inn på tankveggen like under tanktoppen, men røret hadde blitt tapet igjen nede ved bakken før syretilsetningen startet opp.

Forøvrig inneholder Tabell 3-2 en kronologisk oppsummering av sentrale hendelser og operasjoner som fant sted ved Vest Tank i tiden forut for ulykken 24. mai.



**Figur 3-1** Prinsippskisse som illustrerer tank T3 forut for ulykken. Tegningen viser blant annet åpningene på toppen av tanken, det avkuttete røret som var tapet igjen, systemet for sirkulasjon av innholdet i tanken under tilsetning av saltsyre, og kullfilterets plassering på toppen av tanken (fra avhør av Vitne C, 24.05.07, Masfjorden lensmannskontor).

## 3.2 Hendelsesforløpet under selve ulykken

Dette avsnittet kartlegger hendelsesforløpet under selve ulykken slik det fremkommer fra vitneavhør og observasjoner gjort ved tankanlegget i ettertid. Hensikten har vært å belyse hva omfanget av eksplosiv atmosfære kan ha vært forut for antennelsen, samt hva som var tennkilden, og hvor den var plassert.

Tabell 3-1 oppsummerer sentrale vitneobservasjoner som beskriver hendelsesforløpet forut for og under selve ulykken. Det er flere fellestrekk mellom mange av vitneutsagnene:

- Omtrent halvparten av vitnene hører to eksplosjoner kort tid etter hverandre.
- Fire vitner hører en lyd som beskrives som en gasslekkasje kort tid før eksplosjonen (tre vitner i nærheten av tanken, og ett vitne som står 500 meter unna).
- Flere vitner ser flygende objekter (prosjektiler).
- Flere vitner har sett røyk/damp fra filteret med aktivt kull i forkant av ulykken.

Noen av vitneutsagnene skiller seg imidlertid fra de øvrige:

- To vitner observerer at det går forholdsvis lang tid mellom de to eksplosjonene:
  - Et vitne mener det er betydelig lenger enn 10-15 sekunder.
  - Et vitne anslår tiden til 20-30 sekunder.
- To vitner ser flammer i nærheten av tank T3 før eksplosjon.

Det kan være ulike grunner til at noen av vitneforklaringene tilsynelatende motsier hverandre når det er snakk om å beskrive hendelsesforløpet i tiden rundt den første kraftige eksplosjonen. For eksempel kan det ikke utelukkes at oppfattelsen av tid kan variere noe fra person til person som under denne typen hendelser. Det er også mulig at ulike vitner forholder seg til ulike eksplosjoner eller smell når det er snakk om 'den andre eksplosjonen' (noen kan muligens ha oppfattet to etterfølgende eksplosjoner som et smell, og hørt et tredje smell noe senere).

Figur 3-2 og Figur 3-3 illustrerer skadene som ble påført Tankgård II under hendelsesforløpet 24. mai 2007:

- Tank T3 eksploderte etter alt å dømme først; den revnet langs bunnen (som ble liggende igjen), den øvre delen ble kastet over i det nordøstre hjørnet av tankgården, og tanktoppen ble kastet enda lenger.
- Tank T4 eksploderte kort tid etterpå.
- Tanktoppen på C1 ble blåst av.
- Tankene C2 og C3 kollapset.
- Ringmuren falt delvis sammen.
- To biler ble mer eller mindre fullstendig utbrent (tankbilen som leverte saltsyren samt en gammel vakuum sugebil som stod utenfor kontorbygningen); i tillegg ble den blå tankbilen som skulle hente avfallsvæske fra C1 også en del skadet.

Alt i alt er det rimelig godt samsvar mellom de forskjellige vitneobservasjonene, og mellom vitneobservasjonene og observasjoner på åstedet i etterkant av ulykken.

**Tabell 3-1** Sammendrag av vitneobservasjoner som kaster lys over selve ulykkesforløpet som fant sted ved tankanlegget til Vest Tank på Sløvåg 24. mai 2007. For en kortfattet kronologisk oppsummering av de mest sentrale hendelsene som fant sted forut for ulykken henvises det til Tabell 3-2; for en oversikt over tankanlegget henvises det til Figur 1-6; og for detaljer vedrørende tank T3 henvises det til Figur 3-1. Merk: når det i teksten henvises til 'Vitne Z' samsvarer dette med betegnelsen på det respektive vitnet benyttet i denne tabellen.

Vitne	Vitnes plassering og bevegelser	Vitnes beskrivelse av hendelsen
<p><b>Vitne A</b></p>	<p>Stod sammen med <i>Vitne K</i> ved syrebilen i nærheten av vindeltrappen (Figur 3-3) til Tankgård II da eksplosjonen inntraff.</p> <p>Rømte mot kaien og videre bortover mot steinkuseriet.</p>	<p>Beskriver eksplosjon som "oppskyting av romferge"; kan ikke si hvorvidt det var en eller to eksplosjoner; skal ifølge <i>Vitne K</i> ha blitt slått i bakken, men vitnet husker ikke dette selv.</p>
<p><b>Vitne B</b></p>	<p>Var inne i den røde brakkebygningen (kontorbygget) sammen med fem andre.</p> <p>Rømte bak blå telthall og videre nordover på kaiområdet.</p>	<p>Oppfattet to eksplosjoner umiddelbart etter hverandre; kom seg inn i dusjrommet; ble slått overende; oppfattet gjenstander og en trykkbølge som kom gjennom luften; vinduene blir slått inn i brakken; kom seg ut av kontorbygget; observerte at tank T3 var borte og at det stod flammer ut av nordsiden på tank T4.</p>
<p><b>Vitne C</b></p>	<p>Overvåket syretilsetningen om natten sammen med <i>Vitne Q</i>; inspiserte prosessene i tanken tre ganger i fra en 6-toms vippeluke på tanktoppen; de første to inspeksjonene tydet på at massen i tanken løste seg opp som planlagt; ved siste inspeksjon, ca. kl. 5, ble det observert et flak av perleformede oljedråper som sirkulerte rundt i tanken; ca. kl. 6 kjente vitnet sterkt ubehagelig lukt (tilsvarende observasjon hadde blitt gjort i pilotforsøk i liten skala); ca. kl. 8 observerte vitnet damp fra kullfilteret på toppen av tanken; ble avløst av <i>Vitne K</i> om morgenen og gikk hjem mellom 9:00 og 9:30.</p>	<p>Var ikke tilstede da ulykken inntraff.</p>

Vitne	Vitnes plassering og bevegelser	Vitnes beskrivelse av hendelsen
Vitne D	<p>Ankom anlegget kl. 8 om morgenen; ble fortalt at alt hadde gått fint med prosessen som pågikk i tank T3 om natten, det var ingen tegn til varmeutvikling, med det hadde blitt observert damp/røyk fra luftfilteret med aktivt kull på tank T3, noe som førte til en 20-30 minutters stopp i syretilførselen like etter kl. 8; antok at det måtte være damp som kom fra filteret siden det løste seg opp umiddelbart; hørt fra <i>Vitne A</i> at <i>Vitne K</i> skal ha konstatert at det ikke var tegn til varmeutvikling før syretilsetningen fortsatte; var på et kontor inne i den røde brakkebygningen (sammen med <i>Vitne H</i>) da ulykken inntraff.</p> <p>Rømte bak blå telthall og videre nordover på kaiområdet.</p>	<p>Hørte en slags buldring før brakkebygningen ristet/revnet; kom seg ut av bygningen; observerte flammer på flere kanter og gjenstander i luften.</p>
Vitne E	<p>Var på kafferommet i den røde brakkebygningen da ulykken inntraff.</p> <p>Rømte et par hundre meter i vestlig retning.</p>	<p>Hørte en lyd som minnet om en gasslekkasje fra en slange eller tank like før det smalt, lyden varte i 1-2 sekunder.</p>
Vitne F	<p>Var på Ågotnes da ulykken inntraff, og ankom Sløvåg ca. kl. 12.</p>	<p>Var ikke tilstede da ulykken inntraff.</p>
Vitne G	<p>Beskriver vedlikeholdsarbeid på tanker i Tankgård II.</p> <p>Var ikke tilstede da ulykken inntraff.</p>	<p>Var ikke tilstede da ulykken inntraff.</p>
Vitne H	<p>Var på et kontor inne i den røde brakkebygningen da ulykken inntraff (sammen med <i>Vitne D</i>).</p> <p>Rømte først bak blå telthall mot knuseverket; sprang til kummer med dreneringskraner og stengte kranene til Tankgård II; sprang til brannstasjon og startet overrislingsanlegget; evakuerte til slutt sørover langs sjøen.</p>	<p>Observerte først et kraftig smell ('tung dump lyd') som rystet brakken kraftig; var på sprang mot utgangen da det kom en ny og mye kraftigere eksplosjon (men muligens mindre rystelser i bygningen); antyder 20-30 sekunder mellom de to eksplosjonene; avventet mens stålskrammel haglet ned rundt brakken; observerte kraftig røykutvikling og gikk tilbake etter to gassmasker (ga den ene til <i>Vitne E</i>).</p>

Vitne	Vitnes plassering og bevegelser	Vitnes beskrivelse av hendelsen
Vitne I	Sto på kaiområdet ca. 700-800 m fra tankanlegget. Kjørte mot forbrenningsanlegget.	Hørte dypt drønn (kraftigere enn en salve i steinbruddet); så toppen på en tank "gå til himmels" og dele seg i mange deler, hvorav 3 større deler havnet i sjøen nord for M/T Karen Knutsen; umiddelbart etter at toppen blåste av kom det en mer enn 100 meter høy ildsøyle; etter 2-3 sekunder kom det en ca. 50 meter høy ildsøyle; deretter vedvarende flammer med høyde 10-20 meter over tanken; 5-10 minutter etter første eksplosjon kom det en svak eksplosjon.
Vitne J	Satt inne i semitrailer ca. 40 meter fra tankanlegget. Rømte først under bilen, sprang deretter sørover på kaiområdet til industriområdet ved Baker Oil.	Hørte et smell og så at toppen på tanken lettet og delte seg i flere deler; det haglet metalldele i 20-30 sekunder; mindre drønn og flammer i tiden som fulgte.
Vitne K	Ankom anlegget kl. 8; hadde møte med vitnene A, C, L og Q om status for prosessen som foregikk i T3; det hadde vært lukt ca. kl. 6, men avtatt til kl. 8; hadde vært røyk/damp kl. 8, syretilførselen stoppet, og Vitne C hadde vært oppe på tanken uten å observere noe spesielt. Vitnet gikk inn i Tankgård II og sjekket tilkoplingen på en pumpe ved tank T3; gikk deretter ut av tankgården og samlet sammen verktøy; stod mellom Tankgård II og syrebilen (sammen med Vitne A) da det smalt (15-20 sekunder etter at vitnet forlot tankgården); registrerte ingen tegn til flammer eller brann utenfor tankgården før det smalt. Rømte først under tankbilen; løp deretter mot brakkebygningen; så til brannstasjon og startet brann- og skumanlegget (møtte der Vitne H).	Hørte vislelyd i 3-5 sekunder før eksplosjonen; ble slått i bakken; så at tank T3 løftet seg i flammer og røyk; nytt smell etter 10-15 sekunder (tror det var tank T4); gjenstander fløy gjennom luften og haglet ned.
Vitne L	Ankom anlegget 8:50; på kontor i rød brakkebygning da ulykken inntraff. Rømte bak blå telthall og nordover på kaiområdet.	Hørte kraftig drønn; gjenstander fløy over brakken og noe kom ned gjennom taket.
Vitne M	Var sammen med en kollega midt inne i Tankgård III da ulykken inntraff, ca. 50 meter fra T3. Rømte sammen med kollegaen mot kaien, vekk fra tankene.	Merket at grunnen ristet; omlag 1 sekund etter eksplosjonen kom det et vindkast, og det haglet små metallbiter; så deler av en tanktopp som fløy gjennom luften (lignet på en presenning).

Vitne	Vitnes plassering og bevegelser	Vitnes beskrivelse av hendelsen
<b>Vitne N</b>	Da det smalt stod vitnet sammen med 2 kolleger ca. 60 meter fra tankanlegget og 10 meter nordvest for blå container. Søkte først dekning; hentet senere et kamera og tok en del bilder; tok seg etter hvert bort fra området.	Hørte ett smell (som om to biler kolliderte); så flammer i nærheten av den blå tanken (T3), med den blå tanken som bakgrunn; etter 2-4 sekunder eksploderte tanken; observerte stor metallidel på ca. 2 m <sup>2</sup> og deler av rekkverk som roterte gjennom luften over hodet på vitnet; så at taket på den andre store tanken (T4) seg sammen.
<b>Vitne O</b>	Var ombord på M/T Karen Knutsen da ulykken inntraff. Skipet ble trukket fra kai med taubåt.	Hørte stort smell og kjente rystelser; kl. var 09:55.
<b>Vitne P</b>	Ankom tankanlegget 8:30; stod ved den blå tankbilen.	Observerte at det begynte å blåse fra toppen av tank T3 like før eksplosjonen; så flammer og røyk ved bunnen av tanken før tanken løftet seg.
<b>Vitne Q</b>	Hadde overvåket syretilsetningen i løpet av natten sammen med <i>Vitne C</i> ; gikk hjem rundt 08:30, og så da at det kom hvit røyk ut av luffilteret med aktivt kull på toppen av den store blå tanken (T3); røyken/dampen gikk i oppløsning stort sett med det samme.	Var ikke tilstede da ulykken inntraff.
<b>Vitne R</b>	Sto på fergekaien i Sløvåg.	Hørte to kraftige smell like etter hverandre (ca. kl. 09:58); observerte så en svart og hvit røyksky.
<b>Vitne S</b>	Var ikke tilstede da ulykken inntraff.	Var ikke tilstede da ulykken inntraff.
<b>Vitne T</b>	Stod utenfor kontoret til Wergeland Halsvik AS, ca. 800 meter fra Vest Tank.	Observerte kraftig rystelse med påfølgende trykkbølge; en ildkule gikk til værs; tolket drønnet som to eksplosjoner som nærmest hang sammen.
<b>Vitne U</b>	Var ikke tilstede da ulykken inntraff.	Var ikke tilstede da ulykken inntraff.
<b>Vitne V</b>	Stod ved anlegget til Baker Oil Tool, ca. 500 meter fra tankanlegget.	Observerte at toppen på tanken ble løftet av en gassøyle; etter 3-5 sekunder kom et kraftig drønn, flammehav og sort røyk.
<b>Vitne W</b>	Stod ved anlegget til Baker Oil Tool, ca. 500 meter fra tankanlegget.	Observerte suselyd like forut for eksplosjonen; noe gikk til himmels, fulgt av ildsøyle, drønn og sort røyk; noen sekunder etterpå kom et nytt smell.

<b>Vitne</b>	<b>Vitnes plassering og bevegelser</b>	<b>Vitnes beskrivelse av hendelsen</b>
<b>Vitne X</b>	Sto ombord på M/T Karen Knutsen da ulykken inntraff. Skipet ble trukket fra kai med taubåt.	Observerte først små flammer mellom muren og den blå tanken (T3), deretter flammer i bakkant av den blå tankbilen; umiddelbart etterpå eksploderte tank T3; anslår tiden mellom første observasjon av flammer og eksplosjon til 2-3 sekunder.

**Tabell 3-2** Aktiviteter og hendelser ved tankanlegget til Vest Tank på Sløvåg forut for ulykken 24. mai 2007.

Tidsangivelse	Aktivitet / hendelse
Høst	Det monteres 3 nye tanker inne i Tankgård II: C1, C2 og C3.
2006	Okt. – nov. Det installeres luftfiltre med aktivt kull på tankene T3 og T4.
	Okt. – nov. Rensing av 'coker gasoline' fra tankskip igangsettes.
	Sen høst Installasjon av 3 apparatskap på utsiden av betongmuren (ikke Ex-utstyr, men utenfor Ex-sone).
Mars	Service på pumpe inne i tankgården (Ex-utstyr).
2007	April Møte ved Vest Tank; diskuterer håndteringen av avfallet fra rensingen av 'coker gasoline'; to muligheter skisseres: tilsette saltsyre, eller tilsette oksygen og varme (såkalt 'WAO-prosess'); det første alternativet velges.
	April – mai Laboratorieforsøk utføres med tilsetning av syre, forsøket vurderes som vellykket.
Mai 2007	09.05 Arbeidsmøte ved Vest Tank; diskuterer gjennomføringen av prosessen med syretilsetning.
	18.05 Saltsyren bestilles.
	21.05 SJA-møte (Sikker Jobb Analyse) ved Vest Tank; beslutter å skifte aktivt kull i luftfiltrene.
	22.05 Aktivt kull i kullfilter skiftet på tankene T3 og T4: 15-20 sekker à 25 kg.
23.05.2007	15:30 Tilsetning av saltsyre til tank T3 starter opp; tanken er i utgangspunktet fylt med en blanding av 50 m <sup>3</sup> avfall og 205 m <sup>3</sup> vann fra tank T61 (totalt 255 m <sup>3</sup> ); 18 m <sup>3</sup> saltsyre skulle tilføres i løpet av 18 timer.
	19:30 Vitne C går opp på tank T3 og inspiserer prosessen i tanken ved å lyse ned gjennom vippelokket med en lommelykt; merker ingen lukt, og ser at oljen begynner å skille seg.
24.05.2007	00:30-01:30 Vitne C observerer at mer olje har skilt seg.
	05:00 Vitne C observerer enda mer olje flyter oppå løsningen i tanken; oljedråpene henger sammen i flak omtrent som "froskeegg", og flakene sirkler rundt i tanken; ingen spesiell gasslukt.
	06:00 Det oppstår sterk lukt; Vest Tank mottar klage på telefon fra nabobedriften.
	07:00 Lukten har avtatt.
	08:00 Observasjon av hvit damp/røyk fra kullfilteret på toppen av tanken; antas å være damp fordi den løses opp svært raskt; syretilførselen stoppes; Vitne C sjekker igjen, men observerer ikke noe spesielt. Vitne K overtar for Vitne C, merker en kvalmende lukt.
	08:30 Vitne Q går hjem; observerer at det fremdeles kommer hvit røyk ut av filteret
	08:30-08:45 Syretilsetningen fortsetter.
	09:15-09:30 Observasjon av lekkasje på koblingen ved bilen; syretilførselen stoppes; ny slangestuss monteres, og syretilførselen gjenopptas.
	09:55-10:00 Eksplosjon i tank T3.



