

RAPPORT

Granskning av eksplosjon

Returkraft AS

Kunde

Returkraft AS

Forfatter

Ørjan Knudsen og Kees van Wingerden

Dokumentinfo**Forfattere**

Ørjan Knudsen og Kees van Wingerden

Klassifisering

Fortrolig (F)

Tittel**Granskning av eksplosjon****Sammendrag**

Denne rapporten inneholder en granskning av en eksplosjon i bunkeren ved Returkrafts energigjenvinningsanlegg 24. juni 2021.

Prosjektinfo**Kunde**

Returkraft

Kundens ref.

Odd Terje Døvik

Gexcon prosjektnummer

101140a

Gexcon prosjektnavn

Returkraft – granskning eksplosjon

Revisjon

Revisjon	Dato	Forfattere	Sjekket av	Godkjent av	Årsak til revisjon
00	17.09.2021	Ørjan Knudsen (Kees van Wingerden)	Kees van Wingerden	Nicolas Salaün	Utkast
01	20.09.2021	Ørjan Knudsen (Kees van Wingerden)	Kees van Wingerden	Nicolas Salaün	Endelig rapport
02	23.09.2021	Ørjan Knudsen (Kees van Wingerden)	Kees van Wingerden	Nicolas Salaün	Endelig rapport etter å ha mottatt flere kommentarer

Ansvarsfraskrivelse

Gexcon påtar seg ikke ansvar for skader som påføres oppdragsgiver, hans kunder, leverandører eller andre tredje part, som anvender resultatene av Gexcons arbeid, med mindre det er utvist grov uaktsomhet av Gexcon eller personell som Gexcon har benyttet for å gjennomføre arbeidet.

Innholdsfortegnelse

Ansvarsfraskrivelse	3
1 Innledning	5
2 Eksplosjonspentagon	6
3 Energigjenvinningsanlegg	7
4 Eksplosjon i bunker	8
5 Granskningen	9
5.1 Deler av anlegget som var involvert i hendelsen	10
5.2 Overvåkningskameraer	10
5.3 Hendelsesforløp	11
5.4 Undersøkelse	17
5.4.1 Dannelse av brennbar sky i bunker	17
5.4.2 Brennende stråle etter eksplosjonen	20
5.4.3 Skader	21
6 Konklusjon	35
7 Referanser	36

1 Innledning

Den 24. juni 2021 oppsto en eksplosjon ved Returkrafts anlegg i Setedalsveien. Gexcon ble bedt om å stadfeste årsaken til eksplosjonen. Denne rapporten beskriver resultatene av ulykkesgranskningen.

Rapporten er laget for å unngå sensitiv eller taushetsbelagt informasjon, slik at Returkraft kan dele den med offentligheten. Det er derfor ikke nevnt navn på personer eller andre bedrifter enn Returkraft i rapporten. Det er lagt liten vekt på den menneskelige siden av hendelsen, med søkelys på materielle skader fordi disse kan brukes til å gjenskape størrelse og forløp på hendelsen og dermed årsaken.

Inndelingen av rapporten er som følger: Kapittel 2 gjennomgår eksplosjonspentagonet som ligger til grunn for å etablere årsakssammenheng ved eksplosjonshendelser. Kapittel 3 beskriver kort selve energigjenvinningsanlegget, kapitel 4 beskriver hendelsen, mens undersøkelse som er gjennomført og dens resultater presenteres i kapitel 5. Kapittel 6 presenterer konklusjonene.

Granskingen ble gjennomført basert på følgende informasjon:

- Rapporter fra intern gjennomgang av hendelsen
- Overvåkningsvideo fra kameraer på dagen for hendelsen
- Skjerm bilde av bunkernivå før eksplosjonen
- *20210723 Åpninger i bygg etter eksplosjon og litt detaljer om eksplosjon.pptx* som angir volumer i bygget og skader på vegger.
- *A-20-PL-06-106 A3, A-20-PL-07-107 A3, B220246-10-05-957-1-110-A 00*, tegninger over tømmeal, bunker og anlegg.
- Rapporter fra samtaler med sjåfører 15. og 22. juli, 2021.
- Presentasjon fra leverandør med prøver som ble tatt av tankbil etter hendelsen
- Powerpoint presentasjon «Temperaturer under tømmealuker 23.06.2020»
- Rapport Eurofins nr. 2021-06281 «Flammepunkt i olje», 14.09.2021

2 Eksplosjonspentagon

En eksplosjon er bare mulig hvis et antall faktorer oppstår samtidig. For å kunne forårsake en brann skal tre elementer være til stede samtidig: brensel, tennkilde og oksygen. Ta bort noen av disse, og man kan ikke få en brann. I brannsikkerhet er denne ideen kjent som branntrekeant, og brukes ofte for å unngå industrielle branner.

For å kunne få en eksplosjon må to elementer til legges i branntrekanten for å lage en eksplosjonspentagon. De to nye elementene er inneslutning og blanding. Disse elementene opprettes når brenslent som damp fra en brennbar væske, sprer seg (og dermed blander seg med luft) i et lukket område, for eksempel en fabrikk eller et lager. På samme måte som med branntrekanten, kan det å fjerne selv et av disse elementene fjerne risikoen for en eksplosjon; men risikoen for brann kan fortsatt være tilstede.

Elementene som utgjør en eksplosjonspentagon/eksplosjonsfemkant er:

Oksidant

En brann trenger oksygen for å kunne brenne, og dette elementet er praktisk talt overalt. Det er i luften arbeidere puster i anlegget og utenfor, i trykkluften som brukes til rengjøring, og i lukkede rom med mindre det har blitt forseglet og tømt for oksygen.

Siden oksygen er en komponent i luft og er nødvendig for arbeidere å puste, er det også det vanskeligste elementet å fjerne fra eksplosjonens femkant.

Brensel

I tradisjonelle branner er dette noe som tre eller papir. Ved en gaseksplosjon er det en brennbar gass eller damp fra en brennbar væske (acetone, metanol, bensin, etc.). For å forebygge eksplosjonsfarlige atmosfærer av damp eller gass kan man blant annet ha avtrekk i rommet hvor disse gassene eller dampene frigjøres.

Blanding/spredning

For å kunne få en eksplosjon skal brenslent blandes med oksygen eller luft. Som regel skjer det ved en spredningsprosess hvor dampen eller gassen diffunderer inn i oksygen eller luften eller at det blandes pga turbulens generert ved frigjøring (fra en beholder med trykksatt gas f.eks.) eller oppdrift (forskjell i tetthet).

Tennkilde

Tenningskilden kan variere fra noe så lite som en elektrostatisk gnist eller tent sigarett, eller en gnist fra metaldeler som skraper mot hverandre. Varme overflater pga varmgang i en roterende maskin er også en tennkilde som forekommer ofte.

Tilstedeværelse av tennkilder kan forebygges f.eks. ved valg av utstyr (mekanisk og elektrisk) for bruk i eksplosjonsfarlige atmosfærer.