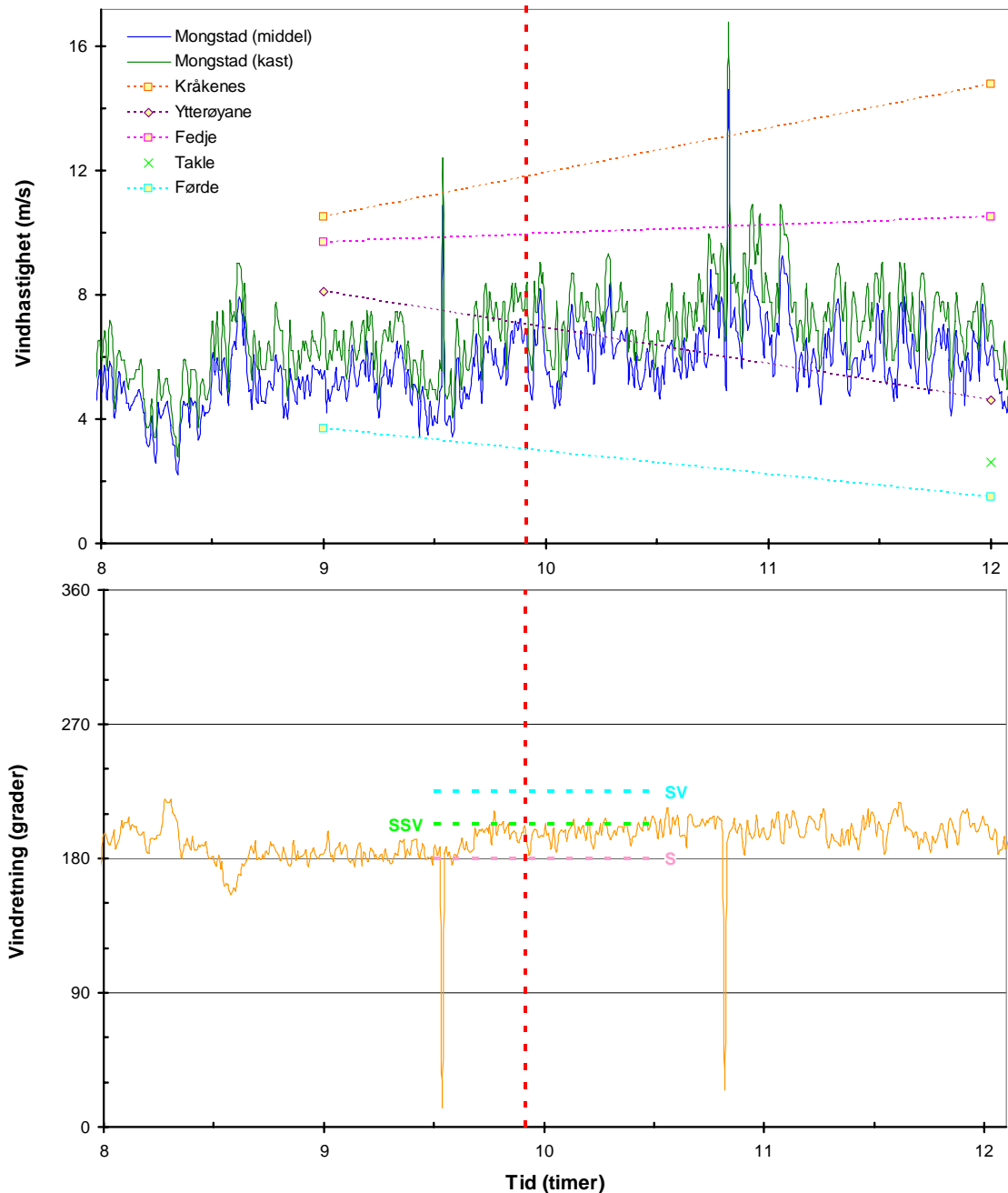
**Figur 3-2** Tankgård II sett fra syd (bildene er tatt fra toppen av tank T2, se Figur 1-2): det øverste bildet viser de tre mindre tankene C1-C3 (til venstre langs ringmuren), øvre del av tank T3 (kastet delvis opp på kanten av tankgården – merk at bunnen av T3 er dekket av vann i dette bildet), samt tank T4 midt i bildet (bilde fra Politiet, tatt 25.05.2007). Det nederste bildet viser restene av tankene T3 og T4, her vises bunnen av T3 (med varmerørene) fordi vannet i tankgården er drenert ut (bilde fra Politiet, tatt 31.05.2007).



**Figur 3-3** Tankgård II sett fra nord: det øverste bildet viser det som var igjen av de fem tankene, samt skaden på ringmuren og vindeltrappen (bilde fra Politiet, tatt 25.05.2007); de to nederste bildene viser restene av tankene T3 og T4 (bilder fra Politiet, tatt henholdsvis 25.05.2007 og 31.05.2007).

### 3.3 Værdata og kart

Værdata fra ulike kilder for den aktuelle tidsperioden er oppsummert i Figur 3-4, og noen aktuelle topografiske kart og satellitt-/flyfotografier fra Norges Geologiske Undersøkelse (NGU, www.ngu.no) er vist i Figur 3-5. Denne informasjonen har blitt benyttet i beregninger som presenteres i avsnitt 5.3.



**Figur 3-4** Værdata basert på observasjoner fra oljeraffineriet på Mongstad (data fra Terje Palmesen, HMS-leder, Foredling, Statoil; mottatt via DSB) og ulike værstasjoner (data fra Anne Haaland Simonsen, Statsmeteorolog, Meteorologisk Institutt, Værvarslinga på Vestlandet; mottatt fra Masfjorden Lensmannskontor): Vindhastigheter (øverst) og vindretninger (nederst).



**Figur 3-5** Aktuelle topologiske kart i forbindelse med værdata presentert i Figur 3-4: oversiktskart som viser Fedje, Mongstad og Sløvåg (øverst), og et mer detaljert kart som viser oljeraffineriet på Mongstad og Sløvåg (nederst).

## 4 Fysisk eksplosjon

Dette kapitlet inneholder en vurdering av hvorvidt forholdene forut for ulykken og hendelsesforløpet som beskrives av vitnene er forenlige med en eventuell fysisk eksplosjon i tank T3.

En eventuell fysisk eksplosjon i tank T3 kan bare ha funnet sted dersom det inne i tanken ble produsert store mengder gass, eller at andre mekanismer forårsaket en oppvarming av gassen inne i tanken (termisk ekspansjon). Dessuten måtte disse prosessene ha funnet sted tilstrekkelig hurtig til at trykket kunne bygge seg opp, og ikke begrenses ved trykkavlastning gjennom åpningene i tanken. Dersom vi antar at tanken hadde en styrke som minst tilsvarte det statiske trykket fra en 12,5 meter væskesøyle med tetthet rundt  $720 \text{ kg m}^{-3}$  (ville tilsvare 80 % fyllingsgrad av 'coker gasoline' i tank T3), måtte tanken kunne motstå et innvendig overtrykk på minst 0,88 bar. Skadene på tanken (måten den revnet på) indikerer at sveiseforbindelsene mellom tankvegg og tankbunn, og mellom tankvegg og tanktopp, var omtrent like sterke (siden tanken revnet både langs topp og bunn). For at det skulle opparbeides et indre overtrykk på 0,88 bar eller mer måtte trykkoppbygningsraten ha vært større enn trykkavlastningen gjennom åpningene på toppen av tanken. Hvis vi antar at vippelokket var stengt ('worst case'), slik at det kun var trykkavlastning gjennom filteret med aktivt kull, tilsvarer et indre overtrykk på 0,88 bar en utstrømningsrate på  $9,3 \text{ kg s}^{-1}$  for gass med molekylvekt som pentan ( $72 \text{ g mol}^{-1}$ ), og  $5,9 \text{ kg s}^{-1}$  for gass med molekylvekt som luft ( $29 \text{ g mol}^{-1}$ ). Med åpent vippelokk blir de tilsvarende utstrømningsratene vesentlig større.

For å oppnå et tilstrekkelig høyt indre overtrykk i tanken måtte damputviklingsraten inne i tanken minst tilsvare avlastningsraten, noe som for tank T3 impliserer en damputviklingsrate på  $23\text{--}36 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $83\text{--}131 \text{ kg m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ ). Til sammenligning er fordampningsraten for pentan  $27,1 \text{ kg m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$  ved  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  (Kawamura & MacKay, 1987). Pentan har forøvrig et kokepunkt på  $36,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Fordampningsraten som måtte til for at det skulle kunne finne sted en fysisk eksplosjon er derfor veldig høy – den er for eksempel høyere enn man kunne oppnå ved koking av for eksempel pentan (ved en antagelse om at fordampningsraten er lineært avhengig av damptrykket). Videre er det verdt å merke seg at flere vitner har observert en lyd som minnet om utblåsing fra en tank umiddelbart før eksplosjonen inntraff, men at denne lyden varte maksimalt 1-2 sekunder. En mulig mekanisme som skulle medføre en hurtig økning i dannelsen av gass måtte derfor ha intrådt i løpet av svært kort tid. Basert på disse vitneobservasjonene, samt overslagene ovenfor, synes et ulykkesscenario basert på fysisk eksplosjon å være svært lite sannsynlig. Det kan ikke desto mindre være av interesse å vurdere ulike mekanismer for hurtig utvikling av gass fra væskeoverflaten: fordampning av hydrokarboner, koking av vann, eller svært hurtig frigjøring av svovelholdige komponenter som følge av syretilsetning til den basiske løsningen i tanken.

Mengden av lette hydrokarboner som var igjen i væsken var sannsynligvis svært begrenset, blant annet fordi mannlokket på toppen av tanken hadde stått åpent over en periode på ca. 4 uker (frem til noen dager forut for ulykken), slik at de letteste komponentene hadde fått mulighet til å fordampe. Det aller meste av den brennbare væsken inne i tanken hadde dessuten blitt fjernet i forkant av tilsetningen av saltsyre. Fordampning av tyngre komponenter (tyngre enn luft) vil normalt føre til at det danner seg et lag av tung damp som dekker væskeoverflaten. Det vil da oppstå en likevekt mellom fordampning og kondensering som begrenser ytterligere netto fordampning. Man kan derfor i praksis se bort fra muligheten for at hurtig fordampning av hydrokarboner produserte tilstrekkelige mengder av gass til å kunne forklare en fysisk eksplosjon.

Fordampning av vann vil kun gi den nødvendige damputviklingsraten ved temperaturer i væsken som ligger over kokepunktet på vann ( $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Et damptrykk på 0,88 bar for vann oppnås ved en temperatur på ca.  $95 \text{ }^\circ\text{C}$ , men da i en lukket beholder. Det er høyst usannsynlig at så høye temperaturer skulle kunne oppstå som følge av den kjemiske reaksjonen mellom syre og lut (se avsnitt

5.2), og enda mer usannsynlig at en slik prosess skulle finne sted tilstrekkelig hurtig til å forklare hendelsesforløpet på Sløvåg 24. mai, slik det beskrives av vitneobservasjoner.

Det er betydelig usikkerhet knyttet til hvor hurtig det kan ha blitt utviklet gass som følge av redusert løselighet av blant annet svovelholdige komponenter når pH-verdien i løsningen ble redusert fra over 11 til ned mot 9 (som følge av tilsetning av saltsyre – se forøvrig diskusjonen under avsnitt 5.1). Estimer avledet fra avdampingsforsøk gjennomført av politiet i et åpent begerglass (Politiets ref. 0723.11705b, 2007) antyder en mulig utviklingsrate for slike gasser på omtrent  $1 \text{ kg s}^{-1}$  for den aktuelle tanken, men den relative mengden av saltsyre som ble tilsatt i laboratorieforsøket var trolig lavere enn for prosessen som fant sted i tank T3 forut for ulykken. Det er videre uklart hvorvidt den totale gassutviklingsraten i forsøket ble påvirket av fordampning av vann (siden begerglasset var åpent). Forøvrig var konsentrasjonen av merkaptaner som ble målt over væsken relativt lav (12 ppm). Det må også poengteres at det er betydelig usikkerhet knyttet å ekstrapolere resultater fra en test foretatt i laboratorieskala til virkelige industrielle situasjoner på stor skala. Til tross for denne usikkerheten vurderes det som høyst usannsynlig at endringen i løselighet skulle skje så hurtig at det skulle kunne oppstå en fysisk eksplosjon i tank T3.

Basert på den antatte kjemiske sammensetningen til væsken som befant seg inne i tank T3, samt vitneobservasjoner av hendelsesforløpet, anses det derfor som svært lite sannsynlig at ulykken ble forårsaket av en fysisk eksplosjon som følge av gassutvikling inne i tanken. Det er derfor overveiende sannsynlig at det fant sted en kjemisk eksplosjon i tanken, og slike hendelsesforløp utdypes ytterligere i de neste to kapitlene.

## 5 Dannelsen av eksplosiv atmosfære

Ut fra analysen presentert i forrige kapittel anses det som svært lite sannsynlig at det kan ha funnet sted en fysisk eksplosjon i tank T3 den 24. mai 2007. Følgelig er det overveiende sannsynlig at ulykken skyldtes en kjemisk eksplosjon. En realistisk beskrivelse av mulige hendelsesforløp må derfor kunne redegjøre for hva den brennbare gassen bestod av, hvordan den eksplosive blandingen inne i tanken oppstod, og hva som antente blandingen (jfr. avsnitt 1.2 og 1.4). Dette kapitlet fokuserer på mulige brensel og dannelse av eksplosiv atmosfære, mens potensielle tennkilder inne i eller utenfor tank T3 behandles i Kapittel 6.

### 5.1 Brennbart materiale inne i tank T3

Det er knyttet en viss usikkerhet til den faktiske sammensetningen av løsningen som befant seg inne i tank T3 forut for ulykken, men det er klart at flere av komponentene var brennbare. I det følgende vurderes det hvor store mengder av ulike brennbare komponenter som kan ha vært tilstede, blant annet i lys av eksplosjonsegenskapene til de mest aktuelle komponentene i blandingen.

#### Damp fra rester av 'coker gasoline' og beslektede brennbare væsker

Til tross for at mye ble gjort for å fjerne mest mulig av den brennbare væsken fra tank T3 i forkant av tilsetningen av saltsyre (se avsnitt 1.3), er det rimelig å anta at det kan ha vært en liten rest av 'coker gasoline' igjen i tanken. Tabell 5-1 oppsummerer sammensetning og egenskaper til 'coker gasoline' i henhold til det tilgjengelige databladet (Pemex, 2005), samt målte verdier for merkaptant svovel før og etter renseprosessen med natriumhydroksid i henhold til vitneavhør (*Vitne L*). Det er verdt å merke seg at de målte verdiene tyder på et langt høyere innhold av merkaptaner enn det databladet skulle tilsi (i størrelsesorden tusen ganger høyere). Det er uklart om dette avviket skyldes at verdiene fra databladet er tiltenkt en ferdig rensert versjon av 'coker gasoline', (Tabell 5-1 tyder i så fall på at det måtte ytterligere rensing til etter behandlingen ved Vest Tank for å oppnå verdier rundt 1 ppm), eller om de eksperimentelle målingene kan ha blitt påvirket av andre svovelforbindelser enn merkaptaner.

Tabell 5-2 oppsummerer en del egenskaper for 'coker gasoline', samt tilsvarende egenskaper for noen av komponentene i 'coker gasoline'. Når det gjelder eksplosjonsgrenser og kokepunkt har 'coker gasoline' mye til felles med pentan. Følgelig kan et grovt anslag over hvor mye 'coker gasoline' som måtte fordampe og blande seg med luft for å fylle det frie volumet i tank T3 med eksplosiv atmosfære finnes ved å benytte verdier for pentan. Tabell 5-3 oppsummerer hvor stor masse av ulike brensel som i gassform, og blandet med luft, ville gitt ulike eksplosive konsentrasjoner inne i tanken. For pentan ville 152 kg gitt en homogen blanding tilsvarende nedre eksplosjonsgrense (LFL), 277 kg ville gitt støkiometrisk blanding, og 847 kg ville gitt en blanding tilsvarende øvre eksplosjonsgrense (UFL).

Mens tilsetning av saltsyre til tank T3 pågikk observerte *Vitne C* at det dannet seg et lag av en oljeaktig væske som fløt oppå løsningen. Siden en prøve av en tilsvarende væske som ble dannet under pilotforsøket utført i liten skala viste seg å være brennbar, bestod væskelaget som dannet seg inne i tank T3 etter all sannsynlighet også av en brennbar væske. Sammensetningen på denne væsken er ikke kjent, men det er kanskje ikke urimelig å anta at en del av komponentene er de samme som i 'coker gasoline'.

Forøvrig var det også en del brennbare komponenter i avfallsvæsken som ble tilsatt fra tank T61 for å tynne ut avfallet i tank T3. Sammensetningen av denne væsken har blitt undersøkt ved hjelp av gaskromatografi (ALS Analytica NUF, utført for Politiet, 29. august 2007). Hovedkomponenten i

væsken er vann, men det ble også påvist en god del brennbare komponenter: metanol, merkaptaner (bl.a. metantiol, etantiol, 2-propantiol, 1-propantiol, 2-butantiol og 1-butantiol), diklormetan, metyltertiærbutyleter (MTBE, eller 2-metyl-2-metoksypropan), og disulfider (bl.a. dimetyldisulfid, metyletyldisulfid, etyl-1-metyletyldisulfid, etyl-n-propyldisulfid, 1-metyl-etyl-propyldisulfid, samt en del uspesifiserte disulfider).

Siden 'coker gasoline' har lavere tetthet enn vann ville en eventuell rest (etter fjerningen av brennbar væske i forkant av tilsetning av vann fra tank T61) kunne danne et lag som fløt oppå den øvrige lut/syre løsningen. Hvor mye den oljeaktige væsken som ble observert av *Vitne C* har til felles med 'coker gasoline' er usikkert, men begge væskene er brennbare, og fordampning fra det øverste væskelaget ville derfor bidra til at det ble dannet en eksplosiv atmosfære inne i tank T3. Med en tankdiameter på 18 m (væskeoverflate 254 m<sup>2</sup>) er tykkelsen på et tenkt overflatelag av pentan som tilsvarer 152 kg (LFL), 277 kg (støkiometrisk blanding) og 847 kg (UFL) henholdsvis 0,95 mm, 1,73 mm og 5,28 mm. Når et slikt lag fordampes vil det i praksis neppe bli en homogen blanding inne i tanken på grunn av begrenset omrøring av innholdet i tanken. De lettere komponentene vil fordampe kontinuerlig, og denne prosessen har sannsynligvis pågått siden mannløkkene ble montert etter fylling av væske fra tank T61 (før dette hadde tanken stått til utlufting i ca. 4 uker). Tilsetning av saltsyre medførte trolig at temperaturen i væsken økte noe (eksoterm reaksjon mellom syre og base), og dermed økte fordampningsraten for de tyngre komponentene slik at det kom ytterligere bidrag til den eksplosive atmosfæren inne i tanken. Forøvrig trengte strengt tatt ikke den eksplosive blandingen å fylle hele tanken for at det skulle bli en eksplosjon, men det måtte selvsagt komme eksplosiv blanding frem til en tennkilde.

**Tabell 5-1** Sammensetning av 'coker gasoline' i henhold til datablad (Pemex, 2005) og vitneavhør (Vitne L).

Komponent	Konsentrasjon
Alkaner (parafiner)	56,98 vol%
Alkener (olefiner)	23,43 vol%
Sykloalkaner (naftener)	10,57 vol%
Aromater	4,80 vol%
Hydrogensulfid	< 5 ppm wt
Totalt innhold av svovel	8500 ppm wt
Merkaptant svovel iht. datablad:	1 ppm wt
Merkaptant svovel iht. vitneavhør – før renseprosessen ved Vest Tank	1200 ppm wt
Merkaptant svovel iht. vitneavhør – etter renseprosessen ved Vest Tank	500 – 900 ppm wt

**Tabell 5-2** Egenskaper til utvalgte komponenter i 'coker gasoline': molekylvekt  $M_w$ , kokepunkt  $T_b$ , spesifikk tetthet av væske SG (ved romtemperatur, tetthet relativ til tetthet for vann ved 4 °C), nedre flammegrense LFL, støkiometrisk konsentrasjon  $C_{stoic}$ , øvre flammegrense UFL, selvantennelsestemperatur  $T_{AIT}$ , og flammepunkt  $T_{FP}$ . Data hentet fra Kuchta (1985), Babrauskas (2003), Perry (1997) og datablad for 'coker gasoline' (Pemex, 2005). Damptrykket for 'coker gasoline' er i databladet oppgitt til 0.52 bar (7.6 psi). Manglende verdier (NA) skyldes enten at verdien ikke er entydig definert (for eksempel kokepunkt for 'parafiner'), at verdien ikke har mening (for eksempel spesifikk tetthet av  $H_2S$  i væskefase ved romtemperatur og atmosfæretrykk), eller at verdien ikke ble funnet i litteraturen.

Komponent	$M_w$ (g mol <sup>-1</sup> )	$T_b$ (°C)	SG (-)	LFL (vol%)	$C_{stoic}$ (vol%)	UFL (vol%)	$T_{AIT}$ (°C)	$T_{FP}$ (°C)
Parafiner	> 216	NA	NA	1,3	NA	8,1	242	NA
Pentan	72,15	36,3	0,630	1,4	2,55	7,8	258	- 49
Metylmerkaptan	48,11	5,8	0,896	3,9	6,53	22	325	- 17
Metylmerkaptid	70,11	>210	1.34	NA	NA	NA	NA	NA
Etylmerkaptan	62,13	36	0,839	2,8	4,53	18	295	- 20
Hydrogensulfid	34,08	- 59,6	NA	4,0	12,25	44	270	NA
'Coker gasoline'	NA	33	0,718	1,3 – 1,4	NA	7,1 – 7,6	280	- 45

**Tabell 5-3** Relevante data for aktuelle brensel i forbindelse med eksplosjonen i tank T3: tetthet for rent brensel i gassform (1 bar og 25 °C)  $\rho_{amb}$ , samt massen av brensel som blandet med luft ville gitt en eksplosiv atmosfære som fylte hele det frie volumet i tanken (antatt å være 3730 m<sup>3</sup>) med homogene blandinger tilsvarende henholdsvis nedre eksplosjonsgrense  $m_{LFL}$ , støkiometrisk blanding  $m_{stoic}$ , og øvre eksplosjonsgrense  $m_{UFL}$ .