Innesperring

Innesperring (som er f.eks. et innelukket rom eller bygg) sørger for overtrykkoppbygging i rommet. Hvis rommet kollapser forårsaker det et overtrykk i omgivelsen (trykkbølger).

Ved hendelse ved Returkraft var alle disse faktorer på plass: tømmehallen med bunkeren er innesperringen, det var mange potensielle tennkilder men den som antente var entydig, sveising som foregikk i anlegget, luft er til stede i tømmehallen og brenslent ble levert ned lass-tippet den morgenen eksplosjon inntraff. Oppdrift i kombinasjon med ventilasjon i tømmehallen og bunkeren sørger for blanding av damp eller gass med luft.

3 Energigjenvinningsanlegg

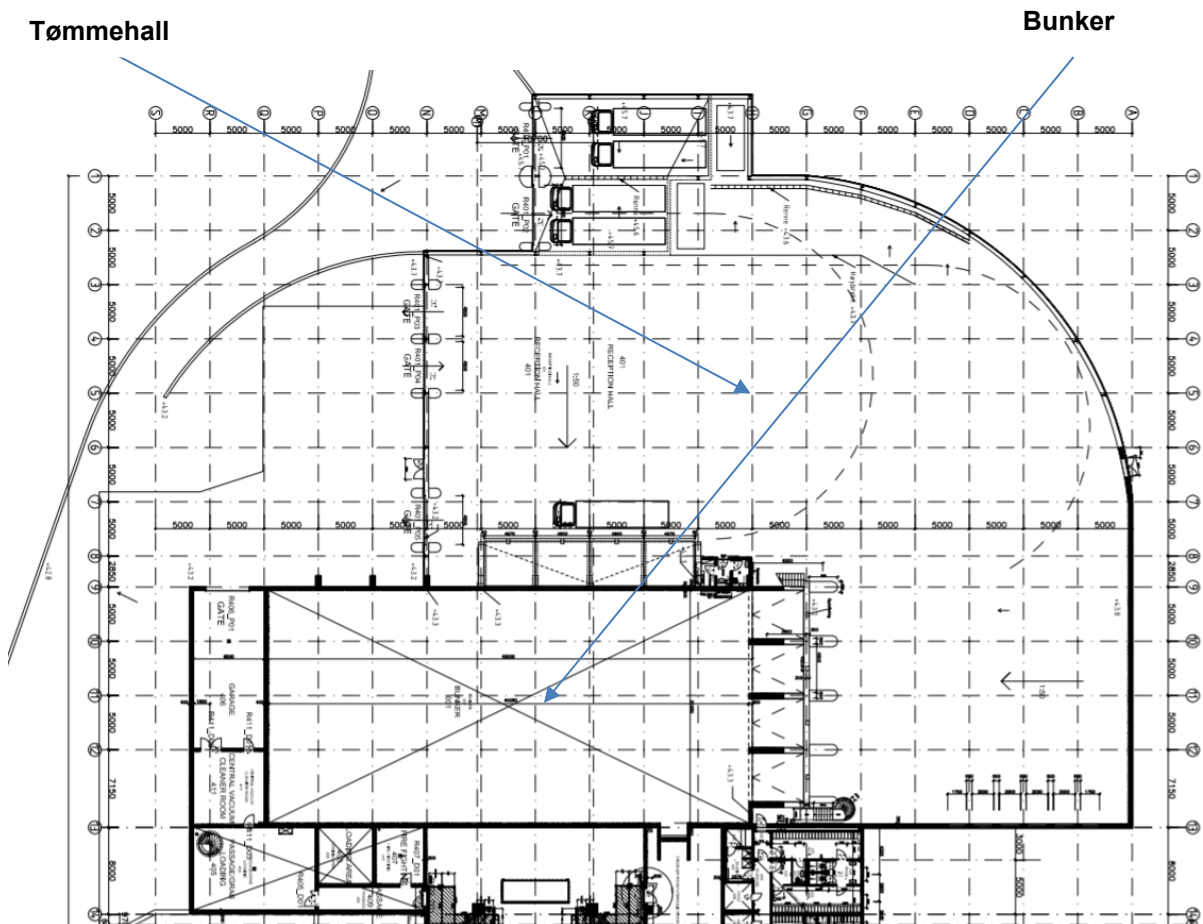
Returkraft er et energigjenvinningsanlegg som håndterer årlig totalt 130 000 tonn restavfall og spesialavfall. Avfallet er hovedsakelig husholdningsavfall, men i tillegg håndteres næringsavfall. Avfallet forbrennes i en ovn som resulterer i omtrent 95 GWh elektrisk kraft per år. I tillegg produseres fjernvarme som kan gi varmt vann og oppvarming til 12.000 boliger og bedrifter.

Før avfallet mates inn i ovnen mellomagres det i en stor vanntett bunker i betong som kan romme nærmere 10.000 m³ (5000 – 6000 tonn avfall).

Bunkeren kan fylles direkte eller ved større gjenstander via en kvern. Ved hjelp av en kran blir avfallet både fordelt (homogenisert) i bunkeren samt transportert inn i forbrenningsovn.

Avfall blir stort sett levert med lastebiler som tipper direkte i bunkeren fra en stor hall (tømmehall) gjennom 4 tømmeluker i område 2 i Figur 5-1. Figur 3-1 viser en plantegning av etasjen hvor tippingen skjer.

Bunkeren er utstyrt med automatisk branndeteksjon og brannslukning med vannkanoner.



Figur 3-1: Plantegning som viser tømmehall og bunkeren.

Det påpekes at anlegget ikke er designet for mottak av stoffer som kan forårsake eksplosive atmosfærer i anlegget. Det er ikke gjennomført en områdeklassifisering og alt utstyr: bomber, lys, kran, osv er ikke egnet for bruk i eksplosive atmosfærer. De lastebilene som leverer avfall har også en del tennkilder om bord som inkluderer eksosrøret på bilene. Søppelet selv kan også inkludere tennkilder særlig batterier som er hovedårsaken av branner i bunkeren.

4 Eksplosjon i bunker

Klokken 9:49 torsdag 24. juni inntraff en eksplosjon i bunkeren, etterfulgt av en brann i bunker-/tømmehallområdet. Eksplosjonen slo inn vinduet til kontrollrommet, og førte til betydelig skade der.

7 personer ble sendt til sykehus. 4 av disse ble skrevet ut samme kveld, 1 person etter to døgn, mens to ble fløyet til Haukeland med alvorlige brannskader.

Anlegget er for tiden ute av drift på grunn av skadene.