Komponent	$\rho_{amb}$ (kg m <sup>-3</sup> )	LFL (vol%)	$m_{LFL}$ (kg)	$C_{stoic}$ (vol%)	$m_{stoic}$ (kg)	UFL (vol%)	$m_{UFL}$ (kg)
Pentan	2,91	1,4	152	2,55	277	7,8	847
Metylmerkaptan	1,94	3,9	282	6,53	473	22	1 593
Etylmerkaptan	2,51	2,8	262	4,45	416	18	1 683
Hydrogensulfid	1,37	4,0	205	12,25	628	44	2 256

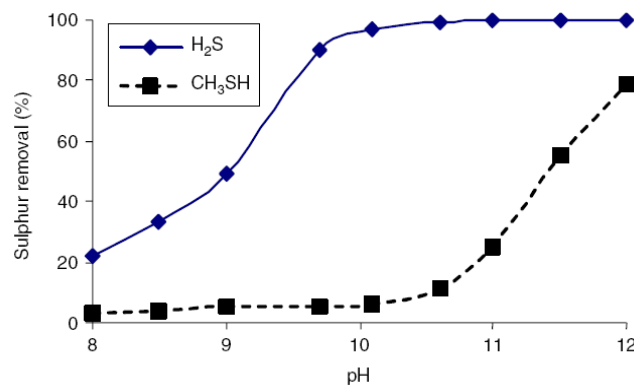
## Merkaptaner frigjort som resultat av redusert løselighet ved lavere pH

En alternativ kilde til brennbart materiale inne i tank T3 er merkaptaner, og muligens hydrogensulfid, som stammet fra rensingen av 'coker gasoline'. Et grovt estimat for den totale mengden av merkaptaner som kan ha blitt fjernet fra tanklastene med 'coker gasoline' i perioden oktober 2006 til april 2007 kan finnes fra tallene for innhold av merkaptan før og etter renseprosessen ved Vest Tank (se Tabell 5-1). Dersom vi tar utgangspunkt i at det var 6 laster à 32 000 m<sup>3</sup> med 'coker gasoline', og at innholdet av merkaptaner ble redusert fra 1 200 ppm til 900 ppm (på vektbasis), utgjør den totale mengden av merkaptaner som fjernes i renseprosessen (dvs. 1 200 ppm – 900 ppm = 300 ppm):

$$6 \text{ tanklaster} \times 32\,000 \text{ m}^3 \text{ tanklast}^{-1} \times 0,000300 \times 720 \text{ kg m}^{-3} = 41\,470 \text{ kg}$$

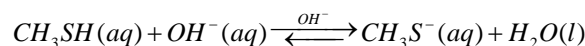
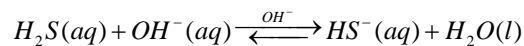
Til sammenligning kreves det i henhold til Tabell 5-3 bare 282 kg metylmerkaptan for å fylle et fritt volum på 3 730 m<sup>3</sup> i tank T3 med laveste eksplosive blanding (LFL = 3,9 %), og 473 kg for å fylle tanken med støkiometrisk blanding (C<sub>stœic</sub> = 6,53 %). Med andre ord ville det under disse antakelsene vært tilstrekkelig med et bidrag på mindre enn 0,7 % av den totale mengden av merkaptaner som hadde blitt fjernet fra 'coker gasoline' for å lage en eksplosiv blanding i hele tank T3 (LFL), mens 1,1 % måtte til for å fylle tanken med støkiometrisk blanding.

En plausibel mekanisme for frigjøring av merkaptaner fra løsningen er redusert løselighet når pH-verdien i løsningen avtar som følge av tilsetning av saltsyre. Figur 5-1 illustrerer effekten av pH på løseligheten av hydrogensulfid og metylmerkaptan i en NaOH-løsning (Couvert *et al.*, 2006).

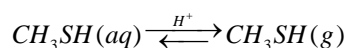


**Figur 5-1** Effekten av pH-verdien i NaOH-løsninger på reduksjon i konsentrasjonen av hydrogensulfid (H<sub>2</sub>S) og metylmerkaptan (CH<sub>3</sub>SH) etter 45 minutter, målt i et laboratorieforsøk med en småskala absorpsjonssøyle (vasketårn); gasstemperatur 25 °C og startkonsentrasjoner [H<sub>2</sub>S]<sub>i</sub> = [CH<sub>3</sub>SH]<sub>i</sub> = 7 ppm; fra Couvert *et al.* (2006).

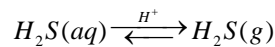
Høyere pH resulterer i økt løselighet fordi både hydrogensulfid (H<sub>2</sub>S) og metylmerkaptan (CH<sub>3</sub>SH) reagerer som syrer i likevektene:



Det bør bemerkes at forsøkene som beskrives av Couvert *et al.* ble utført i et kontakttårn der man målte hvor mye gass som løste seg i natriumhydroksidløsninger med ulik pH, det vil si 'den motsatte' prosessen av den som eventuelt kan ha funnet sted i tank T3 ved Vest Tank. På Sløvåg ble det tilsatt saltsyre til tanken for å senke pH-verdien i løsningen. Dette medførte sannsynligvis økt massetransport av CH<sub>3</sub>SH over grenseflaten mellom væske og gass i henhold til likevekten:



I den grad løsningen i tank T3 også inneholdt hydrogensulfid ville lavere pH også medføre at denne gassen ble skilt ut i henhold til likevekten:



Følgelig er det rimelig å anta at det, som følge av at det ble tilsatt saltsyre, ble frigjort merkaptangass fra løsningen, og at denne gassen blandet seg med lufta inne i tanken. Løseligheten av metylmerkaptan ( $CH_3SH$ ) i vann ved 25 °C er 23,3 kg m<sup>-3</sup> (MTC, 2001), og i natriumhydroksidløsninger er løseligheten langt høyere (ATOFINA, 2001).

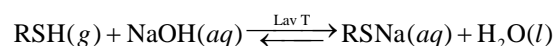
Selv om det meste av den opprinnelige væsken i tank T3 ble fjernet før prosessen satte i gang er det mulig at bunnfallet, eller 'wasten', som befant seg i tanken har inneholdt en betydelig andel merkaptansalter, disulfider (RSSR) eller andre forbindelser. Slike forbindelser kan i større eller mindre grad ha blitt omdannet til merkaptaner når det ble tilsatt avfallsvann fra tank T61, og senere saltsyre. Forøvrig avtar løseligheten av merkaptaner i både vann og natriumhydroksid raskt med økende molekylvekt (ATOFINA, 2001), og det er derfor sannsynlig at bunnfallet kan ha inneholdt en betydelig andel tyngre merkaptaner, merkaptansalter og disulfider.

Natriumsaltet av metylmerkaptan (metylmerkaptid,  $CH_3SNa$ ) kan dannes ved å la metylmerkaptan boble gjennom en vannløsning av natriumhydroksid. For høye pH-verdier forskyves likevekten i løsningen mot mer metylmerkaptid, og for lave pH-verdier forskyves likevekten mot mer metylmerkaptan. Ifølge Mercaptans/Thiols Council (MTC, 2001) vil forholdet mellom metylmerkaptid og metylmerkaptan i en løsning med temperatur 25 °C være 1:1 ved en pH 10,7, og forskyves med en faktor 10 for endringer i pH på 1,0:

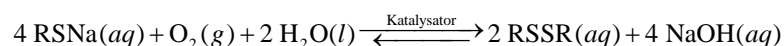
- 100:1 for pH på 8,7 (hovedsakelig metylmerkaptan).
- 10:1 for en pH 9,7.
- 1:1 for pH 10,7 (like mye metylmerkaptan som metylmerkaptid i løsningen).
- 1:10 for pH 11,7.
- 1:100 for pH 12,7 (hovedsakelig metylmerkaptid).

Følgelig vil tilsetning av saltsyre til en basisk løsning med høyt innhold av merkaptider føre til at det frigjøres merkaptangasser.

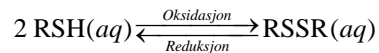
Det finnes for øvrig mange metoder for å fjerne svovelholdige komponenter som hydrogensulfid og merkaptaner fra petroleumsprodukter, og flere av metodene utnytter det faktum at merkaptaner med lav molekylvekt har høy løselighet i natriumhydroksidløsninger. Et eksempel på en slik metode er den såkalte Merox<sup>TM</sup> prosessen der merkaptaner blir fjernet fra flytende hydrokarboner i en tottrinns prosess (UOP, 2007). I det første trinnet ekstraheres merkaptanforbindelsene i NaOH-løsningen slik at det hovedsakelig dannes natriumsalter (eller natriummerkaptider) av merkaptanene:



I det andre trinnet blir NaOH-løsningen som inneholder merkaptaner i form av natriummerkaptider regenerert i henhold til reaksjonslikningen:



Katalysatoren er ifølge UOP (2007) nødvendig for at reaksjonen skal finne sted med en 'økonomisk akseptbar rate', og det er derfor usikkert hvorvidt det over tid har blitt dannet vesentlige mengder disulfider i forbindelse med rensingen av 'coker gasoline' ved Vest Tank. Disulfidbindingen er imidlertid en relativt svak kjemisk binding, og det kan derfor ikke utelukkes at eventuelle disulfider i bunnfallet fra tank T3 kan ha blitt redusert tilbake til merkaptaner (Patai, 1974; Streitwieser *et al.*, 1992):



Følgelig er det sannsynlig at noe av det bunnfelte avfallet i tank T3 bestod av disulfider dannet fra merkaptaner, og at tilsetningen av saltsyre til løsningen medførte at en del av disse sulfidene ble redusert tilbake til merkaptaner.

Forutsatt at behandlingen av 'coker gasoline' ved Vest Tank innebar en betydelig reduksjon i konsentrasjonen av løste merkaptaner, fra omtrent 1200 ppm til 900 ppm eller lavere (*Vitne L*), og gitt at en betydelig del av det bunnfelte materialet fortsatt var del av det faste avfallet inne i tank T3, var det definitivt mer enn nok potensielt brensel til stede inne i tanken til å forklare eksplosjonen som fant sted 24. mai.

### Laboratorieforsøk for å estimere avdampningsraten i tank T3

Politiet har rapportert noen foreløpige resultater fra forsøk som kan gi en pekepinn om avdampningsraten fra løsningen som befant seg i tank T3 i forkant av ulykken (Politiet ref. 0723.11705b, 2007). Testene ble gjennomført i begerglass med diameter 66 og 56 mm. I begerglassene ble 'waste' blandet med enten rent vann eller vann fra tank T61. Til 10 g løsning ble det tilsatt 0,054 g 36 % saltsyre, eller omlag 10% av den relative mengden tilsatt tank T3 i forkant av ulykken ( $0,054\text{g} \div 10\text{g} = 0,0054$  mens  $14\text{m}^3 \div 255\text{m}^3 = 0,055$ ). Gassutviklingsraten ble rapportert som vektutviklingsrate som funksjon av tid, og viste en tilnærmet lineær massefluks på  $1,85 \cdot 10^{-5} \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$  for en væskehøyde på omtrent 4 mm. Forut for ulykken var væskehøyden i tank T3 omtrent 1 m, slik at en enkel antakelse om volumetrisk frigjøring av merkaptaner gir en massefluks på  $4,6 \cdot 10^{-3} \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ . Væskeoverflaten i tanken var ca.  $254 \text{ m}^2$ , slik at den totale estimerte gassutviklingsraten blir ca.  $1,16 \text{ kg s}^{-1}$ . I disse forsøkene ble det påvist merkaptaner over væskespeilet, men ikke målbare mengder av  $\text{H}_2\text{S}$  eller hydrokarboner. I lys av mengden saltsyre som ble tilsatt kan man forvente at pH-verdien i løsningen beveger seg i et område hvor merkaptaner blir mindre løselig i vann (pH rundt 11), men ifølge Figur 5-1 burde det trolig vært tilsatt mer saltsyre for å frigjøre eventuell  $\text{H}_2\text{S}$  i løsningen. Hvorvidt laboratorieforsøkene gir et realistisk anslag over den reelle gassutviklingsraten som fant sted i tank T3 i tiden forut for ulykken er vanskelig å si.

### Mulige bidrag fra andre brennbare gasser

Det kan ikke utelukkes at den eksplosive atmosfæren inne i tank T3 også kan ha inneholdt bidrag av andre brennbare gasser. Det har for eksempel blitt vurdert hvorvidt hydrogengass kunne blitt dannet gjennom en reaksjon mellom stål og syre (eventuelt lut), men det har ikke vært mulig å finne kilder som underbygger en slik hypotese. De fleste kilder som omhandler denne typen korrosjonsprosesser tyder derimot på at kun svært begrensede mengder hydrogen ville kunne dannes innenfor det aktuelle tidsrommet (f.eks. Bengough *et al.*, 1931).

### Diskusjon av mulig brennbart materiale i tank T3

Det er sannsynlig at tilsetning av saltsyre til løsningen som befant seg i tank T3 forut for ulykken har gitt opphav til to mekanismer som bidro til dannelsen av en eksplosiv atmosfære inne i tanken:

- Utskilling av et overflatelag bestående av 'coker gasoline' og/eller liknende brennbare væsker, med påfølgende fordampning av lettere komponenter.
- Redusert løselighet av organiske svovelforbindelser i vann som følge av en reduksjonen i pH, med påfølgende frigjøring av merkaptaner og muligens hydrogensulfid.

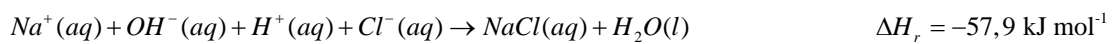
Det er rimelig sannsynlig at begge disse mekanismene har funnet sted under det reelle hendelsesforløpet i tank T3, men det er i ettertid vanskelig å estimere det relative bidraget fra hver enkelt av disse to prosessene. Forutsatt at det opprinnelige innholdet av merkaptaner i 'coker

gasoline' var i samsvar med verdiene oppgitt i vitneavhør (altså betydelig høyere enn oppgitt på databladet), er det ikke urimelig å anta at bidraget fra merkaptaner i NaOH-løsningen har hatt størst betydning for dannelsen av den eksplosive atmosfæren inne i tanken.

## 5.2 Dannelse av eksplosiv atmosfære inne i tank T3

For at det skulle finne sted en kjemisk eksplosjon i tank T3 den 24. mai måtte det dannes en eksplosiv blanding av en brennbar gass og luft inne i tanken, samtidig som det var en tennkilde tilstede. Fra diskusjonen i avsnitt 5.1 tyder det meste på at det har vært tilstrekkelig tilgang på brensel inne i tanken. Transport og blanding av gassen som ble avgitt fra væskeoverflaten kan ha skjedd ved oppdrift som følge av en vertikal temperaturgradient (dersom løsningen i bunnen av tanken ble varmet opp som følge av eksoterme reaksjoner), diffusjon som følge av en vertikal konsentrasjonsgradient, og/eller konveksjon som følge av bevegelser i væsken (for eksempel sirkulasjon av innholdet under tilsetning av syre).

En vertikal temperaturgradient kan ha oppstått som følge av frigjøring av oppvarmet damp fra væskeoverflaten. Oppvarming av løsningen kan ha vært et resultat av eksoterme kjemiske reaksjoner, for eksempel mellom saltsyre og natriumhydroksid i løsningen. Nøytralisering av natriumhydroksid med saltsyre innebærer en eksoterm syrebasereaksjon (Book of Data, 1984):



Dersom vi antar at det totalt ble tilsatt 14,5 m<sup>3</sup> 36 % saltsyre med tetthet 1179 kg·m<sup>-3</sup> (iht. datablad for 'Saltsyre 30-36%'), har vi 6153 kg ren saltsyre, eller 168,8 kmol ( $M_{\text{HCl}}=36,462 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ). Den totale energimengden som frigjøres i reaksjonen blir da  $57,9 \cdot 10^3 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1} \cdot 168,8 \cdot 10^3 \text{ mol} = 9,77 \cdot 10^9 \text{ J}$ , som fordelt over en total væskemengde på 270 m<sup>3</sup> gir en temperaturøkning (uten varmetap) på  $9,77 \cdot 10^9 \text{ J} \div (4184 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1} \cdot 270 \cdot 10^3 \text{ kg}) = 8,7 \text{ °C}$  (eller 9,2 °C for totalt 255 m<sup>3</sup> væske). I disse beregningene er det antatt at tettheten og den spesifikke varmekapasiteten for løsningen i tanken er som for rent vann, og at det ikke finner sted varmetap til omgivelsene. Det tas heller ikke hensyn til at det kan forekomme betydelig høyere lokal oppvarming dersom relativt konsentrert saltsyre kommer i kontakt med klumper av bunnfall/'waste' inne i tanken. Resultatene stemmer forøvrig rimelig godt overens med beregninger rapportert av Vest Tank i en foreløpig uhellsrapport, og skiller seg heller ikke mye fra temperaturøkningen på 5 °C som ble rapportert fra pilotforsøkene som ble gjennomført i liten skala (Berland, 2007). Det er forøvrig en betydelig usikkerhet knyttet til eventuelle bidrag fra øvrige eksoterme reaksjoner som kan ha funnet sted i løsningen når saltsyren ble tilsatt.

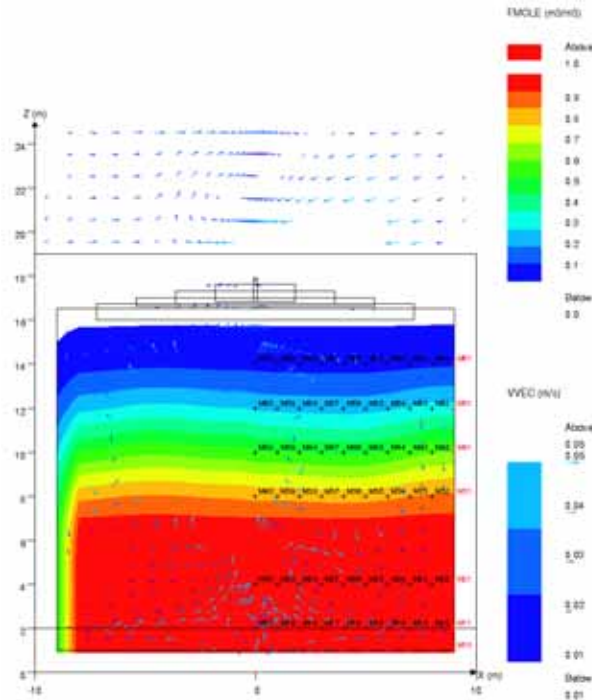
Med hensyn på identifikasjon av mulige tennkilder kan det ikke desto mindre være av interesse å studere nærmere hvordan selve blandingsprosessen mellom brennbar gass og luft kan ha funnet sted inne i tanken, og slike prosesser har blitt simulert med CFD-koden FLACS. Det har blitt utført tre simuleringer for å studere dannelsen av eksplosiv blanding som følge av frigjøring av brennbar gass fra løsningen i bunnen av tank T3. Det er antatt at dampen som frigjøres fra væskeoverflaten hadde temperaturer på henholdsvis 35, 50 og 70 °C, mens resten av innholdet i tanken hadde en temperatur på 12 °C. I toppen av tanken er det tatt med en åpning som tilsvarer åpningen mot kullfilteret. Den totale utslippsraten ble antatt å være på 1 kg s<sup>-1</sup>, jevnt fordelt over hele væskeoverflaten. Denne utslippsraten er valgt ut fra en betraktning om hvor stor utslippsrate som måtte til for at vippelokket på toppen av tanken skulle åpne seg, men raten tilsvarer også raten som ville oppstått ved eventuell koking av pentan på væskeoverflaten (se avsnitt 5.3). Gassen som utvikles er imidlertid representert

som propan med en molekylvekt på 44 gram mol<sup>-1</sup>. Hovedargumentet for å benytte denne molekylvekten var å få en tetthet på gassen som var representativ for både de lettere komponentene i 'coker gasoline og samtidig de mest relevante svovelholdige gassene (molekylvektene for metylmerkaptan og hydrogensulfid er henholdsvis 48 og 34 gram mol<sup>-1</sup>).

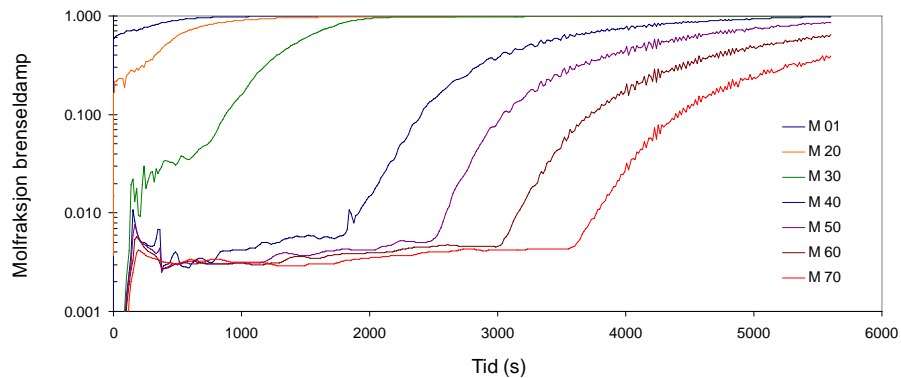
Figur 5-2 viser konsentrasjonsgradienten inne i tanken etter 71 minutters simulert utslipp med temperatur 35 °C. På dette tidspunktet når den brennbare konsentrasjonen toppen av tanken, mens konsentrasjonen i gasskyen nederst i tanken er over øvre eksplosjonsgrense. Strømningshastighetene som følge av oppdrift i tanken er i størrelsesorden 4-5 cm s<sup>-1</sup>. Figur 5-3 viser hvordan konsentrasjonen utvikler seg langs senter av tanken som funksjon av tid i den samme simuleringen. Simuleringene viser at gasskyen bygger seg opp langsomt, og at den eksplosive atmosfæren etter en tid når opp under tanktoppen.

Figur 5-4 illustrerer effekten av å endre tettheten på gassen som slippes ut. I disse simuleringene er tettheten endret ved å øke temperaturen på utslippene, men lavere molekylvekt ville i prinsippet gitt en lignende effekt. Med lavere tetthet (f.eks. høyere temperatur) øker oppdriften, og det tar kortere tid før den eksplosive blandingen når de øverste delene av tanken. Så lenge tettheten til gassen som slippes ut er høyere enn for den øvrige gassen i tanken, avtar gasskonsentrasjonen fra væskeoverflaten og oppover. Det kan imidlertid ikke utelukkes at økt temperatur i løsningen på et senere tidspunkt kunne ført til at det ble dannet et lag med lavere tetthet nederst, og at denne ustabiliteten kunne resultere i en omrøring av innholdet i tanken. I praksis kunne også andre forhold ha virket inn på prosessen, for eksempel variasjoner i gassutviklingsraten eller omrøring av væsken i tanken.

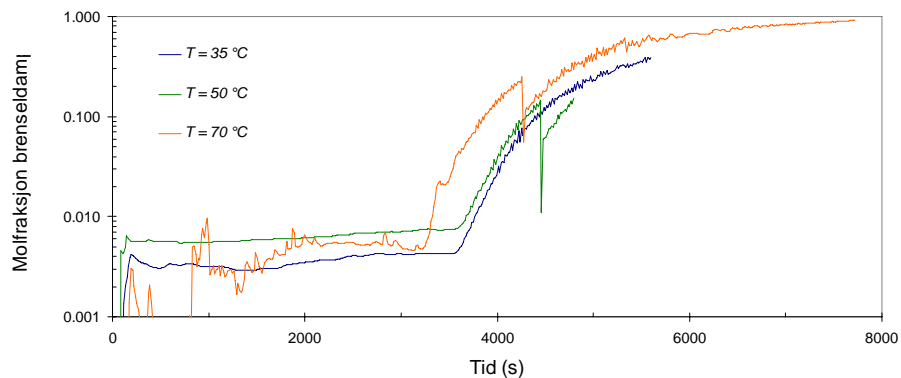
Simuleringene av gassutviklingen inne i tanken tyder på at hele det frie volumet inne i tanken på et eller annet tidspunkt ville inneholde en eksplosiv atmosfære. I begynnelsen ville den eksplosive atmosfæren være begrenset til et relativt tynt lag like over væskeflaten. Etter hvert, sannsynligvis i løpet av noen timer, ville den eksplosive atmosfæren også nå de øvre deler av tanken. Det er sannsynlig, men ikke sikkert (på grunn av mulig omrøring), at gasskonsentrasjonen like over væskeoverflaten vil være langt høyere enn øvre eksplosjonsgrense på det tidspunktet blandingen like under tanktoppen blir eksplosiv.



**Figur 5-2** Tverrsnitt som viser simulert gasskonsentrasjon (molfraksjon) inne i tanken etter 71 minutter fra start av gassutvikling; total utslippsrate  $1 \text{ kg s}^{-1}$  og overflatetemperatur  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Figuren viser forøvrig monitorpunktene som ble benyttet i disse simuleringene.



**Figur 5-3** Simulert konsentrasjon (molfraksjon) av brensel som funksjon av tid på forskjellige høyder inne i tanken. Total utslippsrate  $1 \text{ kg s}^{-1}$  propan; overflatetemperatur  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ ; monitorpunktene (P1, P20, osv.) er vist i Figur 5-2.



**Figur 5-4** Simulert konsentrasjon (molfraksjon) av brensel som funksjon av tid nær toppen av tanken (monitorpunkt M70 i Figur 5-2) for en total utslippsrate på  $1 \text{ kg s}^{-1}$  propan, og væsketemperaturer på henholdsvis  $35, 50$  og  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 5.3 Dannelse av eksplosiv atmosfære utenfor tank T3

Analysen i avsnitt 5.2 tyder på at hele det frie volumet inne i tank T3 på et eller annet tidspunkt inneholdt en eksplosiv atmosfære som følge av at det ble frigjort brennbar gass fra væskeoverflaten inne i tanken. I dette avsnittet vurderes det hvorvidt utslipp av brennbar gass fra åpninger i tanken kunne resultere i at det ble dannet eksplosive atmosfærer i områder med potensielle tennkilder på utsiden av tanken. Vurderingene er basert på simuleringer med CFD-koden FLACS.

Figur 5-5, Figur 5-6 og Figur 5-7 illustrerer geometrimodellen av tankanlegget på Sløvåg som har blitt implementert i forbindelse med disse simuleringene, og Figur 5-8 viser det simulerte vindfeltet i et horisontalt snitt 20 meter over bunnen av Tankgård II. Vinddata benyttet i simuleringene var målt ved oljeraffineriet på Mongstad (se Figur 3-4). Figuren illustrerer blant annet noe lavere vindhastigheter i le av tankskipet M/T Karen Knutsen og lagringstankene ved Vest Tank.

For å sikre konservative anslag over størrelsen på gasskyene ble det benyttet relativt høye utslippsrater, og det ble videre antatt at all luft i tanken var fortrent slik at gassen som ble sluppet ut i simuleringene var ren pentandamp. Ifølge beregninger utført av Vest Tank i forkant av ulykken skulle temperaturøkningen i væsken som følge av reaksjonen mellom lut og saltsyre være maksimalt 10 °C. Ved en omgivelsestemperatur på 12 °C gir dette en maksimal væsketemperatur på 22 °C. Sammensetningen av den brennbare gassen er i utgangspunktet ikke kjent, men det antas her at brenselet kan representeres ved en modell for pentan (molekylvekt 72 gram mol<sup>-1</sup>). Ved 25 °C er den maksimale fordampningsfluksen for pentan omtrent 27 kg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, og i tank T3 ville dette gi en total utslippsrate på 1 kg s<sup>-1</sup> (Kawamura & MacKay, 1987).

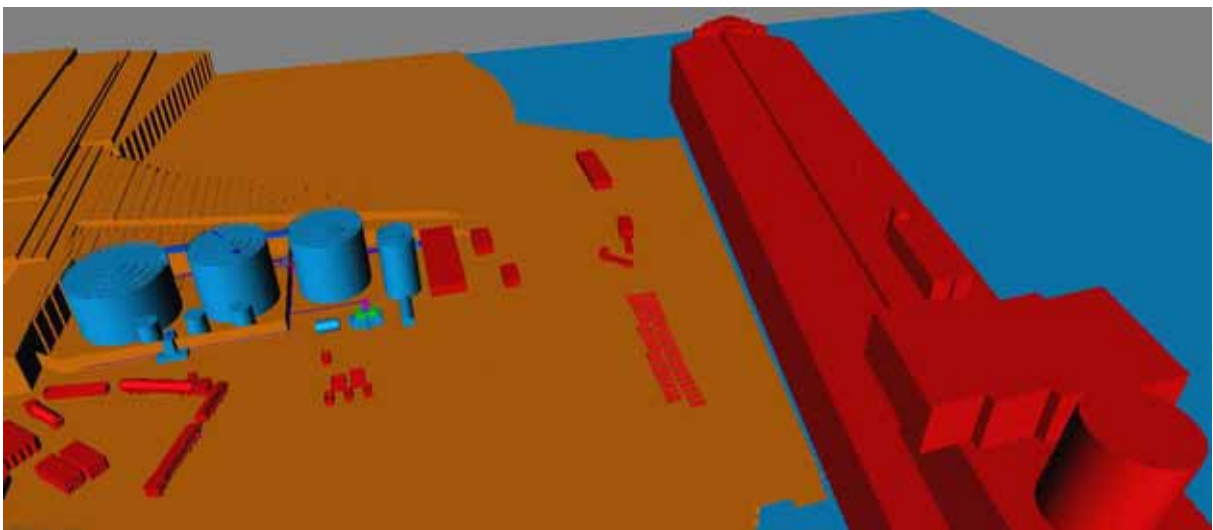
Den første simuleringen innebærer en utslippsrate på 1 kg s<sup>-1</sup> i en posisjon tilsvarende utløpet fra luftfilteret med aktivt kull. Siden svanehalen på filteret pekte nedover ble også utslippet rettet nedover. Figur 5-9 viser en 3-D representasjon av den stabile gasskyen som dannes i området rundt tank T3 ved konstant utslipp fra filteret. Figur 5-10 viser den samme gasskyen i et tverrsnitt gjennom tanken, samt plasseringen av monitorpunkt oppstrøms og nedstrøms av tanken. Figur 5-11 viser gasskonsentrasjon i monitorpunktene vist i Figur 5-10. Denne simuleringen tyder på at det ikke kommer brennbar gass oppstrøms av tanken, mens konsentrasjonene nedstrøms av utslippspunktet er i størrelsesorden 0,01-1 ppm, og altså langt lavere enn nedre eksplosjonsgrense (Tabell 5-2 antyder LFL > 1,3 %). Eksplosjonsfarlige konsentrasjoner forekommer bare nær utslippspunktet på toppen av tanken, og på bakkenivå er konsentrasjonene så lave at ingen tennkilde ville være i stand å forårsake en eksplosjon. Hovedgrunnen til at konsentrasjonene blir så lave er at utslippene finner sted i et vindfelt langt over bakkenivå, slik at den brennbare gassen relativt raskt tynnes ut med luft.

To ytterligere simuleringer ble utført for å undersøke hvor følsomme resultatene beskrevet ovenfor var med hensyn på utslippsrate og vindhastighet: en simulering med utslippsrate 9 kg s<sup>-1</sup> fra kullfilteret og vindhastighet 6 m s<sup>-1</sup>, og en simulering med utslippsrate 1 kg s<sup>-1</sup> fra kullfilteret og vindhastighet 3 m s<sup>-1</sup>. En utslippsrate på 9 kg s<sup>-1</sup> impliserer et innvendig overtrykk som er i overkant av hva tanken kunne forventes å tåle (for det gitte tverrsnittet på trykkavlastningsåpningen), og en vindhastighet på 3 m s<sup>-1</sup> utgjør omtrent halvparten av den karakteristisk vindhastighet målt på Mongstad (se Figur 3-4). Figur 5-12 viser gasskyen som dannes ved et utslipp på 9 kg s<sup>-1</sup> fra kullfilteret, og Figur 5-13 viser gasskonsentrasjoner i utvalgte monitorpunkt. Med en utslippsrate på 9 kg s<sup>-1</sup> blir skyen betydelig større enn for 1 kg s<sup>-1</sup>, men eksplosive konsentrasjoner finnes fortsatt bare nær toppen av tanken. Figur 5-14 viser den simulerte gasskyen for vindhastighet på 3 m s<sup>-1</sup> og en utslippsrate på 1 kg s<sup>-1</sup>. Lavere vindhastighet gir som ventet en noe større brennbar sky, men gasskonsentrasjonene nær bakken er fortsatt svært mye lavere enn LFL.

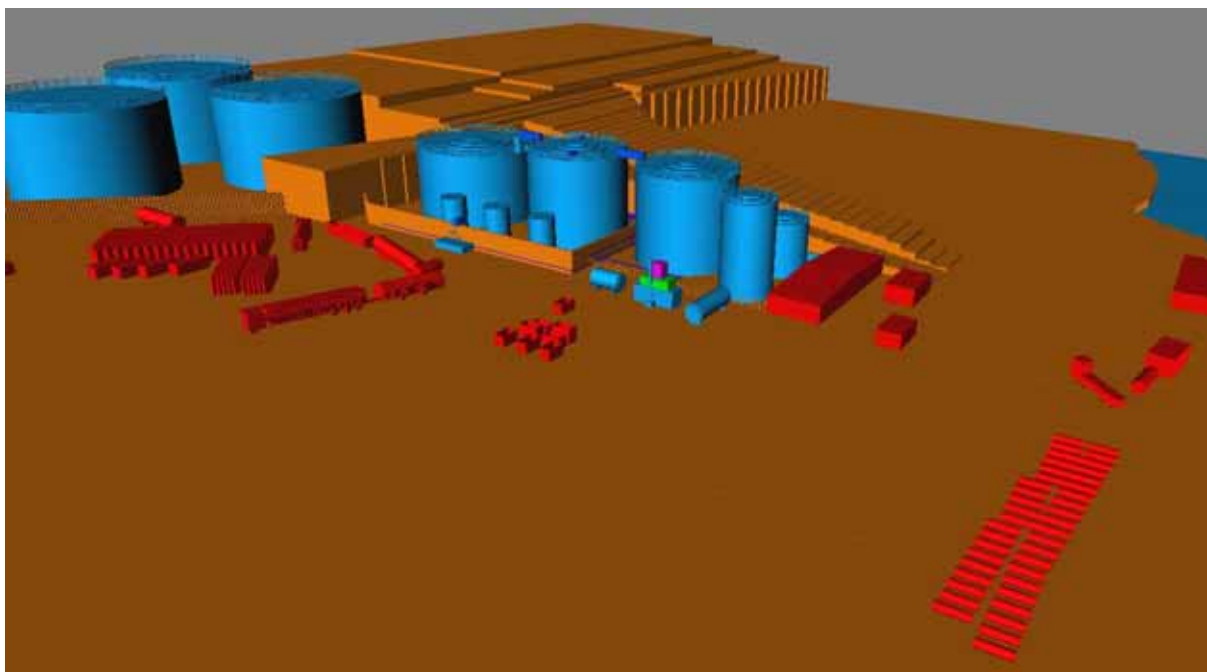
I det fjerde scenarioet som ble simulert ble det antatt at vippelokket på toppen av tanken stod åpent, samtidig som det strømmet brennbar gass ut av luftfilteret. Basert på størrelsen av åpningen og vekten på vippelokket ble det antatt at lokket ville åpne seg ved et innvendig overtrykk på rundt 11 mbar. For denne trykkdifferansen vil utstrømningen fra luftfilteret alene tilsvare  $1 \text{ kg s}^{-1}$ , og i simuleringen ble det derfor antatt at utslippsraten fra vippelokket var den samme (dvs. en antatt doubling av gassutviklingen fra væskeoverflaten). Figur 5-15 og Figur 5-16 viser henholdsvis de simulerte gasskyene fra de to lekkasjene og gasskonsentrasjonene i utvalgte monitorpunkt (vist i Figur 5-10). Også her er omfanget av de eksplosive gasskyene relativt begrenset, og gasskonsentrasjonene i monitorpunktene langt lavere enn LFL.

En siste simulering ble gjennomført for å vurdere størrelsen på gassky forårsaket av et utslipp gjennom et 1-toms rør som gikk ned langs den ytre tankveggen og endte 40-50 cm over bakken (se Figur 3-1). Dette røret hadde tidligere blitt benyttet mens tanken ble brukt til lagring av råolje. Dagen før ulykken ble røret blindet med armeringstape (*Vitne C*), men det har vært antydning at denne tapen kan ha falt av slik at eksplosiv gass kom ut i tankgården. Med en gassutviklingsrate på  $1 \text{ kg s}^{-1}$  fra kullfilteret ville overtrykket inne i tanken være 11 millibar, og dette trykket gir en utslippsrate fra en 1-toms åpning på ca.  $26 \text{ gram s}^{-1}$  (CPR 14E, 1997). En simulering for dette scenarioet ble gjennomført for et mindre simuleringssområde i nærheten av tank T3 og med en vindhastighet nær utslippspunktet på ca.  $1 \text{ m s}^{-1}$  (basert på vindfeltet fra hele simuleringssområdet). Figur 5-17 viser at størrelsen på den simulerte gasskyen er svært liten, og at det ikke befinner seg noen tennkilder innenfor den eksplosive delen av skyen.

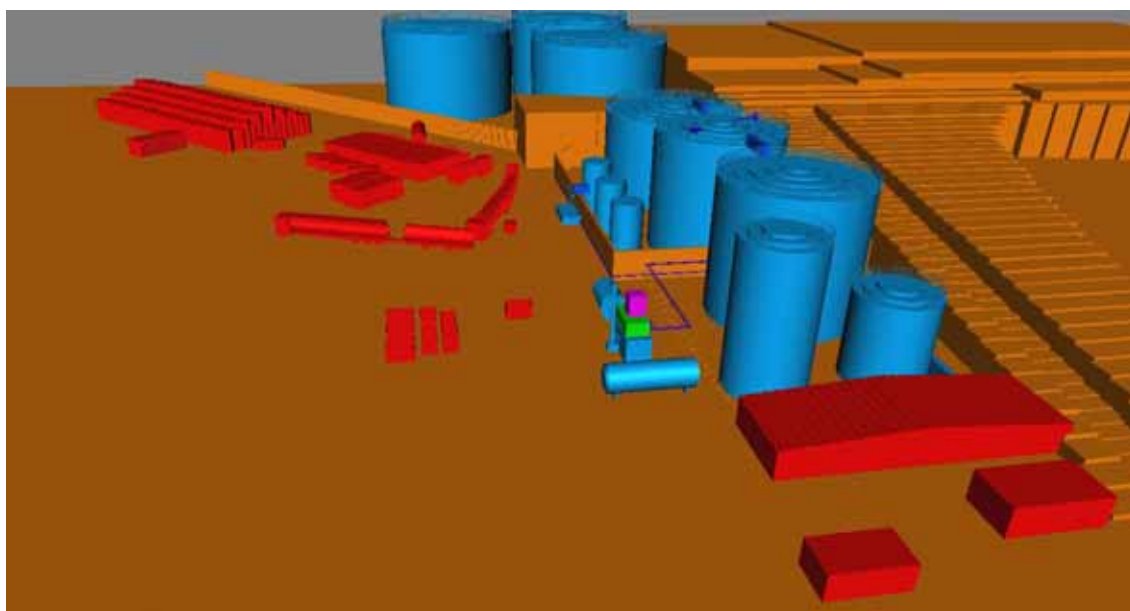
Ut fra simuleringresultatene ovenfor synes det klart at sannsynligheten er svært liten for at et utslipp av brennbar gass fra tank T3 skulle bli antent av potensielle tennkilder utenfor tanken. Selv om simuleringene var basert på relativt konservative antakelser, blant annet høye utslippsrater og ren gass, er omfanget av den eksplosive atmosfæren svært begrenset. Den mest aktuelle tennkilden som kunne antent gasskyene oppe på tanktoppen (og utenfor luftfilteret) er et lynnedslag, men det er ingenting som tyder på at det har vært lynnedslag i det aktuelle området på det aktuelle tidspunktet (se forøvrig Kapittel 6 for en vurdering av mulige tennkilder).