Figur 4-1 Overvåkningsbilder som viser øyeblikket eksplosjonen inntreffer (til venstre sett fra tømmehallen; til høyre rett ovenfra tømmestasjonen)



Figur 4-2 Utsiden av bygget etter eksplosjonen

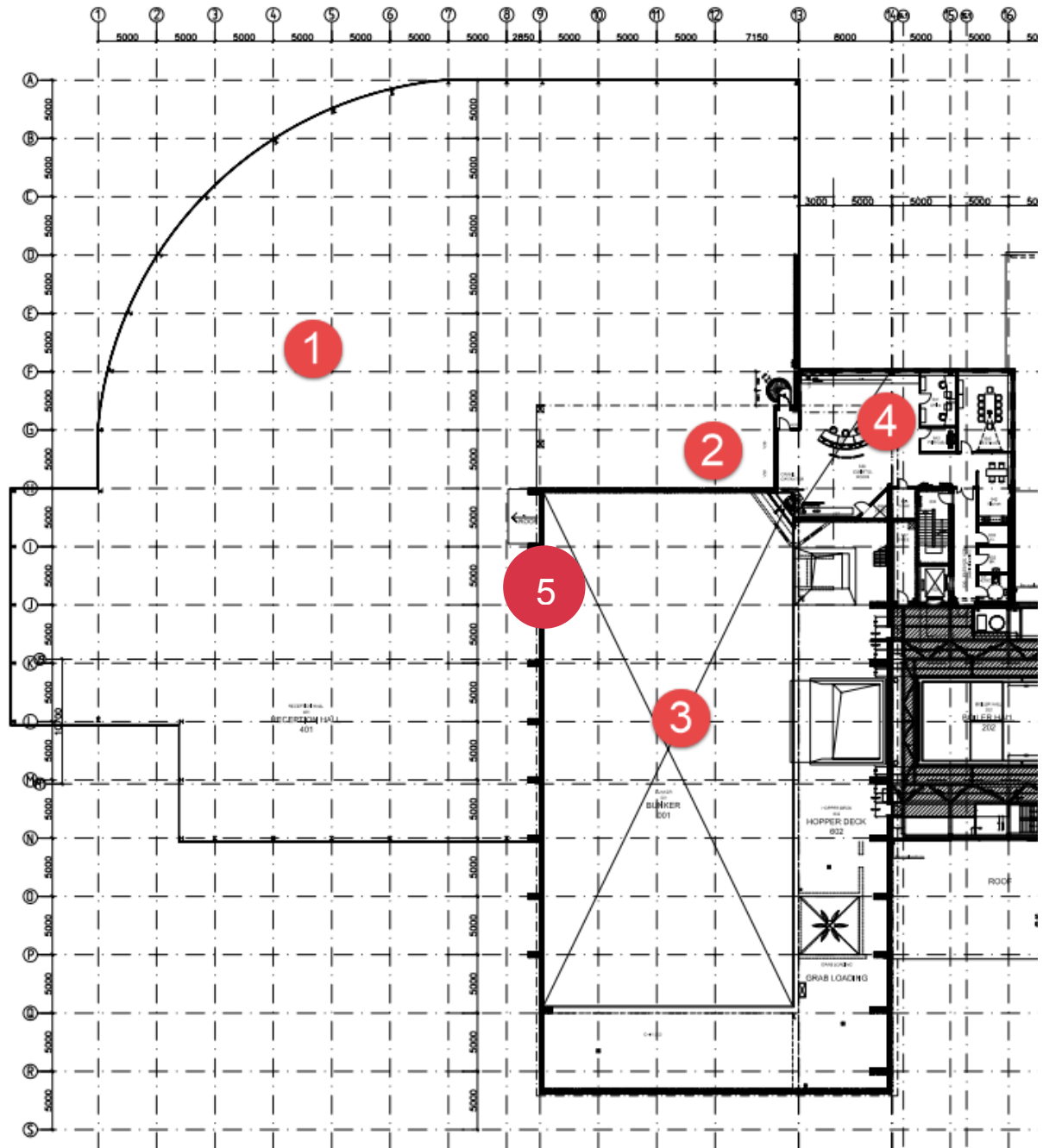
5 Granskningen

Ut fra opptak fra overvåkingskameraer er det relativt entydig at en sky av brennbar damp har oppstått i bunkeren. Denne dampen ble antent av gnister forårsaket ved sveising som foregikk i et område over skråslisen i bunkeren. Granskningen fokuserer derfor på materiale som ble levert i perioden før hendelsen og som kan ha forårsaket den eksplosive dampskyen samt selve hendelsesforløpet.

Kapittel 5.1 viser et kart hvor de delene av anlegget som var direkte involvert i hendelsen er angitt. Kapittel 5.2 viser plasseringen av overvåkingskameraer. Opptak fra kameraene har vært viktig for å kunne forstå hva som skjedde.

Kapittel 5.3 diskuterer hendelsesforløpet basert på opptakene av overvåkingskameraene samt lastene med brennbar materiale, ikke minst brennbare væsker som ble levert i perioden før selve hendelsen.

5.1 Deler av anlegget som var involvert i hendelsen



Figur 5-1: Oversikt over mottakshall(1), tømmeluker (2), bunker (3), kontrollrom (4) og skråslisk (5).

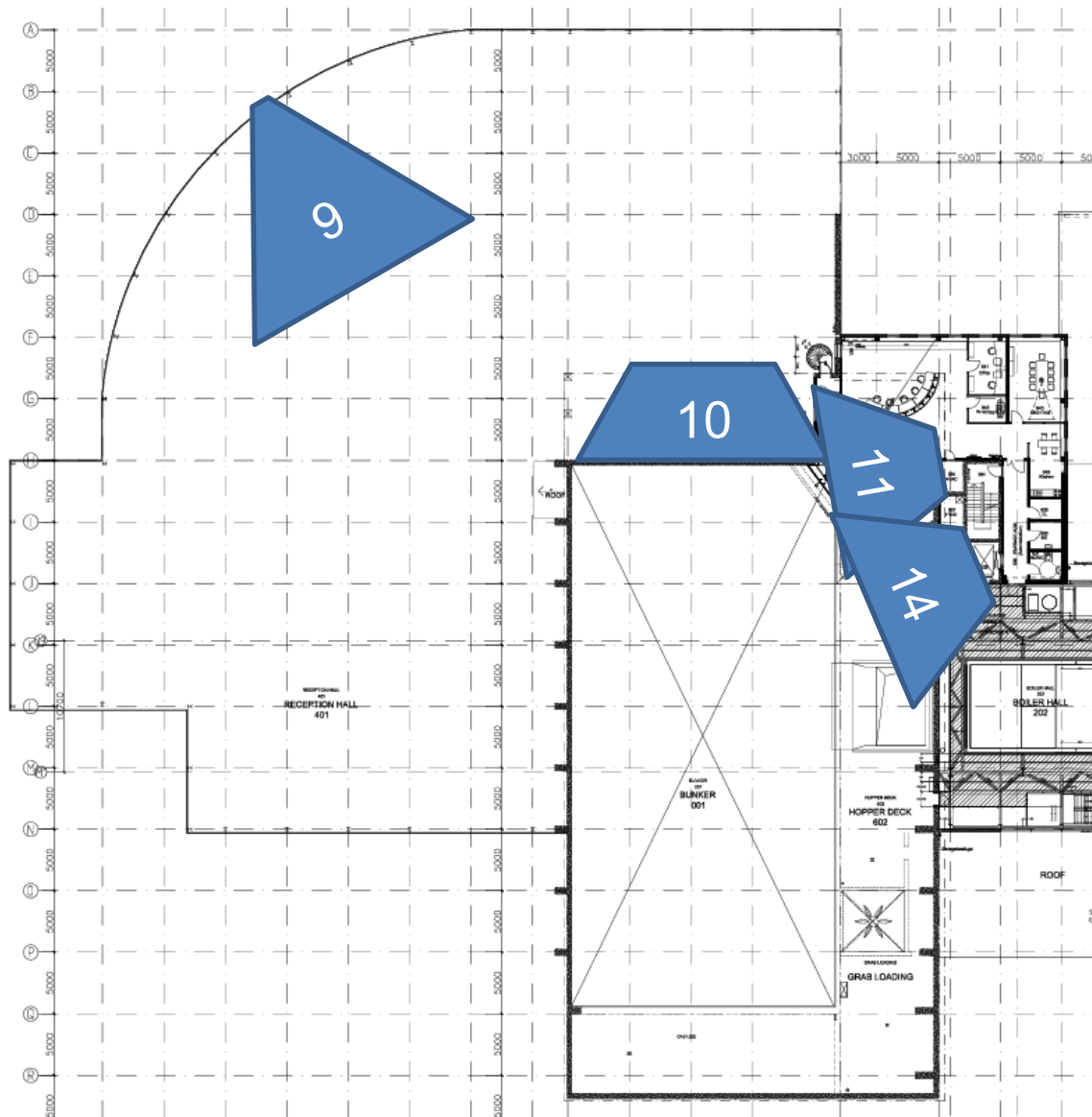
5.2 Overvåkingskameraer

Fem overvåkingskameraer var i drift før og under hendelsen:

- Kamera 5, som viser vekten (av mindre interesse her og er derfor ikke tegnet inn. Brukes for å identifisere bilene som kommer inn).
- Kamera 9, som viser tømmehall.
- Kamera 10, i taket over tømmelukene.
- Kamera 11, over kvern i bunker.

- Kamera 14, lenger inne i bunkeren

Klokken på overvåkningssystemet er stilt 1 time, 1 minutt og 30 s for sent, slik at virkelig tid er litt mer enn en time etter det som vises på stillbilder fra videoer. Kameraene i bygget er vist i figuren under.



Figur 5-2 Plassering av overvåkningskameraer

5.3 Hendelsesforløp

Basert på kameraopptakene er antennelsestidspunktet kjent. Den eksplosive dampskyen stammer mest sannsynlig fra laster med brennbar væske i en periode før dette tidspunktet. Tiden mellom tidspunktet lossingen startet og antennelsestidspunktet skal være lang nok til å tillate fordampningen av den brennbare væsken slik at en brennbar sky kan oppstå.

Om morgenen den 24. juni 2021 ble det levert følgende laster (Tabell 5-1; angitt tidspunkt er når lossingen startet):

Tabell 5-1: Oversikt over mottatte leveranser.

Varenavn, mengde i kg.	Biltype	Start tømning reell
Krokkasse 1: 7021 – smørefett fra grease, 90kg, 7022 – oljeholdig filler, filter mm, 8.753kg, 7024 – oljefilter m/metall, 854kg, 7143 – kaks m/oljebasert borevæske, 956kg, 7152 – sekkeavfall, 146kg Krokkasse 2: 7022 oljeholdig 8235 kg,	2 krokkasser	Kasse 1: ca. 07:35 Kasse 2: 09:40
7022-Oljeforurenset masse Bulk, 22700 kg	2 krokkasser	Kasse 1: ca. 08:15 Kasse 2: 09:10
7021-Olje -og fettavfall Bulk, 54 kg 7022-Oljeforurenset masse Bulk, 652 kg. 7024-Oljefilter Bulk, 181 kg. 7051-Maling, lim, lakk Bulk, 5563 kg.	1 krokkasse	Like før kl 09:01
Næringsavfall -Sentralsortert	2 krokkasser	Like før kl 09:01
Næringsavfall -Sentralsortert	2 krokkasser	Kasse 1: 09:09 Kasse 2: 09:14
Husholdnings avfall, 19 400kg.	2 krokkasser	Kasse 1: 09:11 Kasse 2: 09:17
Næringsavfall -Sentralsortert, 11950 kg.	2 krokkasser	Kasse 1: 09:20 Kasse 2: 09:26
	2 krokkasser	
7022 oljeholdig slam, 24000 kg.	Tankbil med 3 kammer	Tank: 09:40
Eksplosjon		Kl.: 09:48:55

Som nevnt ovenfor ble antennelse forårsaket av sveising. To sveisere jobbet i et stillas over åpne luker ned i bunkeren. Sveisingen foregikk i en periode før antennelsestidspunkt og gnister fra sveisingen kan ses på Kamera 11 ved flere tidspunkt før eksplosjonen (kamera-tid angitt) uten at en antennelse oppsto. Det kan antyde at en dampsky var under utvikling men ikke hadde nådd området hvor gnistene falt ned inn i bunkeren (selvfølgelig henger antennelseprosessen også sammen med tenndyktigheten av gnistene):

8:33:03: Gnister, ingen antennelse.

8:34:41: Gnist, ingen antennelse.

8:36:10: Stor mengde gnister, ingen antennelse

8:40:55: Stort gnistregn, ingen antennelse

8:43:58: Stor gnist, ingen antennelse

8:45:27: Medium mengde gnister, ingen antennelse

8:45:38: Stor mengde gnister, ingen antennelse

8:47:25: **Gnist forårsaker antennelse av en dampsky i bunkeren som resulterer i eksplosjonen**



Figur 5-3: Regn av gnister, ingen antennelse (8:40:55)