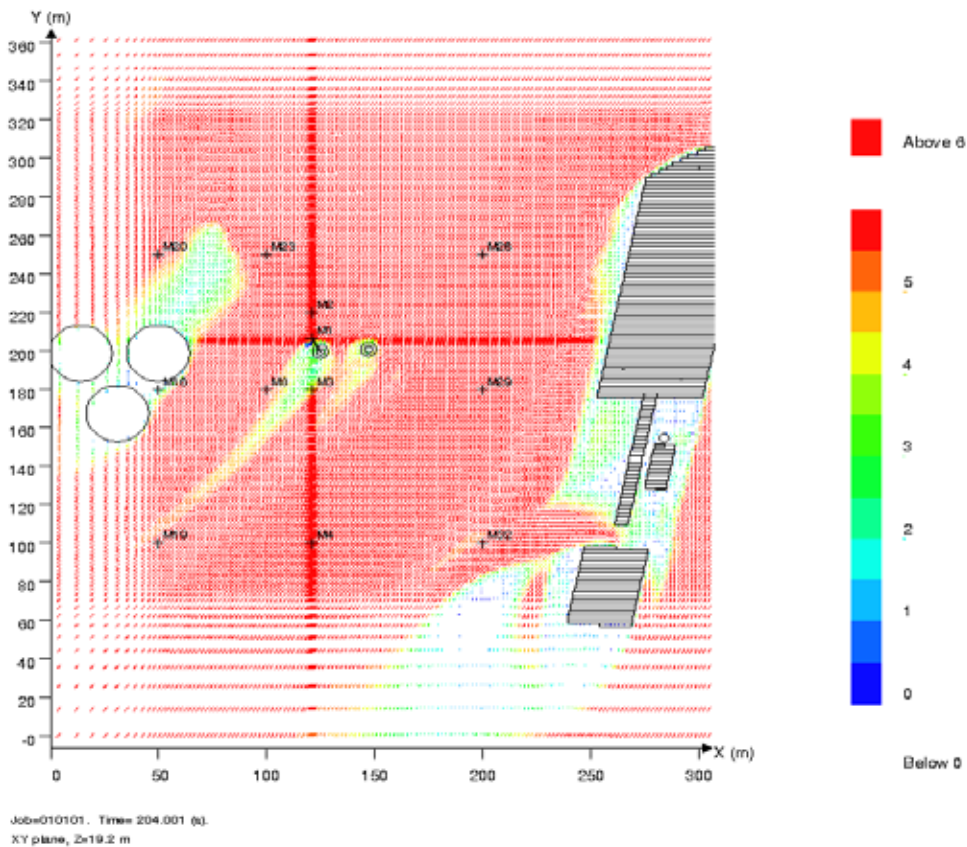
**Figur 5-5** Implementert geometrimodell for FLACS-simuleringer av gassspredning ved tankanlegget på Sløvåg: tankgårdene I og II (til venstre) og tankeren M/T Karen Knutsen ved kai (til høyre).



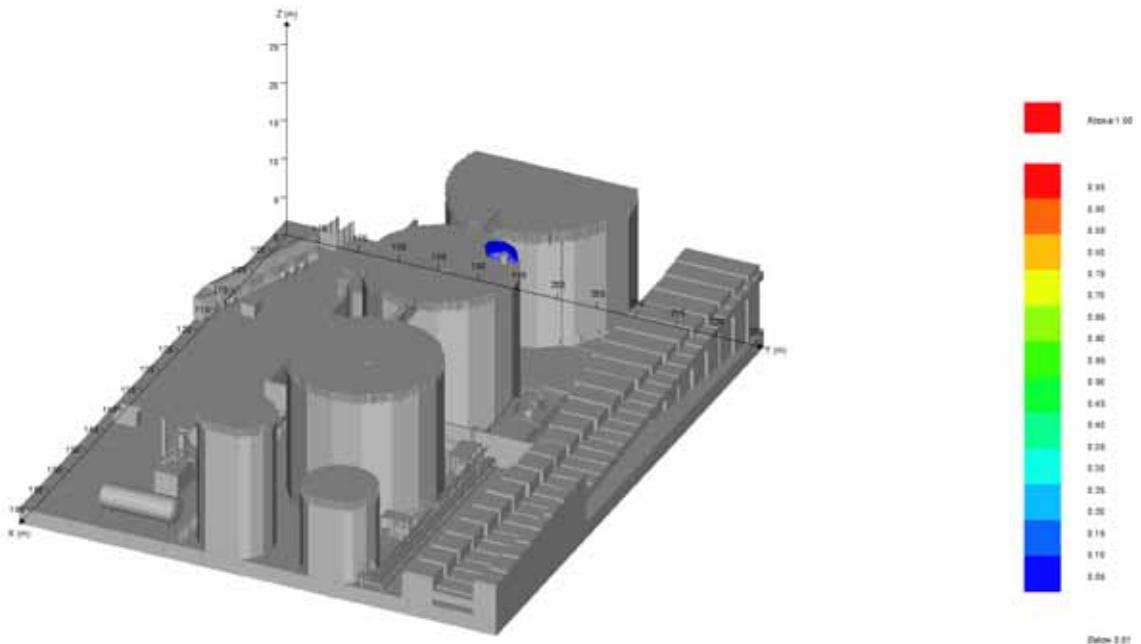
**Figur 5-6** Implementert geometrimodell for FLACS-simuleringer av gasspredning ved tankanlegget på Sløvåg: Tankgård III (til venstre) og tankgårdene I og II (til høyre).



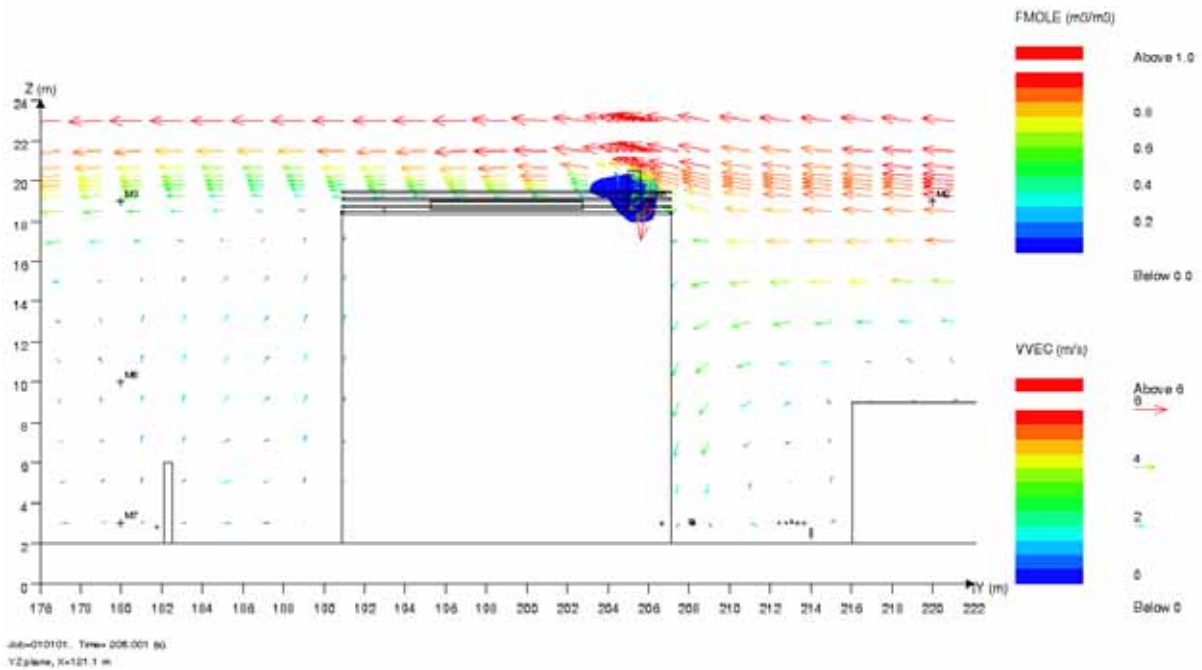
**Figur 5-7** Implementert geometrimodell for FLACS-simuleringer av gasspredning ved tankanlegget på Sløvåg: tankanlegget sett fra M/T Karen Knutsen.



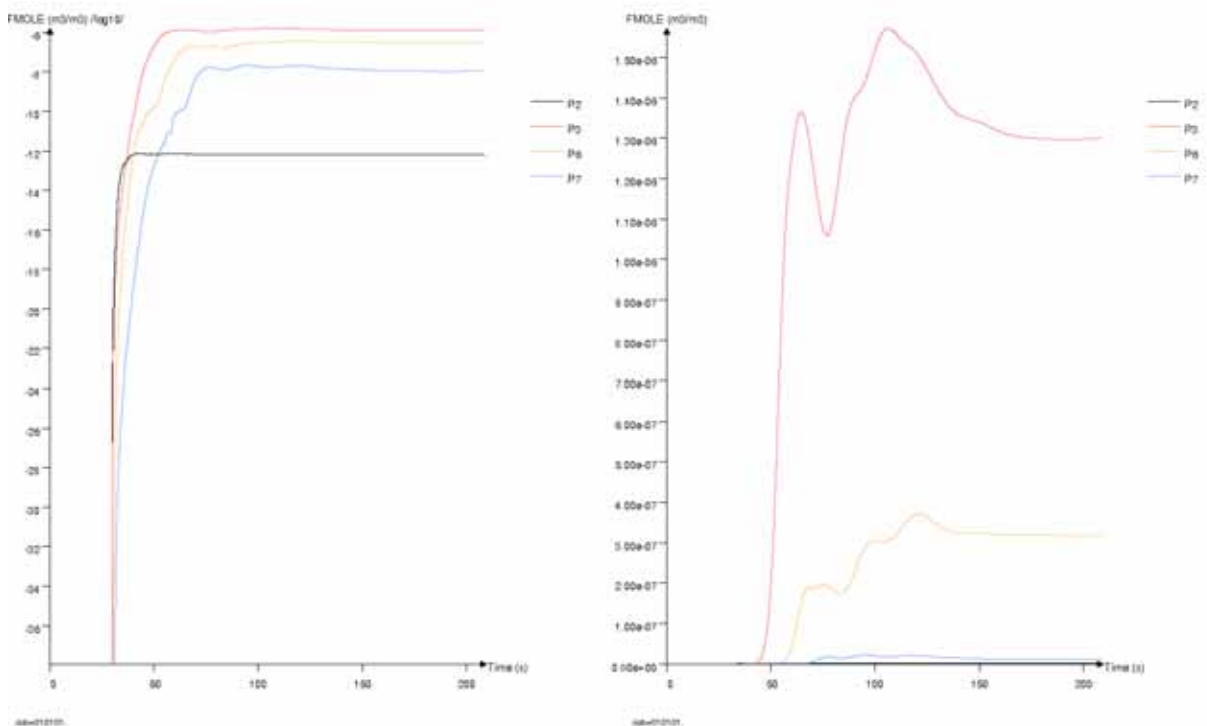
**Figur 5-8** Horisontalt tverrsnitt som viser det simulerte vindfeltet ved tankanlegget til Vest Tank på Sløvåg rundt klokken 10 på formiddagen 24. mai 2007. Vindstyrke og vindretning er basert på vindmålinger fra oljeraffineriet på Mongstad (se Figur 3-4). Skalaen til høyre er for vindhastighet i  $m s^{-1}$ .



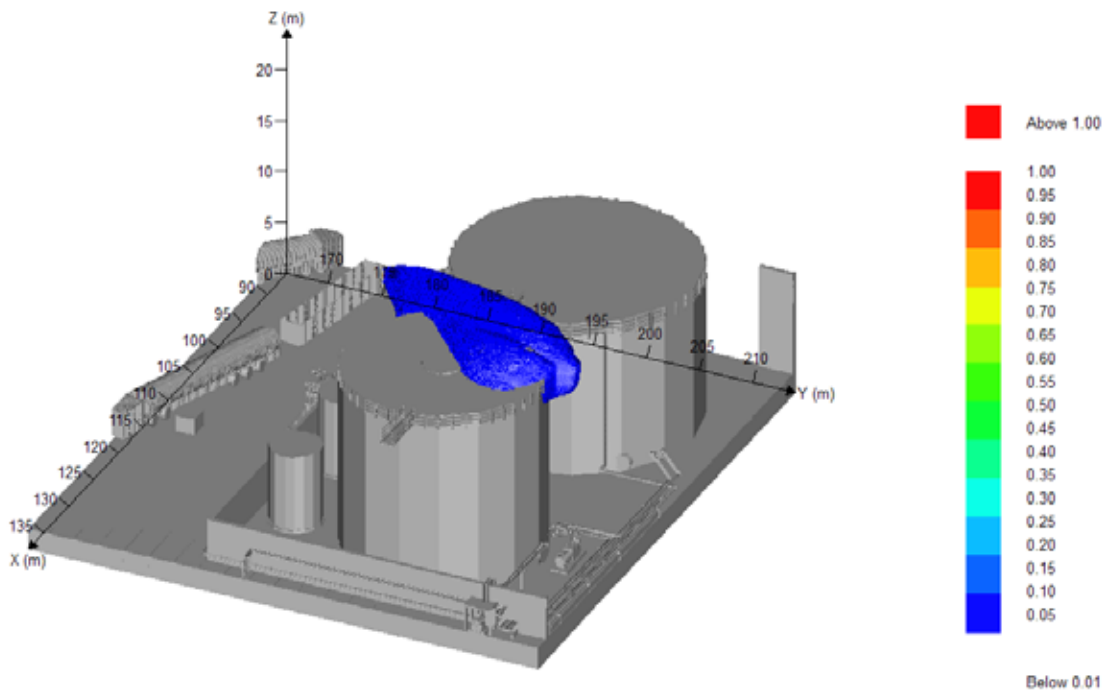
**Figur 5-9** Stabil gassky dannet etter omtrent 3,5 minutter med konstant utslippsrate på  $1 kg s^{-1}$  fra luftfilteret med aktivt kull og vindhastighet  $6 m s^{-1}$ . Bildet viser Tankgård I (nærmest) og Tankgård II med gasskyen på toppen av tank T3 (bakenfor). Gasskyen indikert med blå farge har en konsentrasjon på 1 volumprosent eller høyere, og indikerer dermed omfanget av eksplosiv atmosfære rundt utslippspunktet.



**Figur 5-10** Tverrsnitt av tank T3 som viser stabil gassky etter omtrent 3,5 minutter ved konstant utslippsrate på  $1 \text{ kg s}^{-1}$  fra luftfilteret med aktivt kull. Gasskyen indikert med blå farge har en konsentrasjon på 1 volumprosent eller høyere, og indikerer dermed omfanget av eksplosiv atmosfære rundt utslippspunktet.

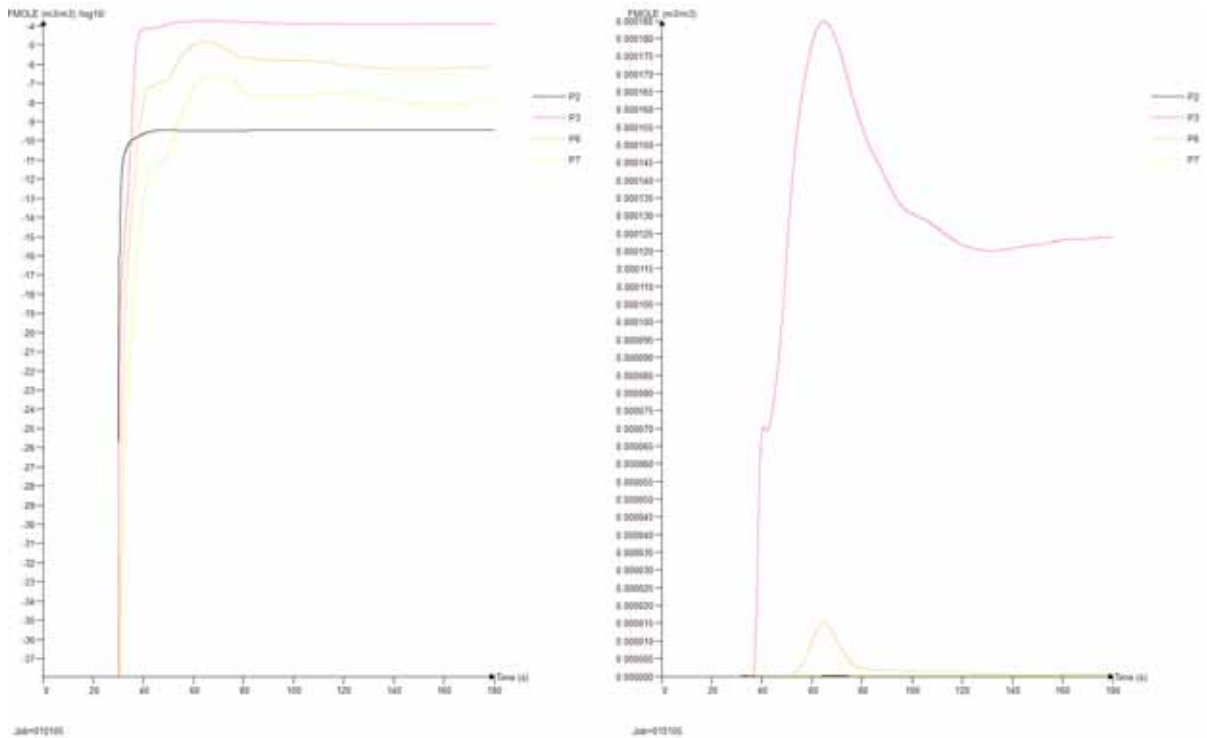


**Figur 5-11** Endring av gasskonsentrasjoner (molfraksjon av brensel) over tid i monitorpunktene M2 (P2), M3 (P3), M6 (P6) og M7 (P7) for et utslipp med  $1 \text{ kg s}^{-1}$  (pentan) fra kullfilteret på tank T3, og med vindhastighet  $6 \text{ m s}^{-1}$ . Merk at de to grafene viser de samme verdiene, men at skalaen for konsentrasjon er logaritmisk i grafen til venstre og lineær i grafen til høyre.