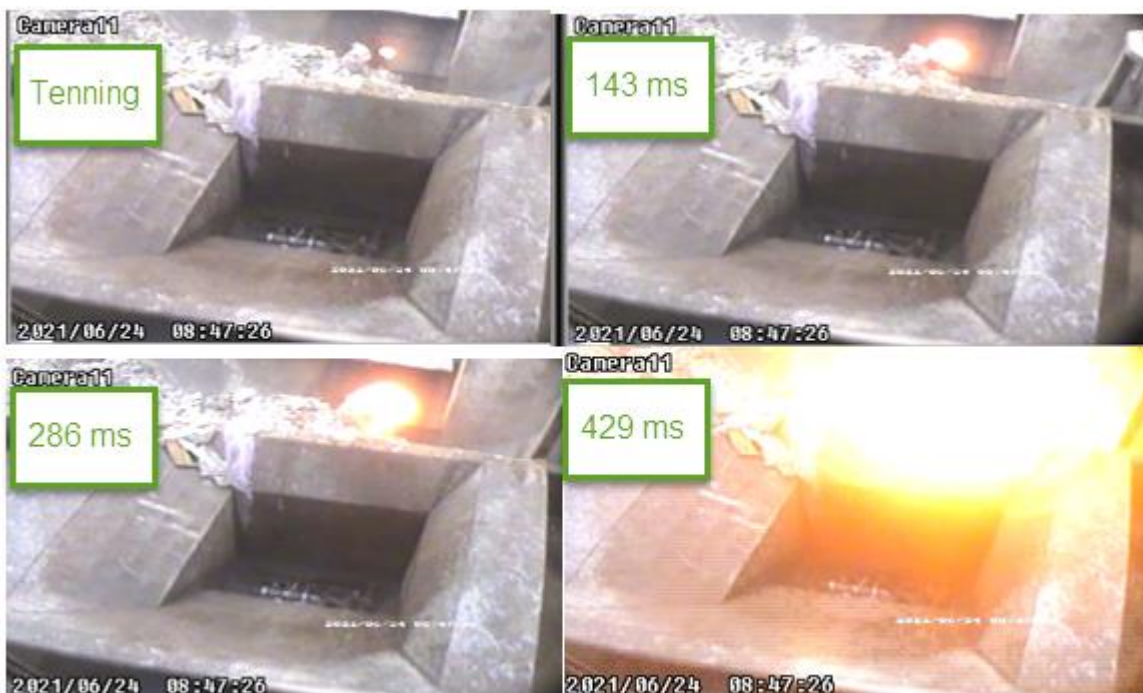
Figur 5-4: Gnist som antenner (8:47:25)



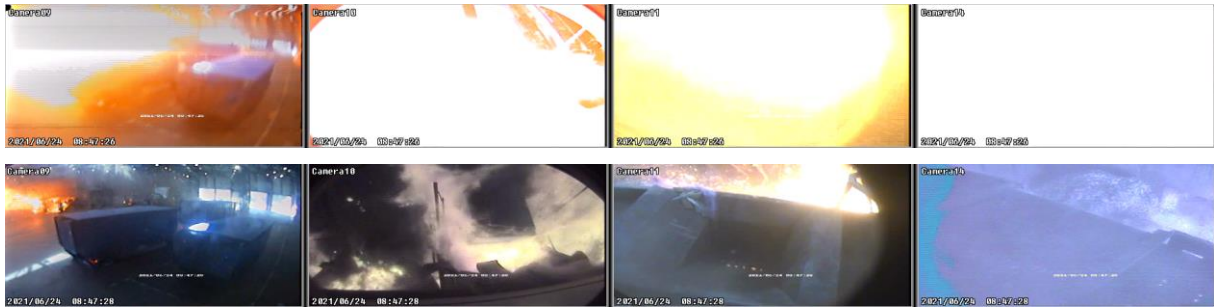
Figur 5-5: Første tegn til flamme (8:47:26)

Kameraet har en bildefrekvens på 7 bilder i sekundet, dvs. ca. 143 ms mellom hvert bilde. De første fire bildene fra observert tenning er gjengitt i Figur 5-6. Den eksplosive forbrenningen ser ut til å være over etter ca. et sekund, deretter gjenstår en brann konsentrert om området nær tømmeluke 1-4 både i bunkeren og rundt bilene.

Under eksplosjonen og den første tiden etter denne går flere av kameraene i hvitt, deretter blir brannen igjen synlig. Dette er sannsynligvis både på grunn av automatisk justering av eksponering i kameraene, og at eksplosjonen/flashbrannen avgir mer lys.



Figur 5-6: Eksplosjonsforløp.



Figur 5-7: Fra venstre: Kamera 9, 10, 11 og 14. Øverste rekke er bilder mindre enn et sekund etter tenning, nederste rekke er to sekunder etter tenning.

Eksplosjonen sender brennende gass opp i tømmehallen. Denne flashbrannen varer i rundt et sekund. Etter dette vedvarer en brann rundt bilene som leverer væske i tømmeluke 1 og 2. Bilen i tømmeluke 2 har levert væske og er tom eller nær tom når eksplosjonen skjer. Rundt denne ser det ut til å være en brann som varer i ytterligere 3 sekunder etter at flashbrannen er over. Bilen i tømmeluke 1 tømmer fortsatt væske ut etter at brannen rundt bilen i tømmeluke 2 er slukket; væsken som helles ut fra bilen i tømmeluke 1 står i brann.



Figur 5-8: Kamera 10. Øverst: Biler innhyllet i flamme 1 sekund etter eksplosjon/flash-brann. Nederst: Brann rundt bilene er slukket 3 sekunder senere, men væsken som renner ut fra bilen i tømmeluke 1 brenner kontinuerlig.

Brannen gir kraftig røykutvikling, og den varme røyken trekker opp under taket der kameraene er montert. I løpet av kort tid svikter kameraene:

- 08:48:12 videotid (46 sekunder etter antennelse): Kamera 9 svikter. Mye røyk er synlig.
- 08:48:21 videotid (55 sekunder etter antennelse): Kamera 10 svikter. Brannen fra strålen under tankbilen kan fortsatt skimtes. Mye røyk.
- 09:02:15 videotid (ca. 15 minutter etter antennelse): Kamera 11 svikter. Brann lenger inn i bunkeren er synlig.

- 09:10:00 videotid (ca. 23 minutter etter antennelse): Kamera 14 svikter. Fortsatt brann lenger inn i bunkeren.



Figur 5-9: Siste øyeblikk der alle kameraer fungerer (46 sekunder etter antennelse). Kraftig røykutvikling er synlig.



Figur 5-10: Dronebilde tidlig i hendelsen (55 minutter etter eksplosjon) viser væskebrann bak på tankbil.

5.4 Undersøkelse

5.4.1 Dannelse av brennbar sky i bunker

Den hurtige forbrenningen tyder på at det var en forblandet eksplosiv atmosfære i bunkeren. Fra videoen er det tydelig at den brennbare dampen tennes av gnister fra sveisingen over. Imidlertid hadde sveisingen da allerede pågått over lengre tid, og det ses tydelig at gnister flere ganger faller ned i samme område uten at det antennes. Dette kan tyde på en av følgende:

1. Dampskyen var ikke til stede tidligere, men oppsto underveis i sveisingen.
2. Stedet gnistene traff var i utkanten av dampskyen, der tenning er vanskeligere pga lavere (mindre lett antennelig) konsentrasjon. Gnisten som antente kan ha slått mot betongen og brekt opp og blitt mer tenndyktig (når nytt uoksidert metall eksponeres for luft blir gnisten mye varmere).

Gnistene tyder også på en annen egenskap: dampen er tyngre enn luft, siden gnistene faller et stykke før de antenner skyen. En lett gass (som hydrogen eller metan) ville samlet seg under taket, og ville vært mest antennelig høyere oppe. At dampen er tyngre enn luft tyder på at tyngre hydrokarboner har blitt losset før eller under hendelsen.

At dampskyen ikke var til stede tidligere, kan skyldes en av følgende:

- a) Dampskyen fordampet fra materiale som ble levert fra en eller flere av bilene som tømte like før, eller under eksplosjonen. Pga. fordampningen vokste dampskyen i tid.
- b) Dampskyen fordampet fra materiale som hadde blitt levert tidligere, men som brukte lang tid på å fordampe. Pga. fordampningen vokste dampskyen i tid.
- c) En rik dampsky var til stede over lenger tid, men ble forstyrret/brakt opp til området der gnistene falt pga. tømmeaktiviteten.

Av de varene som ble levert kan ikke alle leveransene vurderes for tilstedeværelse av brennbare gasser (f.eks. i en gassflaske) eller brennbare væsker med lavt flammepunkt/høy damptrykk pga mangel av informasjon. Likevel vil lassene presentert i Tabell 5-1 diskuteres nedenfor.

Det første lasset gjelder to krockasser med følgende innhold:

Krockasse 1: smørefett fra grease, oljeholdig filler, filter mm, oljefilter m/metall, kaks m/oljebasert borevæske, sekkeavfall

Krockasse 2: oljeholdig

Smørefett og olje fanget opp av et filter (f.eks. smøreolje) har et typisk flammepunkt på henholdsvis > 150 °C og 125 °C. Kaks og sekkeavfall kan ha et flammepunkt < 21 °C og kan derfor ikke utelukkes å ha forårsaket en eksplosiv blanding i bunkeren. «Oljeholdig» fra krockasse 2 ble tømt samtidig med tankbilen som tømte oljeholdig slam. Fra overvåkingskameraene kan man konstatere at det brenner rundt krockassen men ikke inni. Det kan peke på et relativt høyt flammepunkt og er dette er derfor mindre sannsynlig som kilde for en eksplosiv blanding i bunkeren.

Det andre lasset gjelder «oljeforurenset masse bulk»:

Dette er tilgjengelig dokumentasjon for stoffene i lasset:

- Oljeholdig slam settlingsbasseng, flammepunkt 87°C
- Oljeholdig slam, settlingsbasseng TPI, flammepunkt > 90°C
- Settlingsbasseng, ingen flammepunkt bestemt men betydelig lavere karboninnhold
- Oljeholdig slam settlingscontainer, flammepunkt > 90°C

Dette lasset vil derfor mest sannsynlig ikke forårsake eksplosive blandinger i bunkeren pga. høyt flammepunkt.

Det tredje lasset består av 1 krockasse med «Olje -og fettavfall Bulk», «Oljeforurenset masse Bulk», «Oljefilter Bulk» og «Maling, lim, lakk Bulk». Ingen dokumentasjon er tilgjengelig for dette lasset. Det kan ikke utelukkes at oljen som er med på dette lasset har et flammepunkt < 21°C. Også maling, lim og lakk kan ha et flammepunkt < 21°C og dette lasset kan derfor ikke utelukkes å ha bidratt til oppbygging av en eksplosjonsfarlig dampsky.

De neste lassene er næringsavfall eller husholdningsavfall og kan teoretisk inneholde gassflasker med brennbare gasser inni. Gassen vil kunne frigjøres hvis flasken skades. Det er selvfølgelig også mulig at en brennbar væske har blitt blandet med avfallet.

Det siste lasset er en tankbil med oljeholdig slam som begynte tømningen kl. 09:40 og som fortsatt ble tømt i bunkeren når eksplosjonen oppsto. Tankbilen som leverte denne væsken var delt i flere kamre som tømmes separat. Informasjonen som var kjent før hendelsen gjaldt en beskrivelse av avfallet: slam fra olje/vann-separatorene, slam fra oljeutskillere, slam fra remediering av grunnvann som inneholder farlige stoffer, avfall som består av, inneholder eller er forurenset med råolje eller kondensat, oljeholdig avfall eller oljeforurenset masse. En del av lasset kom fra Sleipner-plattformen og ble betegnet som oljeforurenset masse og indikert under «Return Header text» som «Tømme inlet B etter piggeoperasjon». For ingen av de stoffene som ble levert var flammepunktet kjent på forhånd.

Basert på overvåkingskamerabilder er det to observasjoner som peker på at dette lasset (oljeholdig slam) kan ha hatt et lavt flammepunkt. Omtrent 3 s etter eksplosjonen (eller tidligere) oppstår en brann på de åpne lukene på tankbilen (se Figur 5-8). Damp som kom ut av tanken på bilen ble antatt av eksplosjonen som også innhyllet de to bilene som ble tømt på eksplosjonsøyeblikket. Det oppsto ikke en eksplosjon i kamrene på tankbilen (de er uskadet som man kan konkludere fra videoopptakene) som peker på at blandingen i kamrene var for fet for å kunne brenne. Dette igjen tyder på et høyt damptrykk (og dermed et lavt flammepunkt). I tillegg kan man se at væskestrålen som strømmer ut av tankbilen umiddelbart etter eksplosjonen brenner som en fakkell (se Figur 5-8). Strømningshastigheten ut av bilen kan beregnes basert på væsknivået i kamret som tømmes:

$v = C_v (2 g H)^{1/2}$ med v = utstrømningshastighet (m/s), C_v = hastighetskoeffisient (vann 0,97), g = akselerasjon av tyngdekraften ($9,81 \text{ m/s}^2$), H = væsknivået i kammer (m) som gir en utstrømningshastighet på 4,3 m/s og 3,0 m/s ved væsknivåer på henholdsvis 1 m og 0,5 m.

Fordampningshastigheten er såpass høy at en brann i væskestrålen opprettholdes på tross av den høye utstrømningshastigheten.

Det var væske igjen på et av kamrene etter hendelsen, og prøver ble sendt til testing. Slammet består hovedsakelig av vann med en oljeaktig væske på toppen og en bunnsediment. Det ble tatt prøve av oljefasen på toppen (både fra tankbilen direkte og etter at det resterende materialet ble overført til en annen tankbil og transportert tilbake til kilden), som begge viste flammepunkt $< 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Figur 5-12 viser et bilde av oljefasen på toppen av væsken som var igjen i en av kamrene i tankbilen. Flammepunktet av oljefasen tatt fra tankbilen direkte (Figur 5-12) ble testet nærmere og flammepunktet viste seg å være $21,5 \text{ }^\circ\text{C}$ som er for høyt til å forklare hendelsen. Flammepunktet av væsken som ble levert 24. juni 2021 kan imidlertid ha vært lavere pga. brannen tankbilen ble utsatt for (som varte minst i 1 time) og som kan ha ført til avdampning av lette komponenter i væsken som resulterer i et høyere flammepunkt.