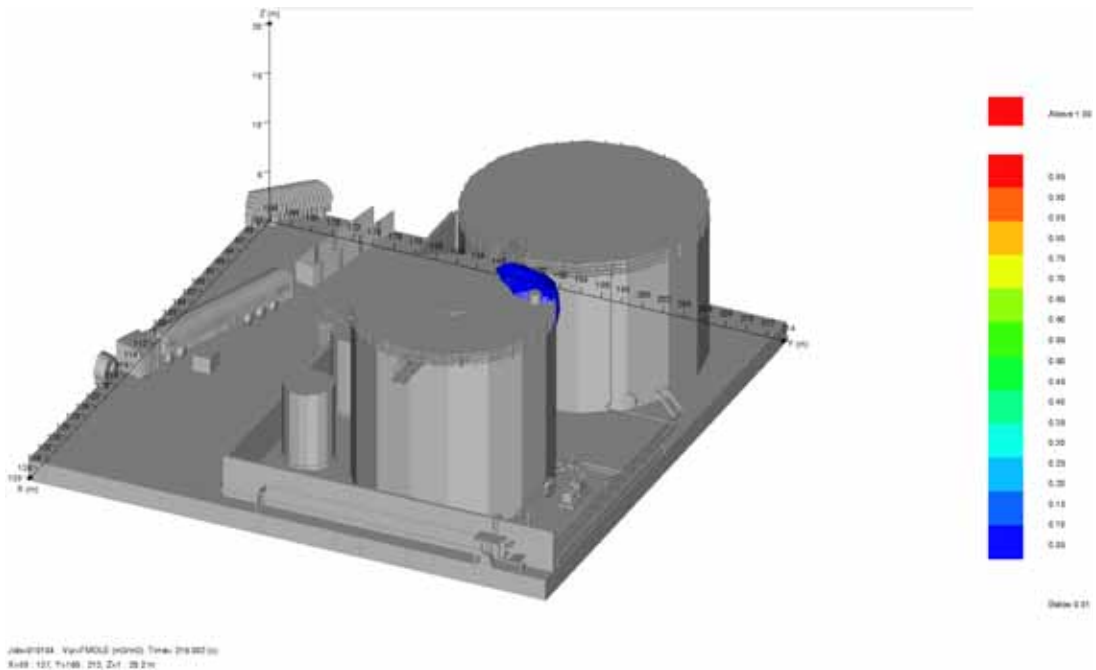


Job=010105. Var=FMOLE (m3/m3). Time= 179.998 (s).  
X=87 : 137, Y=167 : 213, Z=1 : 23 m

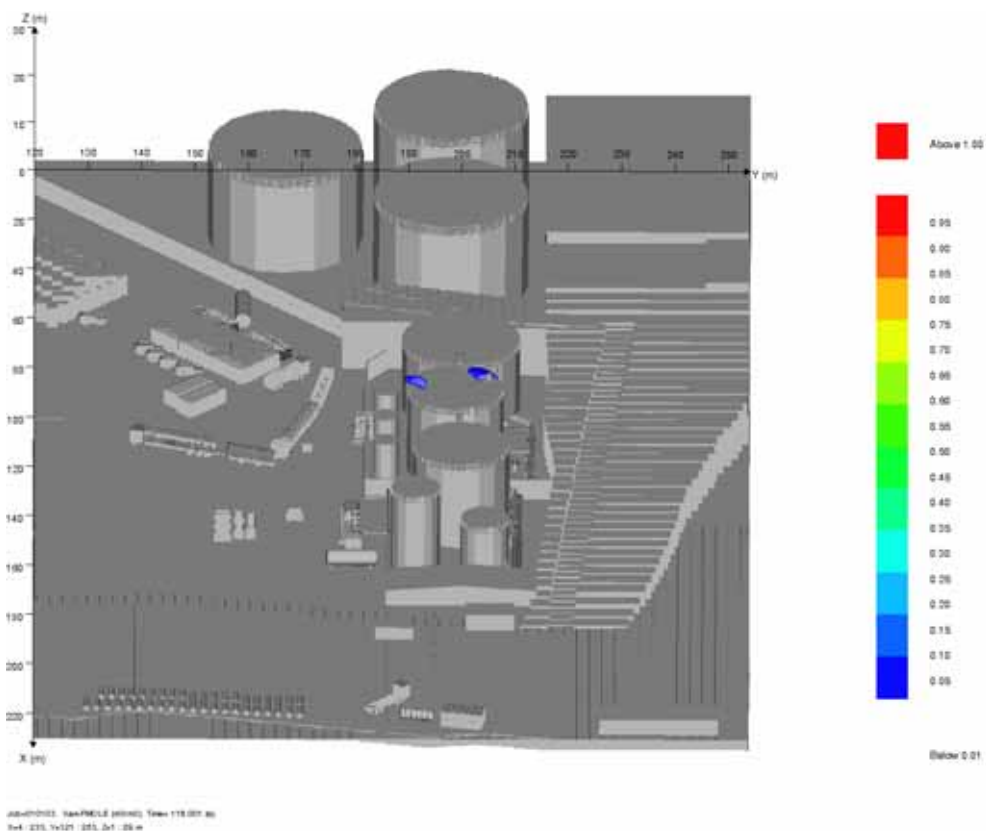
**Figur 5-12** Stabil gassky dannet etter omtrent 3,5 minutter med konstant utslippsrate på  $9 \text{ kg s}^{-1}$  fra luftfilteret med aktivt kull og vindhastighet  $6 \text{ m s}^{-1}$ . Bildet viser Tankgård I (nærmest) og Tankgård II med gasskyen på toppen av tank T3 (bakenfor). Gasskyen som vises med blå farge har en konsentrasjon på 1 volumprosent eller høyere.



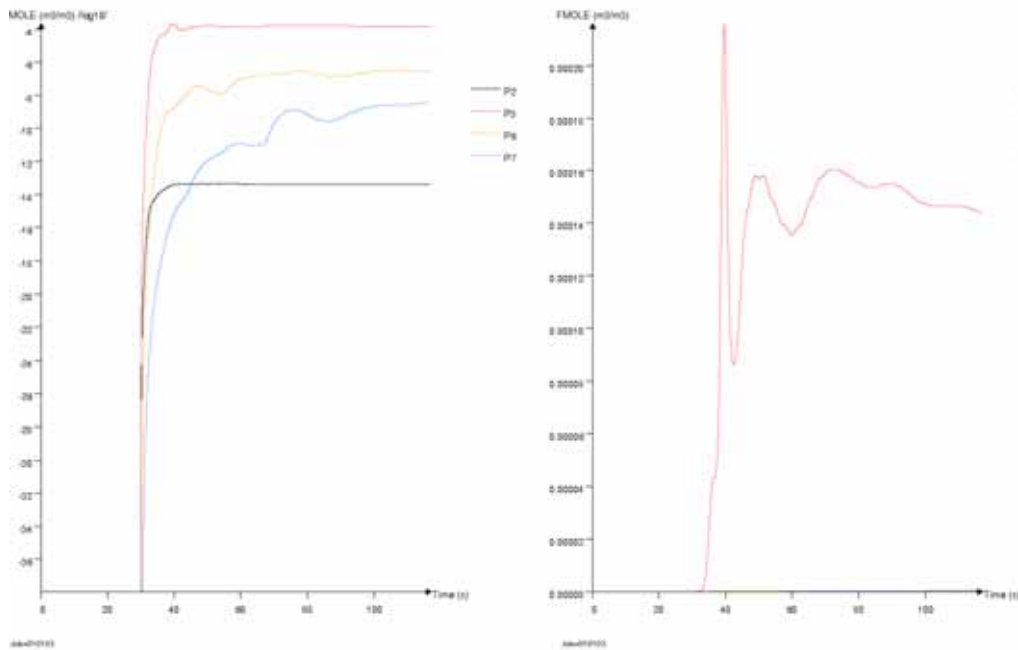
**Figur 5-13** Endring av gasskonsentrasjoner (molfraksjon av brensel) over tid i monitorpunktene M2 (P2), M3 (P3), M6 (P6) og M7 (P7) for et utslipp med  $9 \text{ kg s}^{-1}$  (pentan) fra kullfilteret på tank T3 og vindhastighet  $6 \text{ m s}^{-1}$ . Merk at de to grafene viser de samme verdiene, men at skalaen for konsentrasjon er logaritmisk i grafen til venstre og lineær i grafen til høyre.



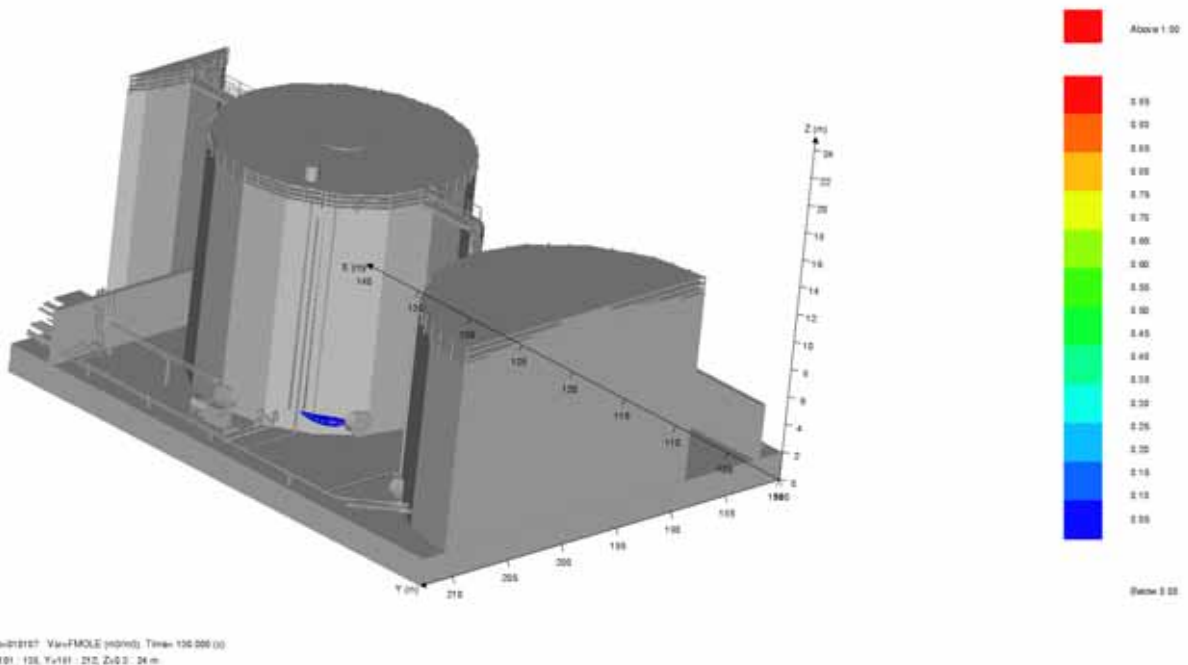
**Figur 5-14** Stabil gassky dannet etter omtrent 3,5 minutter med konstant utslippsrate på  $1 \text{ kg s}^{-1}$  fra luftfilteret med aktivt kull og vindhastighet  $3 \text{ m s}^{-1}$ . Bildet viser Tankgård II med gasskyen på toppen av tank T3. Gasskyen som vises med blå farge har en konsentrasjon på 1 volumprosent eller høyere, og kan sammenlignes med skyen i Figur 5-9 der vindhastigheten var  $6 \text{ m s}^{-1}$  i henhold til Figur 3-4.



**Figur 5-15** Stabil gassky dannet etter omtrent 2 minutter med konstante utslippsrater på  $1 \text{ kg s}^{-1}$  fra både luftfilteret med aktivt kull og vippelokket på toppen av tank T3, og vindhastighet  $6 \text{ m s}^{-1}$ . Gasskyen som vises med blå farge har en konsentrasjon på 1 volumprosent eller høyere.



**Figur 5-16** Endring av gasskonsentrasjoner (molfraksjon av brensel) over tid i monitorpunktene M2 (P2), M3 (P3), M6 (P6) og M7 (P7) for to utslipp à  $1 \text{ kg s}^{-1}$  pentan fra henholdsvis luftfilteret og vippelokket på toppen av tank T3, og vindhastighet  $6 \text{ m s}^{-1}$ . Merk at de to grafene viser de samme verdiene, men at skalaen for konsentrasjon er logaritmisk i grafen til venstre og lineær i grafen til høyre.



**Figur 5-17** Gasskyen som dannes fra enden av et 1-toms rør som går fra tanktoppen og ned til en høyde 40-50 cm over bakkenivå ved en damp utviklingsrate fra væsken i tanken på  $1 \text{ kg s}^{-1}$ . Gasskyen som vises med blå farge har en konsentrasjon på 1 volumprosent eller høyere, og den lokale vindhastigheten er på  $1 \text{ m s}^{-1}$ . Bildet viser tank T3 sett fra sørøst, med litt av tank T4 til høyre og tank T2 i bakgrunnen (bak ringmuren).

## 6 Potensielle tennkilder

Ut fra diskusjonen i Kapittel 5 synes det klart at det var eksplosiv atmosfære i hele eller store deler av det frie volumet inne i tank T3 forut for ulykken 24. mai 2007. Videre tyder det meste på at omfanget av en eventuell eksplosiv atmosfære utenfor tanken har vært begrenset til mindre volumer i nærheten av tanktoppen. Dette kapitlet vurderer mulige tennkilder i lys av prosessen som foregikk inne i tank T3, vitneobservasjoner som beskriver hendelsesforløpet frem til eksplosjonen fant sted, resultatene fra spredningssimuleringene presentert i forrige kapittel, samt funn på åstedet i etterkant av ulykken.

### 6.1 Mulige tennkilder inne i tank T3

Her vurderes muligheten for at brennbare gasser/væskedamper ble antent av en tennkilde inne i tank T3. Luftfilteret med aktivt kull som var koplet til tanken regnes i denne sammenheng som en del av tanken. Aktuelle tennkilder som vurderes er elektrostatiske utladninger, selvantennelse i luftfilteret med aktivt kull, samt eventuelt elektrisk eller mekanisk utstyr. Dette arbeidet omfattet måling av ledningsevnen til relevante væskeprøver for å vurdere muligheten for akkumulering av elektrostatisk ladning på væskeoverflaten inne i tanken.

#### 6.1.1 Elektrostatiske utladninger inne i tank T3

Elektrostatiske utladninger kan antenne brennbare blandinger av væskedamper og luft i lagringstanker. Væskers evne til å generere og akkumulere elektrostatisk ladning er imidlertid nært knyttet til væskens elektriske ledningsevne, og det er i praksis bare reell fare for at det skal bygge seg opp tilstrekkelig elektrisk ladning til å danne elektrostatiske utladninger når ledningsevne til væsken er lavere enn  $50 \times 10^{-12} \text{ S m}^{-1}$  (se Kapittel 2).

Figur 6-1 viser et instrument av typen 'Liquid Conductivity Meter, Model L40' fra Wolfson Electrostatics som GexCon har brukt til å måle den elektriske ledningsevnen i 6 væskeprøver: 3 prøver av 'coker gasoline' og 3 prøver av basisk 'waste' fra tank T3.



**Figur 6-1** Instrumentet av typen 'Liquid Conductivity Meter, Model L40' fra Wolfson Electrostatics, med kalibreringsvæsken (*n*-heptan) og 3 prøver av basisk 'waste' i bakgrunnen (til venstre); detaljbilde av selve målecellen (til høyre).

Tabell 6-1 oppsummerer innholdet i de 6 væskeprøvene som har blitt testet, samt målt ledningsevne for hver enkelt prøve. Figur 6-2 oppsummerer typiske verdier for elektrisk ledningsevne i en del væsker, inkludert resultatene fra Tabell 6-1.

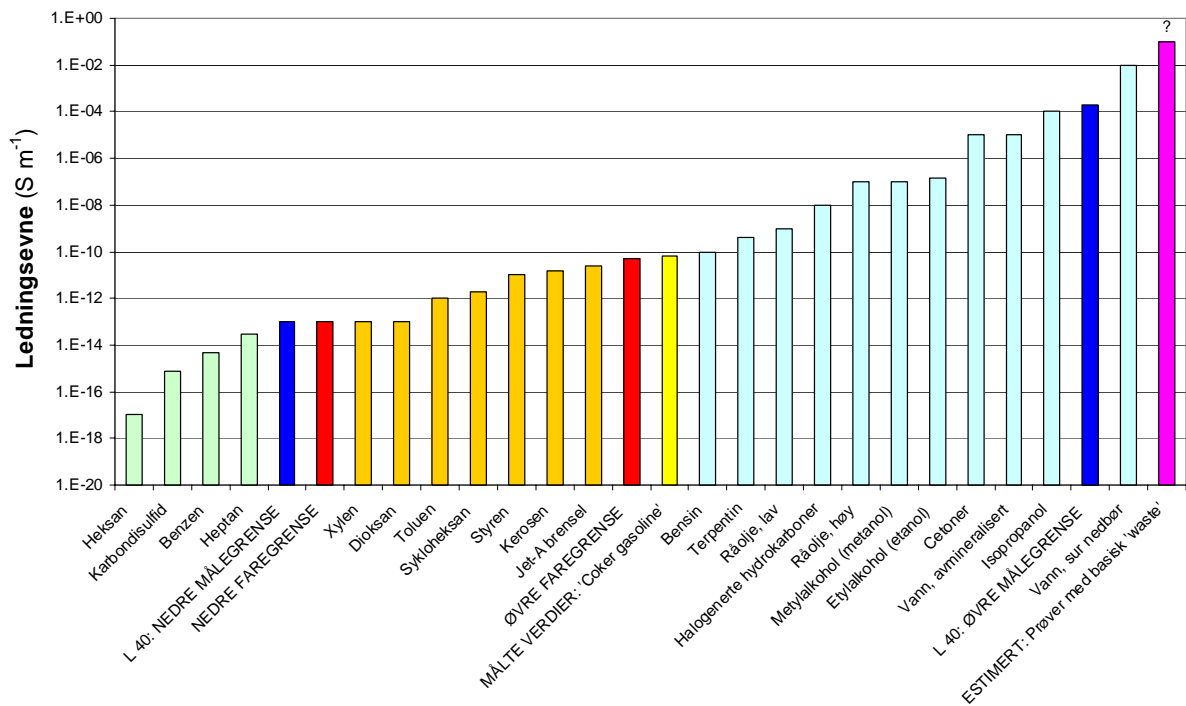
**Tabell 6-1** Resultater fra måling av ledningsevne for 6 ulike væskeprøver: 3 prøver med 'coker gasoline' (målinger utført 11.09.2007 av T. Skjold), og 3 prøver som inneholdt basisk 'waste' fra tank T3 (målinger utført 15.07.2007 av T. Skjold og B. Reiersen). Prøver fra Politiet ref. 0723.11705c (2007).

Prøve	Beskrivelse	Ledningsevne (S m <sup>-1</sup> )
'Coker gasoline'	1 'Coker gasoline' merket "M/T Puze 7005 Batch-CC"	$(68 \pm 3) \cdot 10^{-12}$
	2 'Coker gasoline' merket "M/T Afrodite 7006 Batch-AA"	$(64 \pm 3) \cdot 10^{-12}$
	3 'Coker gasoline' merket "M/T Puze 7005 Batch-DD"	$(67 \pm 3) \cdot 10^{-12}$
Basisk 'waste'	4 Blanding av 80 ml rent vann og 20 ml basisk 'waste' fra tank T3.	$> 2 \cdot 10^{-4}$
	5 Blanding av 80 ml vann fra tank T61 og 20 ml basisk 'waste' fra tank T3.	$> 2 \cdot 10^{-4}$
	6 Blanding av 60 ml rent vann, 15 ml basisk 'waste' fra tank T3 og 3 ml 35 % HCl.	$> 2 \cdot 10^{-4}$

Resultatene for de tre prøvene som inneholdt basisk 'waste' viser at ledningsevnen er høyere enn måleområdet til instrumentet som ble benyttet, og dermed langt høyere enn for væsker man normalt forbinder med mulig akkumulering av elektrisk ladning som kan medføre fare for elektrostatiske utladninger.

Ledningsevnen målt for de tre prøvene av 'coker gasoline' (gul søyle i Figur 6-2) ligger like over fareområdet med hensyn på mulig akkumulering av elektrostatisk ladning (rød søyle). Det er mulig at ledningsevnen til 'coker gasoline' ble redusert noe når en del polare forbindelser (som merkaptaner) ble overført til natriumhydroksidløsningen under renseprosessen ved Vest Tank, og det kan derfor ikke utelukkes at rensed 'coker gasoline' hadde en ledningsevne som lå mellom de to røde søylene i Figur 6-2. Det er imidlertid svært lite sannsynlig at det kan ha bygget seg opp tilstrekkelig elektrisk ladning på et mulig overflatesjikt av 'coker gasoline' inne i tank T3 til at det kan ha forekommet elektrostatiske utladninger inne i tanken. Etersom det aller meste av væsken som ble sirkulert inne i tanken hadde svært god ledningsevne er det vanskelig å forestille seg hvordan effektiv separasjon av ladning skulle kunne skje. Under prosessen foregikk det heller ikke fylling av væske i tanken på en slik måte at tilført væske falt ned i den øvrige væsken i tanken ('splash filling').

Ut fra egenskapene til væskene som var til stede i tanken, og måten prosessen med tilføring av saltsyre ble gjennomført på i forkant av ulykken, er det lite sannsynlig at elektrostatiske utladninger kan ha ført til antennelse av en eksplosiv atmosfære inne i tank T3 den 24. mai 2007.



**Figur 6-2** Karakteristiske verdier for ledningsevnen til en del væsker, samt målte verdier for 3 prøver av 'coker gasoline' og estimerte verdier for 3 prøver som inneholdt basisk 'waste'. Væskene representert ved de lysegrønne søylene helt til venstre i diagrammet har generelt for lav ledningsevne til å utgjøre en reell fare, men det er verdt å merke seg selv svært små mengder av urenheter kan ha betydelig innvirkning på disse verdiene. De røde søylene representerer nedre og øvre faregrense med hensyn på elektrostatiske oppladning, og de mellomliggende oransje søylene representerer derfor væsker der det er reell fare for ladningsoppbygging med påfølgende elektrostatiske utladninger. Væskene representert ved lyseblå søyler har for høy ledningsevne til at elektrisk ladning vil kunne bygge seg opp. Måleinstrumentet som er benyttet i dette arbeidet (se avsnitt 6.1) er av typen 'Liquid Conductivity Meter – Model L40' fra Wolfson Electrostatics Ltd.; det har et måleområde som ligger mellom de to mørkeblå søylene i diagrammet. Ledningsevnen til de tre prøvene av 'coker gasoline' ligger innenfor  $66 \pm 5 \text{ pS m}^{-1}$ ; denne verdien er representert ved den gule søylen. Ledningsevnen til de tre prøvene som inneholdt basisk 'waste' var høyere enn øvre målegrense for måleapparatet, og trolig også betydelig høyere enn 'sur nedbør'; en estimert representativ verdi er markert ved den rosa søylen helt til høyre i diagrammet.

### 6.1.2 Selvantennelse i luftfilter med aktivt kull

Luffiltre som inneholder aktivt kull benyttes ofte for å begrense utslippene av illeluktende gasser fra prosessindustrien. Når organiske damper opptas i overflaten på partiklene med aktivt kull (adsorberes) utvikles det varme, og under gitte betingelser kan det bli varmt nok til at det oppstår selvantennelse i filtermaterialet (EPA, 1997e; Zerbonia *et al.*, 2001). Dette fenomenet er mest aktuelt for organiske forbindelser som ketoner, aldehyder, visse organiske syrer (som propionsyre og smørsyre), og organiske forbindelser som inneholder svovel (deriblant merkaptaner).

Figur 1-4 viser hvor luftfilteret med aktivt kull som hadde stått på tank T3 landet i terrenget, ca. 90 meter fra der tanken opprinnelig stod, Figur 3-1 illustrerer hvordan filteret var plassert på tanken forut for ulykken, og Figur 6-3 viser bilder av filteret fra ulike retninger før det ble åpnet.

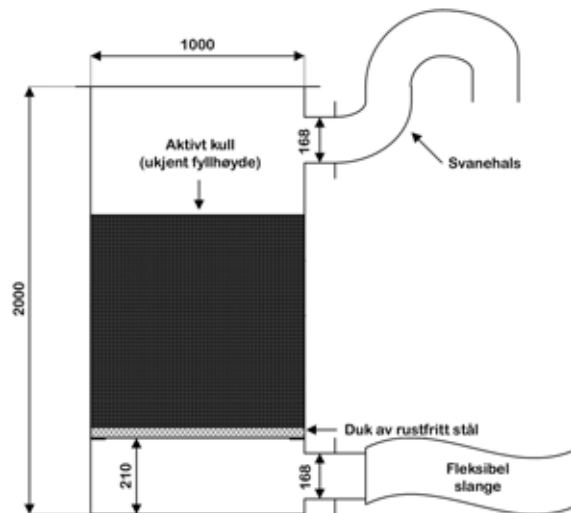


**Figur 6-3** Luftfilteret med aktivt kull: plassering i terrenget (to øverste), innløp med rester av fleksibelt rør (nederst til venstre), filtertopp (nederst i midten), og utløp/svanehals (nederst til høyre).

Filteret ble funnet under en befaring på ulykkesstedet 31. mai 2007, men det ble da ikke åpnet. Da det under arbeidet med litteraturstudiet (Kapittel 2) kom frem at merkaptaner kunne føre til selvantennelse i denne typen filter, ble bildene fra befaringen 31. mai undersøkt nærmere. På et av bildene ble det observert noe som lignet på aske blant det aktive kullet på utsiden av filteret (se det øverste bildet til venstre i Figur 6-6 nedenfor). I lys av denne informasjonen ble det 18. juli 2007 gjennomført en ny befaring for å undersøke hvorvidt luftfilteret kunne ha vært en potensiell tenne kilde. Hovedmålet for befaringen var å se om det kunne finnes rester av et glødereir i det aktive kullet og/eller andre tegn som kunne indikere at selvantennelse hadde funnet sted i filtermassen. Tilstede under denne befaringen var T. Skjold og K. van Wingerden (begge GexCon), samt I. Holmås (lensmann i Masfjorden og etterforskningsleder). På befaringen 18. juli ble det ikke funnet noen tegn til at filteret hadde blitt rørt siden den første befaringen 31. mai.

## Beskrivelse av filteret

Figur 6-4 viser en prinsippskisse av luftfilteret med aktivt kull. Filteret er sylinderformet, med høyde 2 m og diameter 1 m (total innvendig volum ca. 0,79 m<sup>3</sup>). Figur 3-1 viser at filteret var plassert langs rekkverket som gikk langs kanten av tanktoppen, og at filteret var koplet til den opprinnelige luftingen på tanken via en fleksibel slange. Den fleksible slangen var festet til en 168 mm rørstuss som var flenset til bunnen av filteret (innerdiameter ca. 159 mm). I bunnen av filteret var det et hulrom (høyde ca. 210 mm). Ovenfor hulrommet befant det seg en perforert plate som var dekket av flere lag med vevd duk av rustfritt stål. Duken og den perforerte platen holdt det aktive kullet på plass over hulrommet. Det aktive kullet var av typen AIRPEL 10 fra Tøssebro AS, og skal være spesielt utviklet for rensing av luft (bl.a. høy adsorpsjonskapasitet). Den rensede gassen strømmet ut av filteret gjennom en svanehals i øvre del av filteret (se Figur 6-4). Ved begge befaringene var takplaten festet med bare to bolter, og platen var tydelig deformert (se Figur 6-3). Det er litt uklart hvor mye aktivt kull som var i filteret forut for ulykken 24. mai, men vitneutsagn kan tyde på at filteret var fylt nesten helt opp til underkant av utluftingen.



**Figur 6-4** Prinsippskisse som viser et tverrsnitt av kullfilteret (tegning K. van Wingerden; dimensjoner i millimeter).

## Undersøkelser av luftfilteret

Under befaringen 18. juli ble luftfilteret åpnet slik at innmaten i filteret kunne undersøkes. Figur 6-5 viser den perforerte platen av rustfritt stål som opprinnelig understøttet duken i bunnen av filteret. Platen var tydelig deformert, mest sannsynlig som følge av sammenstøtet når filteret landet i terrenget etter eksplosjonen. Omtrent halve oppsiden av platen var dekket av et sotlignende belegg, og på visse områder av platen, under det sotlignende belegget, var det tydelige tegn til fargeforandring på det rustfrie stålet. Figur 6-6 viser hvitaktig askelignende materiale som ble funnet blant granulatpartiklene av aktivt kull. Selv om innmaten i filteret bar preg av å ha vært utsatt for en viss omrøring så det ut som om mesteparten av det askelignende materialet stammet fra granulatpartiklene nærmest bunnen av filteret. Store deler av den rustfrie nettingduken i bunnen av filteret hadde også gjennomgått fargeforandringer som tydet på at duken hadde vært utsatt for sterk varme. Figur 6-6 og Figur 6-7 viser granulatpartikler fra filteret som viser tydelige tegn til å ha gjennomgått forbrenningsreaksjoner. En god del av de brente partiklene ble funnet mellom lagene i duken.

Etter undersøkelsen av filteret ble det under befaringen 18. juli gjennomført et kort besøk til Vest Tank for å innhente opplysninger angående opprinnelse/installasjon av luftfilteret og det aktive kullet benyttet i filteret. En ansatt ved Vest Tank kunne blant annet fortelle at filteret opprinnelig ble installert

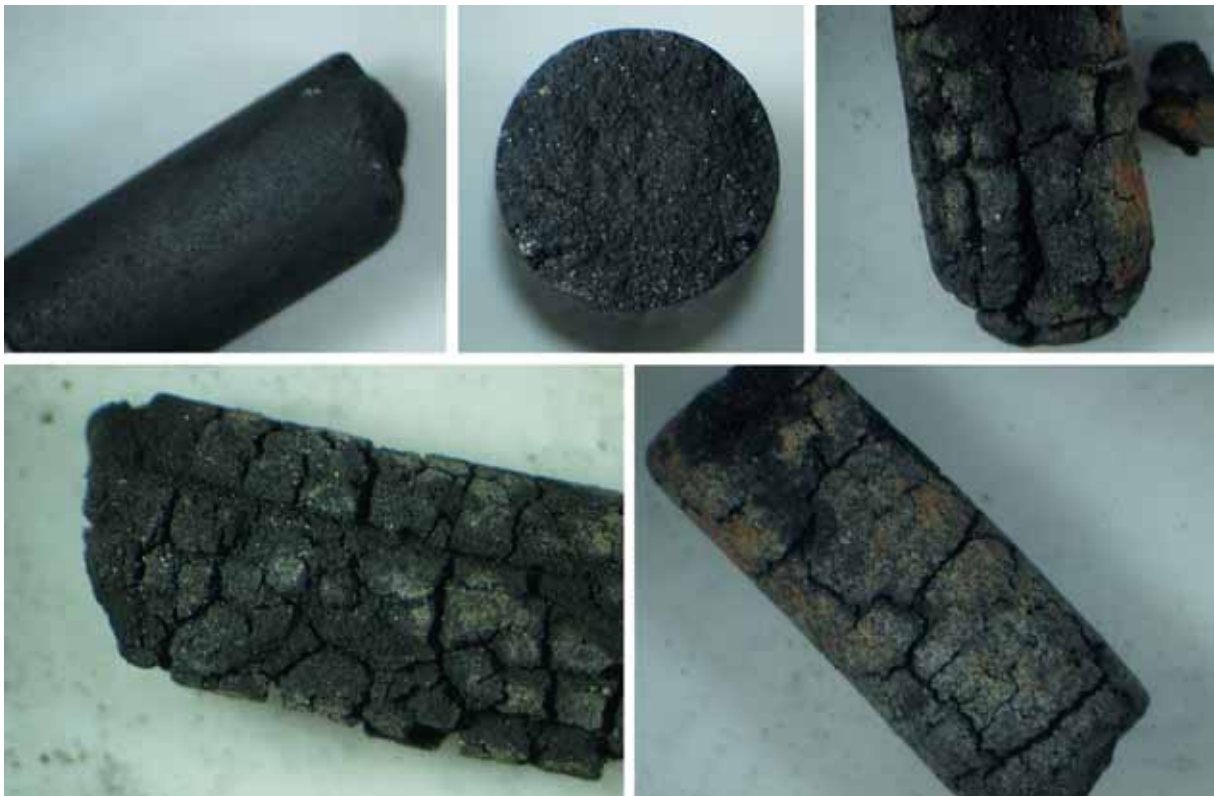
i november 2006, men at det aktive kullet i filteret hadde blitt skiftet 1-2 dager forut for ulykken, altså før tilførselen av saltsyre ble igangsatt.



**Figur 6-5** Perforert plate fra bunnen av luftfilteret med aktivt kull: platen sett gjennom innløpet til filteret (øverst til venstre); platen etter at den ble tatt ut av filteret, med sotlignende avsetning på ca. halve overflaten (øverst i midten); huller i platen over gamle sveisepunkt som trolig skyldes at platen ble deformert idet filteret landet (øverst til høyre); platen før (til venstre) og etter at (til høyre) det sotlignende belegget ble tørket bort (i midten); tydelige tegn til fargeforandring på materialet som tidligere var dekket av det sotlignende belegget tyder på lokal oppvarming (nederst venstre og høyre). Foto av T. Skjold.



**Figur 6-6** Filtermateriale, askelignende stoff og nettingduk av rustfritt stål fra luftfilteret med aktivt kull: bilde av filtermateriale som har runnet ut av filteret, med antydning av askelignende materiale (øverst til venstre, foto av Ø. Larsen, 31. mai 2007); rester av askelignende materiale på utsiden av filteret (øverst til høyre, foto av T. Skjold, 18. juli 2007); filtermateriale med askelignende stoff nær innløpet inne i filteret (til venstre i midten, foto av T. Skjold 18. juli 2007); duk av rustfritt stål med tydelige tegn til fargeforandring som tyder på at materialet har vært utsatt for høy temperatur (til høyre i midten, foto av T. Skjold, 18. juli 2007); nærbilde av duk med askelignende materiale (nederst til venstre, foto av T. Skjold, 18. juli 2007); nærbilde som viser to granulatpartikler av aktivt kull mellom lagene av rustfri duk (nederst til høyre, foto av T. Skjold, 18. juli 2007).



**Figur 6-7** Granulatpartikler av aktivt kull tatt i mikroskop: granulartpartikler uten synlige tegn til forbrenning (øverst til venstre og senter), samt tre enkeltpartikler med tydelige tegn til at det har foregått forbrenningsreaksjoner (foto av T. Skjold, 15. august 2007).

### Diskusjon vedrørende filteret med aktivt kull som mulig tennkilde

Funnene beskrevet ovenfor kan vanskelig tolkes på annen måte enn at det har funnet sted en glødebrann i filtermassen (det aktive kullet) inne i luftfilteret. Selv om det ikke kan utelukkes fullstendig at det kan ha vært andre tennkilder tilstede inne i tank T3 på ulykkestidspunktet, er det overveiende sannsynlig at glødende partikler av aktivt kull og/eller metallflater varmet opp av glødebrannen ville antent en eventuell brennbar blanding som kom inn i filteret gjennom innløpet.

For å undersøke muligheten for at det kan ha vært selve eksplosjonen i tanken som antente det aktive kullet i luftfilteret ble det utført en enkel test der filtermasse ble forsøkt antent med en gassbrenner (se Figur 6-8). Til tross for at granulaten med aktivt kull ble varmet opp til de glødet oppstod det ingen etterfølgende forbrenningsreaksjon. Undersøkelsen av innmaten i filteret under befaringen 18. juli tydet også på at det hadde forekommet en plutselig omrøring av glødereiret inne i filteret. Det er sannsynlig at glødebrannen opphørte kort tid etter eksplosjonen, både som følge av omrøringen som fant sted når filteret ble kastet av gårde, og fordi strømmen av brennbar gass gjennom filteret opphørte. Ifølge Zerbonia *et al.* (2001) er det i første rekke adsorpsjon av vanddamp og organiske damper på partikkeloverflaten som frigjør varme, men det kan også være bidrag fra eksoterme oksidasjons- og polymeriseringsreaksjoner som finner sted på overflaten av partiklene. Til slutt blir temperaturen på partiklene høy nok til at det aktive kullet selvantenner. Partikler som har adsorbent betydelige mengder brennbare forbindelser brenner trolig lettere enn partikler som bare inneholder aktivt kull, og det er ikke urimelig at en jevn strøm av reaktiv gass som passerer glødende partikler i filtermassen kan understøtte forbrenningsreaksjonene på overflaten av partiklene.

Teorien om at eksplosjonen i tank T3 ble antent som følge av en glødebrann i nedre del av luftfilteret med aktivt kull understøttes for så vidt også av vitneobservasjoner. Flere vitner så noe de oppfattet som hvit røyk eller damp som kom ut av luftfilteret noen timer forut for ulykken. Før glødebrannen i filteret startet har det etter alt å dømme vært en viss gasstrøm gjennom filteret som følge av gassutvikling og fordampning inne i tanken mens tilsetning av saltsyre pågikk, og er det sannsynlig at en del av dampen har kondensert på filtermassen (temperaturen i filtermassen har etter alt å dømme vært noe lavere enn temperatur i løsningen inne i tanken). Etter en eventuell selvantennelse i filtermassen kan varmen fra et voksende glødereir inne i filteret ha ført til at kondensert væske på filtermassen i nærheten av glødereiret fordampet. I tillegg kan det ha vært noe røyk fra forbrenningsreaksjonene. Ut fra vitneobservasjonene har i så fall glødebrannen trolig oppstått mellom klokken 06:00 og 08:00 om morgenen (Vitne C). At eksplosjonen ikke fant sted før ca. klokken 10 skyldes enten at bresel/luft blandingen som kom inn i filteret fra tanken ikke var eksplosiv, at glødereiret lå for langt inne i filtermassen til at bunnplaten ble tilstrekkelig varmet opp til å utgjøre en reell tennkilde, eller at glødereiret lå for langt inne i filtermassen til at en flamme kunne forplante seg gjennom filtermassen og ned til bunnen av filteret. Simuleringsresultatene presentert i avsnitt 5.1 tyder på at konsentrasjonen av brennbar gass inne i tank T3 har avtatt med høyden over væskeoverflaten.

Etter antennelse av den eksplosive blanding i bunnen av luftfilteret akselererte flammefronten gjennom det fleksible røret og inn i tanken, delvis som følge av mer optimal bresel/luft blanding oppstrøms av filteret, men spesielt på grunn av ekspansjon av brenselsproduktene i bunnen av filteret. Ekspansjonsgenerert strømming i røret resulterte i turbulente strømningsforhold i den uforbrente blandingen, og dermed betydelig økt forbrenningsrate. Det er vanskelig å bedømme hvorvidt røret revnet før eller etter at flammen nådde tanken, men flammen fant uansett veien inn i tanken. Gitt det begrensede arealet på åpningene i tanken, dvs. de to 6-toms åpningene på toppen av tanken (vippelokket og luftfilteret), medførte termisk ekspansjon økt overtrykk inne i tanken, inntil tanken til slutt revnet. Vitneobservasjoner som beskriver en høy lyd umiddelbart før den første eksplosjonen (Tabell 3-1) tyder på at tanken revnet 1-2 sekunder etter at flammen hadde forplantet seg til tanken. Både styrken på tanken, og den volumetriske forbrenningsraten inne i tanken, avgjorde hvor lang tid det tok før tanken revnet. Det var tilsynelatende sveisen mellom tankbunnen og tankveggen som revnet først, før den øverste delen av tanken løftet seg og til slutt landet i hjørnet av tankgården, ved siden av tank T4. Det er sannsynlig at øvre delen av tank T3 påførte tank T4 en del skade, og at forbrenning av brennbare væsker fra T4 bidro til den hurtige eskaleringen av den etterfølgende brannen i tankgården (se Figur 1-4 og Figur 1-5).



**Figur 6-8** Granulat av aktivt kull: forsøk på antennelse ved hjelp av åpen flamme medførte ikke vedvarende forbrenning til tross for at partiklene ble varmet opp til de glødet (foto av R. Abiven, 12. september 2007).

### 6.1.3 Øvrige tennkilder inne i tank T3

Utover det som har blitt diskutert i avsnitt 6.1.1 og 6.1.2 er det ikke registrert informasjon som skulle tilsi at det har vært andre tennkilder tilstede inne i tank T3 på ulykkestidspunktet. Alt tilgjengelig bakgrunnsmateriale tyder derimot på:

- Det var ikke elektrisk utstyr inne i tanken.
- Nivåmåleren utgjorde etter alt å dømme ingen potensiell tennkilde.
- Det var ikke bevegelig mekanisk utstyr inne i tanken.
- Varmerørene i bunnen av tanken var ikke i bruk.
- Det foregikk ikke varmt arbeid i nærheten av tankgården.
- Det pågikk ikke prosesser som man ville forvente at kunne bygge opp tilstrekkelig elektrostatisk ladning på væskeoverflaten til at eventuelle elektrostatiske utladninger kunne antenne den eksplosive atmosfæren inne i tanken (se avsnitt 6.1.2).

Følgelig er det ingenting som skulle tilsi at den eksplosive blandingen inne i tanken ble antent av noen av disse tennkildene, og siden det også er lite sannsynlig at elektrostatiske utladninger har utgjort en vesentlig fare (avsnitt 6.1.1), peker det meste i retning av antennelse inne i luftfilteret med aktivt kull (avsnitt 6.1.2).

## 6.2 Potensielle tennkilder utenfor tank T3

Ut fra simuleringsresultatene presentert i avsnitt 5.3 er det svært lite sannsynlig at det ble dannet vesentlige volumer av eksplosiv atmosfære utenfor tank T3 i forkant av ulykken 24. mai 2007. Siden vippelokket etter alt å dømme ikke stod åpent er det lite sannsynlig at eksplosive atmosfærer slapp ut av tanken, blant annet fordi en brennbar blanding mest sannsynlig ville blitt antent av varme flater eller glødende kullpartikler inne i luftfilteret. Forøvrig ville filtermassen mest sannsynlig fungere som en effektiv flammesperre, og derved hindre at en eventuell eksplosjon forplantet seg gjennom luftfilteret med aktivt kull og inn i tanken. Vitneobservasjoner av flammer på utsiden av tanken umiddelbart forut for den første eksplosjonen kan til en viss grad forstås i lys av forskjellen mellom lyd- og lyshastighet, samt at det er sannsynlig at tank T3 først revnet på den siden som vendte mot Tankgård I (siden øvre del av tanken fløy i retning av tank T4, se f.eks. Figur 1-2). Det er også sannsynlig at det var den delen av sveisen mellom tankbunn og tankvegg som vendte mot M/T Karen Knutsen som revnet først, bl.a. fordi den øvre delen av tank T3 landet nær T4 (se Figur 1-2). Dette kan også forklare hvordan Vitne X kunne observere flammer mellom Tankgård II og tank T3 forut for den første eksplosjonen.