Selv om man ikke kan utelukke at andre lass har bidradd til dampskyen er det det siste lasset som peker seg ut som det mest sannsynlige.

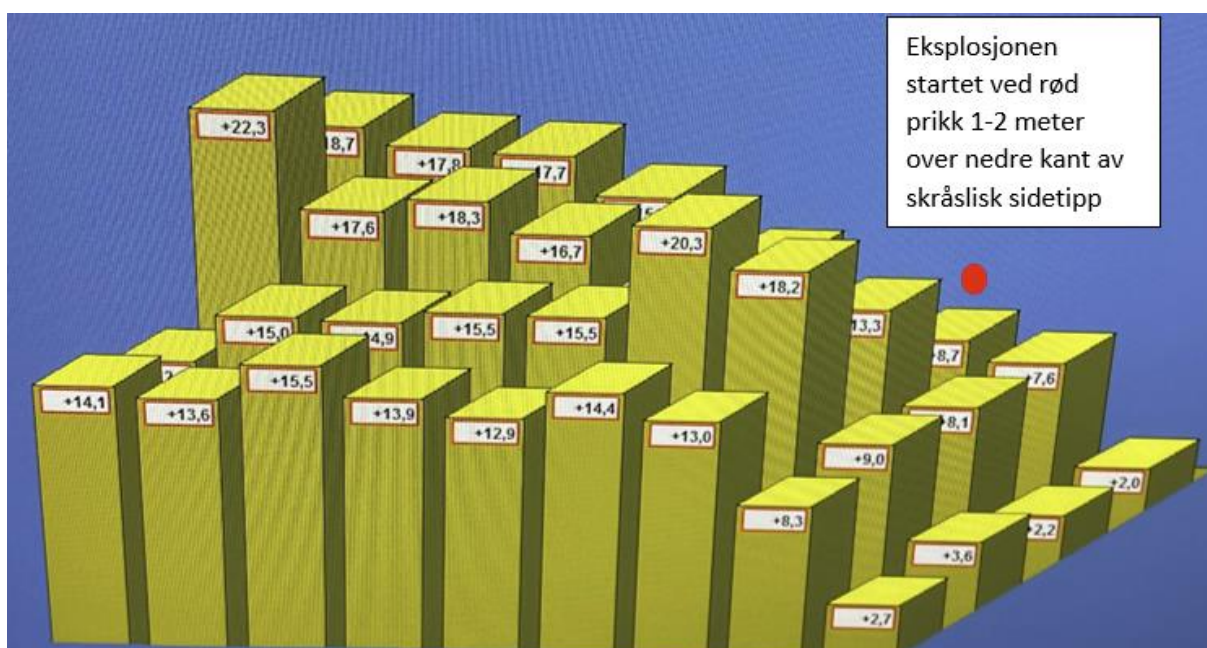
Søppelet flyttes rundt i bunkeren av en kran for å sikre god blanding og dermed jevn brennverdi. Kranen er utstyrt med en radar som måler nivået på søppelet. Kranen passerte over hele bunkeren kort tid før eksplosjonen, og et oppdatert bilde av søppelnivå i bunkeren er derfor tilgjengelig (Figur 5-11). Søppelnivået er lavest ved tømme-stasjonen. En tung dampsky fordampet fra materiale levert like før eksplosjonen ville sannsynligvis legge seg i «dumpe» rett under tømme-lukene og vil ikke være i stand å «strømme vekk» på grunn av tettheten.

Værdata fra RV9 Dalehefte målestasjon viser $16\text{-}17 \text{ }^\circ\text{C}$ utetemperatur mellom kl. 09 og kl. 10 den 24. juni. I bunkeren vil det kunne være eksoterme prosesser som varmer opp søppelet. Data fra utluft i ventilasjonsanlegget viser temperaturer rundt $25 \text{ }^\circ\text{C}$, og høyere temperaturer i søppelet er mulig. Det er ikke lagret IR-film data av søppelet rett før hendelsen. Eldre data (fra 23. juni 2020) viser en gjennomsnittsoverflatetemperatur på området foran tømme-lukene på $20,4 \text{ }^\circ\text{C}$, med varmere områder på $30\text{-}38,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Det forventes at temperaturen også kunne være høyere dypere inn i søppelet. Den relativt sett kalde luften utenfra som vil kunne strømme inn i bunkeren og i «dumpe» i kombinasjon

med en varmere luftstrøm opp pga oppdrift og ventilasjon av bygget vil kunne forårsake både blanding av dampen med luft og fortykning av dampskyen.

I lys av ventilasjonen og fortykning av dampskyen bør fordampningshastigheten være relativt stor for å kunne danne en større brennbar dampsky i bunkeren. Det betyr først og fremst at flammepunktet til den brennbare væsken skal være lavt (dvs. relativt høyt damptrykk). I tillegg vil en høyere temperatur i søppelet samt spredning av den brennbare væsken over en stor overflate (som det gjør når det blir spredt ut over og i søppelet) sørge for en økning av fordampningshastigheten.

Hvis man antar at den eksplosive delen av dampskyen som ble dannet i bunkeren når helt opp til der den ble antent og fordeler seg jevnt over hele «dumpen» kan man beregne at dampskyen har et volum på 1290 m³. Ved antagelse av en homogen nær-støkiometrisk dampsky ville det utgjøre omtrent 129 kg brennbar væske. En nær-støkiometrisk blanding, i hvert fall i en del av dampskyen, kan forventes å ha vært til stede i lys av den relativ høye forbrenningshastigheten utfra videoopptakene.



Figur 5-11: Nivåmålinger i bunkeren før antennelse. Hver søyle representerer et areal på ca. 5 x 5 m.

Hvis vi antar at dampskyen er forårsaket av væsken som ble levert ved tankbilen (det siste lasset) bør tykkelsen på oljefasen på toppen av væsken være minst 1,3 – 2,5 cm for å kunne forårsake en dampsky med minst 129 kg brennbart materiale. Nødvendig tykkelse avhenger av om 1 kammer var tømt på eksplosjonsøyeblikket eller 2 kamre (en overflate på kamrene på 6 m² er antatt i beregningen samt en tetthet på oljefasen på 850 kg/m³). Størrelsesorden av mengde toppfase som må ha vært til stede muliggjør forklaringen. Fra materialet som ble ført tilbake til kilden (hovedsakelig fra 1 kammer) ble omtrent 100 l oljeholdig toppfase gjenvunnet.

129 kg av væsken må ha fordampet innenfor de 8.5 minuttene bilen har levert væske som betyr en middelsfordampningshastighet på 252 g/s.



Figur 5-12: Bilde av topplaget av oljeholdig slam i tankbilen som leverte kl 09:39 24. juni 2021.