Forøvrig foreligger det ikke informasjon som skulle tilsi at det har funnet sted en antennelse på utsiden av tanken, og flere av de vanligste tennkildene i forbindelse med tankeeksplosjoner er mer eller mindre utelukket gjennom vitneavhør og øvrige kilder:

- Lynnedslag er blant de hyppigste tennkildene i forbindelse med tankeeksplosjoner, men i det aktuelle tidsrommet foreligger det ingen observasjoner av lynnedslag i det aktuelle området.
- Alle aktuelle vitneforklaringer tilsier at det ikke har forekommet varmt arbeid, røyking, eller liknende ved tankanlegget den aktuelle dagen.
- Det er ingenting som tyder på at det har vært elektrisk eller mekanisk utstyr som kunne forårsaket antennelse i områder der det kan ha blitt dannet eksplosive atmosfærer (jfr. Avsnitt 5.3).
- Alle kjøretøy var plassert utenfor tankgården.

Følgelig kan det praktisk talt utelukkes at eksplosjonsforløpet startet ved at eksplosiv blanding ble antent av en tennkilde på utsiden av tanken/luftfilteret.

## 7 Konklusjoner

### 7.1 Hovedkonklusjoner

Hovedkonklusjonene fra arbeidet utført av GexCon i forbindelse med granskningen av de direkte årsakene til ulykken ved Vest Tank AS på Sløvåg 24. mai 2007 er som følger:

- Basert på den antatte kjemiske sammensetningen til væsken som befant seg inne i tank T3, samt vitneobservasjoner av hendelsesforløpet (og da særlig det faktum at tanken plutselig eksploderte), anses det som svært lite sannsynlig at ulykken ble forårsaket av en *fysisk eksplosjon* som følge av gassutvikling inne i tanken.
- Basert på vitneobservasjoner av hendelsesforløpet, samt det faktum at et ulykkesscenario som inkluderer en fysisk eksplosjon vurderes som svært usannsynlig, er det overveiende sannsynlig at det har blitt dannet en eksplosiv blanding av brennbar gass og luft inne i tank T3, og at ulykken var et resultat av en *kjemisk eksplosjon* som inntraff når denne blandingen ble antent, enten inne i selve tanken eller inne i luftfilteret med aktivt kull.
- Den kjemiske sammensetningen til produktet som hadde blitt behandlet/renset ved tankanlegget ('coker gasoline'), prosessene som hadde funnet sted for å rense dette produktet, samt prosessen som pågikk med å bearbeide avfallsstoffene fra renseprosessen da ulykken inntraff (dvs. tilsetning av saltsyre til en basisk løsning med utfelte avfallstoffer), tilsier at det ble dannet en brennbar blanding inne i tanken idet gasser/damper fra løsningen blandet seg med luften inne i tanken. Videre er det flere faktorer som indikerer at en vesentlig andel av brenselet som inngikk i den eksplosive blandingen bestod av *merkaptanforbindelser* fra løsningen i bunnen av tanken.
  - Det relativt høye innholdet av merkaptaner i lastene med 'coker gasoline' som ble behandlet,
  - Den sannsynlige kjemiske sammensetningen til det faste bunnfallet som ble dannet i prosessen der man reduserte innholdet av merkaptaner i 'coker gasoline' ved å tilsette natriumhydroksid, og
  - Prosessen som pågikk for å løse opp det faste bunnfallet ved å tilsette saltsyre.Tilsetning av saltsyre førte etter alt å dømme til at pH-verdien i løsningen sank, noe som igjen førte til redusert løselighet av merkaptaner og beslektede forbindelser i løsningen. Det er imidlertid sannsynlig at den eksplosive blandingen også kan ha hatt betydelige bidrag av *damper fra flyktige hydrokarboner* som fløt opp på den øvrige løsningen inne i tanken.
- Basert på spredningssimuleringer med CFD-koden FLACS ansees det som svært lite sannsynlig at det har oppstått vesentlige volumer av eksplosiv atmosfære på utsiden av tanken, og det er ingenting som tyder på at eksplosjonsforløpet startet ved at eksplosiv blanding ble antent av en tennkilde som befant seg på utsiden av tanken/luftfilteret.
- Basert på målinger av ledningsevnen til relevante væskeprøver, samt måten prosessen med tilsetning av saltsyre ble gjennomført på, er det lite sannsynlig at tennkilden har vært en elektrostatisk utladning inne i tanken.
- Undersøkelser av luftfilteret som stod på toppen av tank T3 tyder på at svovelholdige organiske forbindelser fra tanken har ført til selvantennelse og etterfølgende glødebrann i det aktive kullet (filtermassen), og det er sannsynlig at glødende partikler av aktivt kull eller varme metallflater inne i filteret har antent en eksplosiv atmosfære i bunnen av filteret; flammen har så forplantet seg tilbake gjennom den fleksible slangen og inn i tanken. Tilsvarende hendelsesforløp er beskrevet i litteraturen for tilsvarende filtre med aktivt kull når disse benyttes i kombinasjon med svovelholdige organiske forbindelser som merkaptaner.

Det poengteres at alle vurderinger og konklusjoner som fremkommer i denne rapporten er basert på, og dermed begrenset av, den informasjon som var tilgjengelig på det tidspunkt rapporten ble skrevet.

## 7.2 Hendelsesforløp

Torsdag 24. mai 2007 eksploderte en lagringstank på Sløvåg Industriområde, i Gulen kommune, i Sogn og Fjordane fylke. Dette avsnittet oppsummerer hovedpunktene fra et plausibelt hendelsesforløp basert på konklusjonene fra avsnitt 7-1.

Fra oktober 2006 til mars 2007 hadde selskapet Vest Tank AS periodevis rensset tankskipslaster med et petroleumsprodukt kalt 'coker gasoline'. Hensikten med denne behandlingen var å redusere innholdet av illeluktende svovelholdige komponenter, spesielt merkaptaner (tioler). Det essensielle kjemiske prinsippet som ble benyttet i denne prosessen var den relativt høye løseligheten til merkaptaner i basiske løsninger av natriumhydroksid og vann (kaustisk soda), sammenliknet med løseligheten i 'coker gasoline'. Renseprosessen foregikk i to atmosfæriske lagringstanker, T3 og T4, og resulterte i utfelling av faste avfallsstoffer i bunnen av disse tankene. Etter hvert økte mengden med de utfelte avfallsstoffene til et nivå der det ikke lenger var mulig å behandle ytterligere tankskipslaster med 'coker gasoline'.

Formålet med prosessen som pågikk da ulykken inntraff var å løse opp de utfelte avfallsstoffene i tank T3, og samtidig redusere pH-verdien i den basiske løsningen, ved å tilsette saltsyre til den basiske løsningen. Denne prosessen hadde tidligere blitt testet i liten skala, og om ettermiddagen onsdag 23. mai 2007 startet det første forsøket på å utføre prosessen i full skala ved anlegget til Vest Tank.

Tilsetning av saltsyre til den basiske løsningen inne i tank T3 førte etter alt å dømme til redusert løselighet av merkaptaner, samt en forskyvning av andre kjemiske likevekter i løsningen. I tillegg har trolig 'coker gasoline', og/eller beslektede kjemiske forbindelser, skilt seg fra løsningen og dannet et tynt overflatelag av brennbar væske som fordampet og blandet seg med lufta inne i tanken. Frigjøringen av merkaptangasser og brennbare damper førte etter hvert til at det ble dannet en brennbar blanding inne i tanken. Den eksplosive atmosfæren var trolig først begrenset til området like over væskeoverflaten i nederste del av tanken, men etter hvert som det ble frigjort stadig mer brennbare gasser og damper fra løsningen økte omfanget, og til slutt omfattet den eksplosive atmosfæren hele det frie volumet inne i tanken, samt luftfilteret på toppen av tanken.

For å begrense utslippene av illeluktende svovelholdige forbindelser var tanken utstyrt med et luftfilter som inneholdt aktivt kull. Adsorpsjon av merkaptaner og andre hydrokarbondamper på overflaten av det aktive kullet førte til selvantennelse og glødebrann. Rundt klokken 10:00 torsdag 24. mai ble den brennbare blandingen på innløpssiden av luftfilteret antent, enten av en varm metallflate eller av glødende partikler av aktivt kull. Flammen forplantet seg deretter tilbake til tanken gjennom et fleksibelt rør, og tanken eksploderte.

Den første eksplosjonen i tank T3 eskalerte hurtig til ytterligere eksplosjoner i andre tanker, samt en brann som omfattet hele Tankgård II, samt en kontorbygning og tre tankbiler som befant seg utenfor tankgården.

## 7.3      **Anbefalinger**

Generelt er det nødvendig å utføre en relativt grundig risikoanalyse for å kunne dokumentere et tilfredsstillende nivå på sikkerheten knyttet til prosesser som involverer potensielt eksplosive atmosfærer. En risikoanalyse for den type prosess som fant sted på Sløvåg vil typisk legge vekt på å dokumentere de potensielle farene, samt effekten av ulike tiltak som kunne iverksettes for å redusere risikoen. Fareidentifikasjonsprosessen burde beskrive de kjemiske reaksjonene som inngikk i prosessen der innholdet av merkaptaner i 'coker gasoline' ble redusert ved hjelp av natriumhydroksid, den kjemiske sammensetningen til de bunnfelte avfallsstoffene, samt effekten av å tilsette saltsyre til avfallsstoffene fra renseprosessen. Vurderingen av risikoreduserende tiltak bør i første omgang fokusere på forebygging av eksplosjoner, men tiltak for å begrense konsekvensene av potensielle eksplosjoner bør også tas med.

Eksempler på relevante risikoreduserende tiltak for den typen prosess som foregikk ved tankanlegget på Sløvåg i forkant av ulykken 24. mai inkluderer:

- Det bør være minst en flammesperre mellom tanken og filteret med aktivt kull.
- En passende sensor kunne overvåket temperaturen i filtermassen, en alarm kunne varslet om eventuell selvantennelse og/eller glødebrann i filteret, og det samme systemet kunne eventuelt også iverksatt automatisk brannslukking i filteret.
- Luftfilteret med aktivt kull burde vært plassert på et sted der det var lett å skifte ut dersom det ble oppdaget selvantennelse i filtermassen, og ikke på toppen av tanken. Harrel *et al.* (1978), EPA (1997e), og Zerbonia *et al.* (2001) beskriver øvrige anbefalinger knyttet til installasjon og bruk av luftfiltre med aktivt kull.
- Det ville vært en stor fordel med hensyn på reduksjon av risiko dersom prosessen kunne gjennomføres i mindre beholdere, for på den måten å minimalisere volumet av den potensielt eksplosive atmosfæren som kunne dannes over væskeoverflaten.
- Et noe høyere designtrykk for beholderen, kombinert med muligheten for effektiv trykkavlastning, ville redusert risikoen forbundet med potensielle eksplosjoner betraktelig.
- Det bør foreligge rutiner som begrenser tilgangen for personell til områder i nærheten av beholderen mens denne typen prosesser pågår; systemer basert på sensorer og overvåkingskameraer representerer en relativt sikker måte å overvåke denne typen prosesser.

Forfatterne håper at informasjonen som er samlet i denne rapporten vil bidra til å bedre sikkerheten i prosessindustrien.

## Referanseliste

- ATOFINA (2001). *Handling Mercaptans in the laboratory*. ATOFINA Chemicals Inc., 2/8/01.
- Babrauskas, V. (2003). *Ignition Handbook: Principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management and forensic science*. Fire Science Publishers, Issaquah, WA.
- Bengough, G.D., Lee, A.R. & Wormwell, F. (1931). The theory of metallic corrosion in the light of quantitative measurements, Part V: The corrosion of iron and mild steel. *Proceedings of the royal society of London, Series A*, **134**(823): 308-343.
- Bergen Engineering (2003a). *Befaringsrapport trykktest Sløvåg tankanlegg*. Dokument nr. 3124-R-L-001. Bergen, revisjon 1, 29.07.2003.
- Bergen Engineering (2003b). *Prosess-, sikkerhets- og miljøanalyse renseanlegg Sløvåg tankanlegg*. Dokument nr. 3124-R-P-002. Bergen, revisjon 3, 15.08.2003.
- Berland, J. (2007). *Foreløpig uhellsrapport – Resultater fra eksplosjon/brann i T3 og T4*. Vest Tank AS, Terminal Sløvåg, rev. 0.31.05.2007/jb.
- Book of data (2007). *Revised Nuffield Advanced Science – Book of Data*. Harrison, R.D. & Ellis, H. (Eds.), ISBN 0 582 35448, Longham Group Limited.
- BP (2006a). BP Process Safety Series – *Safe tank farms and (un)loading operations*, 3<sup>rd</sup> ed., IChemE.
- BP (2006b). BP Process Safety Series, Fire Safety Booklet – *Liquid hydrocarbon tank fires: prevention and response*, 3<sup>rd</sup> ed., IChemE.
- BP (2006c). BP Process Safety Series – *Hazards of electricity and static electricity*, 6<sup>th</sup> ed., IChemE.
- Chang, J.I. & Lin, C.-C. (2006). A study of storage tank accidents. *Journal of loss prevention in the process industries*, **19**, 51-59.
- Couvert, A., Charron, I., Laplanche, A., Renner, C., Patria, L. & Requieme, B. (2006). Treatment of odorous sulphur compounds by chemical scrubbing with hydrogen peroxide – application to a laboratory plant. *Chemical engineering Science*, **61**: 7240-7248.
- CPR 14E (1997). CPR 14E (Yellow Book) (1997). *Methods for the calculation of physical effects*. Committee for the Prevention of Disasters. Sdu Uitgevers, ISBN 9012084970.
- DBE (1994). *Veiledning om oppbevaring av brannfarlig væske i stasjonære legertanker*. Direktoratet for brann- og eksplosjonsvern (nå DSB), februar 1994.
- EPA (1997a). Chemical Safety Alert: *Rupture hazard of pressure vessels*. EPA 550-F-97-002a, issued May 1997: <http://yosemite.epa.gov/oswer/Ceppoweb.nsf/content/ap-chsa.htm>.

- EPA (1997b). Chemical Safety Alert: *Catastrophic failure of storage tanks*. EPA 550-F-97-002b, issued May 1997: <http://yosemite.epa.gov/oswer/Ceppoweb.nsf/content/ap-chsa.htm>.
- EPA (1997c). Chemical Safety Alert: *Lightning hazard to facilities handling flammable substances*. EPA 550-F-97-002c, issued May 1997: <http://yosemite.epa.gov/oswer/Ceppoweb.nsf/content/ap-chsa.htm>.
- EPA (1997d). Chemical Safety Alert: *Fire hazard from carbon adsorption deodorizing systems*. EPA 550-F-97-002e, issued May 1997: <http://yosemite.epa.gov/oswer/Ceppoweb.nsf/content/ap-chsa.htm>.
- EPA (2001). Chemical Safety Alert: *Rupture hazard of liquid storage tanks*. EPA 550-F-01-001, issued January 2001: <http://yosemite.epa.gov/oswer/Ceppoweb.nsf/content/ap-chsa.htm>.
- Harrell, R.W., Sewell, J.O., & Walsh, T.J. (1978). Control of malodorous compounds by carbon adsorption. *AIChE Loss Prevention*, **12**, February 1978, Atlanta, Georgia, 124-127.
- Kawamura, P.I. & MacKay, D. (1987). The evaporation of volatile liquids. *Journal of Hazardous Materials*, **15**: 343-364.
- Kletz, T.A. (1988). *What went wrong? Case histories of process plant disasters*. Second edition. Gulf Publishing Company, Houston.
- Kletz, T.A. (1990). *Critical aspects of safety and loss prevention*. Butterworths, London.
- Kletz, T.A. (2003). *Still going wrong? Case histories of process plant disasters and how they could have been avoided*. Elsevier, Amsterdam.
- Klinkenberg, A. & van der Minne, J.L. (1958), 'Electrostatics in the petroleum industry', Elsevier, Amsterdam.
- Kuchta, J.M. (1985). *Investigation of fire and explosion accidents in the chemical, mining, and fuel-related industries*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines Bulletin 680.
- Mannan, S. (2005). *Lee's Loss Prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control*. Elsevier Butterworth Heinemann, Amsterdam.
- MTC (2001). *High production volume challenge program test plan*. Mercaptans/Thiols Council, Leesburg, VA, December 4, 2001: [www.epa.gov/hpv/pubs/summaries/methmran/c13333.pdf](http://www.epa.gov/hpv/pubs/summaries/methmran/c13333.pdf).
- Omega Technology (2002). Tykkelsesmåling av ståltanker. Rapport nr. OT 0042, Sløvåg 05.09.2002.
- Patai, S. (1974). *The chemistry of the thiol group*. Parts 1 and 2. Redaktør Saul Patai. John Wiley & Sons, London.
- Pemex (2005). *Material Safety Data Sheet: Coker Gasoline*. Pemex Refinacion, September 9, 2005.
- Perry, R.H. & Green, D.W. (1997). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 7<sup>th</sup> Ed. McGraw-Hill, New York.
- Politiet (2007). Saksdokumenter: 'Eksplosjon på Vest Tank sitt tankanlegg i Sløvåg torsdag 24.05.2007 ca. kl. 10:00'. Anm. nr. 9927201, Masfjorden lensmannskontor v/ lensmann I. Holmaas.

- Politiet ref. 0723.11705a (2003). *Tester og beregninger i anledning etterforskning av eksplosjon på anlegget til Vest Tank A/S 24. mai 2007*. Brev fra Knut-Endre Sjøstad.
- Politiet ref. 0723.11705b (2003). *Foreløpige resultater fra avdampningsforsøk*. Brev fra Knut-Endre Sjøstad datert 27.09.2007.
- Politiet ref. 0723.11705c (2003). *Væskeprøver for måling av ledningsevne*. Brev fra Knut-Endre Sjøstad datert 08.08.2007.
- Ringnes, V. (1996). *Navn på kjemiske stoffer; kjemi – språk – historie*. Cappelen, Oslo.
- SFT (2001). *Utslippstillatelse for Vest Tank AS*. SFT-referanse: 508/2001-047; tillatelse gitt 05.12.2001; tillatelse endret 02.05.2006.
- Streitwieser, A., Heathcook, C.H. & Kosower, E.M. (1992). *Introduction to organic chemistry, 4<sup>th</sup> Ed.* Macmillan Publishing Company, New York.
- UOP (2007). *UOP Merx<sup>TM</sup> Process for gas extraction*. UOP LCC, Des Plaines, IL.
- Wolfson Electrostatics. *Liquid Conductivity Meter Model L40 – Operation Manual*. Wolfson Electrostatics Limited, 32 Church Lane, Highfield, Southampton SO17 1SZ England: [www.wolfson-electrostatics.com](http://www.wolfson-electrostatics.com).
- Zerbonia, R.A., Brockmann, C.M. Peterson, P.R. & Housley, D. (2001). Carbon bed fires and the use of carbon canisters for air emissions control on fixed-roof tanks. *Journal of Air and Waste Management Associations*, **51**: 1617-1627.

## Kjemiske symboler

C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> SH	Etylmerkaptan
CH <sub>3</sub> SH	Metylmerkaptan
HCl	Hydrogenklorid (saltsyre)
H <sub>2</sub> O	Hydrogenoksid (vann)
H <sub>2</sub> S	Hydrogensulfid
Merkaptaner	Fra latin ' <i>mercurius captans</i> ', kalles nå <i>tioler</i> (Ringnes, 1996)
NaOH	Natriumhydroksid (kaustisk soda)
R	Generell karbonkjede eller liknende, for eksempel metyl CH <sub>3</sub> , etyl C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> , osv.
ROH	Generell kjemisk formel for alkoholer
RSH	Generell kjemisk formel for merkaptaner (gammelt navn for 'tioler')
Tioler	Kjemiske forbindelser som inneholder den kjemiske gruppen –SH

## Forkortelser

AS	Aksjeselskap
CFD	Metode for numerisk strømningsberegning (eng. 'Computational Fluid Dynamics')
CMR	Christian Michelsen Research
DSB	Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (tidligere DBE)
EPA	Amerikansk miljøverndepartement (eng. 'Environmental Protection Agency')
FLACS	CFD programvare fra GexCon (eng. 'FLame ACceleration Code')
ID	Innerdiameter
Kripos	'Den nasjonale enhet for bekjempelse av organisert og annen alvorlig kriminalitet', tidligere Kriminalpolitisen
LFL	Nedre flammegrense (eng. 'Lower Flammability Limit')
MIE	Laveste tennenergi (eng. 'Minimum Ignition Energy')
NGU	Norges Geologiske Undersøkelse
SFT	Statens Forurensningstilsyn
TT	Høyde på tank
UFL	Øvre flammegrense (eng. 'Upper Flammability Limit')