Væsker med flammepunkt under 60 °C regnes som brannfarlige, og skal ikke leveres til Returkraft (Returkraft har ikke konsesjon til å ta inn brannfarlige væsker; Returkraft ville ha nektet å ta imot avfallet hvis de visste at det hadde flammepunkt under 60 °C). Det er altså et betydelig avvik mellom antatt og faktisk kjemi på det leverte stoffet.

Vurderingen beskrevet ovenfor peker mot at væsken må ha et damptrykk som i hvert fall er nok til å gi støkiometrisk blanding under temperaturen den dagen (omtrent 25 °C). Tabell 5-2 viser egenskaper for tre hydrokarboner rett under dette nivået. Flammepunkt, støkiometrisk blanding, partialtrykk og temperatur der fordampning gir støkiometrisk blanding er oppgitt. Det er sannsynlig at væsken som fordampet må ha hatt et flammepunkt/damptrykk nærmere disse stoffene for å ha laget den eksplosive skyen som ble observert.

Tabell 5-2: Tre typiske brannfarlige alkaner.

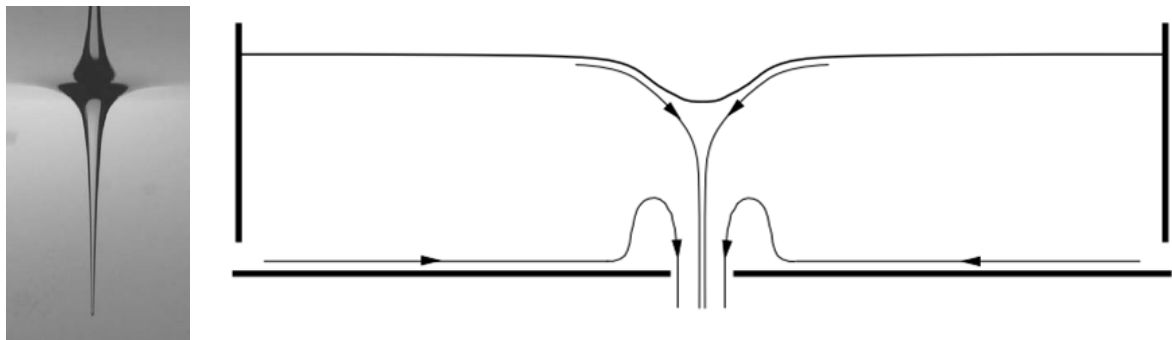
	Flammepunkt (°C)	Støkiometri	Støk. v/ temp (°C)
Heksan	-22	2.16 %	-18
Heptan	-4	1.87 %	4
Oktan	13	1.65 %	15

En støkiometrisk homogen blandet damp-luftblanding (dvs optimal) vil ekspandere ca. 8 ganger under forbrenning. Hvis vi antar at trykket spres jevnt i hele bunker og tømmehall (totalt volum ca. 100 000 m³) vil en sky på 1290 m³ da gi et overtrykk på omtrent 100 mbar. Som et utgangspunkt vil vi sammenligne et overtrykk på 100 mbar med de skadene som er observert. Skadevurderingen er presentert nedenfor.

5.4.2 Brennende stråle etter eksplosjonen

Som nevnt ovenfor oppstår en stråle av brennende væske fra tankbilen som losses oljeholdig slam etter eksplosjonen. Det tyder på tilstedeværelse av en væske med lavt flammepunkt. Utfra undersøkelse av

slammet etter ulykken består det oljeholdige slammet av et topplag med oljen (som holder et lavt flammepunkt), av vann (som er hovedingrediensen) og et sediment. Man kan spørre seg hvorfor strålen fra tankbilen brenner såpass godt mens hovedingrediens av slammet er vann. Forklaringen kan være at det oppstår en virvel i kammeret på tankbilen når væsken strømmer ut. I (1) rapporteres det om både eksperimenter og simuleringer som viser at hovedstrømmene i en virvel i en tank med vann med åpning i bunnen skjer nær bunnen av tanken og ved overflaten av væsken som i tilfellet tankbilen med oljeslam gjør at mye av både sedimentet og oljefasen på toppen blir dratt med gjennom åpningen og mindre vann fra det midtre delen av tanken (Se Figur 5-13) i tilfelle det oppstår en virvel i kammeret på tankbilen. Strålen ut av bilen vil derfor inneholde forholdsmessig mye brennbar væske som bidrar også til å forklare størrelse på dampskyen innenfor en relativ kort periode.



Figur 5-13: Virvel i tank med hull i bunnen og indikasjon av hvor de største massestrømmene oppstår i en slik tank (Andersen, A., Bohr, T., Stenum, B. and Juulrasmussen, *The bathtub vortex in a rotating container*, J. Journal of Fluid Mechanics, Volume 556, pp. 121 – 146, 2006).

5.4.3 Skader

5.4.3.1 Kontrollrom

Eksplosjonen slo observasjonsvinduet inn i kontrollrommet. Med en overflate på omtrent 2,4 x 3,4 m utsettes denne flaten for store krefter ved en eksplosjon; f.eks. vil et trykk på 110 mbar gi en kraft på 100 kN, tilsvarende en vekt på ca. 10 tonn. Et slikt trykk er mer enn tilstrekkelig til å slå inn vinduet. Det minste trykket som skal til for å gjøre dette er ikke sikkert, men et anslag er 30-60 mbar (det er sterkt avhengig av tykkelse, forsterkningen og overflate; basert på (2)). Andre vinduer mellom kontrollrommet og bunkerrommet er intakte. Disse vinduene er av mindre størrelse (som gjør de sterkere), og er delvis vendt bort fra bunkeren. De er sannsynligvis utsatt for noe lavere trykk enn det store skråstilte vinduet, men kunne gi en øverste grense på trykket av rundt 80 mbar. (2)



Figur 5-14: Skrått observasjonsvindu inn mot bunkeren var slått inn, mindre sidevinduer intakte. Venstre: Bilde fra kontrollrom 29.06. Høyre: Bilde fra bunkerrom 11.08 (vindu provisorisk erstattet).

Bak i kontrollrommet er det vinduer mot friluft. Disse ser ut til å være i normal utførelse, og er uskadet (Figur 5-15). Det tyder på et trykk på mindre enn 80 mbar bak i kontrollrommet. Det har heller ikke vært slengt prosjektiler i rutene som har knust disse.

Dataskjermer som henger fra taket er på plass (Figur 5-16). Disse skjermene har et relativt stort overflateareal, og flere står nokså parallelt med vinduet som ble blåst inn, slik at de er utsatt i tilfelle en eksplosjonsvind inn denne veien. At skjermene fortsatt henger fast kan gi et øvre tak på denne eksplosjonsvinden. Som et eksempel, med et antatt overflateareal på 1.5 m² per skjerm og en innfesting som tåler 500 N i horisontal retning (dette gir et vesentlig moment på innfestingspunktet i taket), får vi en hastighet på under 22 m/s, tilsvarende liten storm. At ingen vinduer har blitt knust, gjør at det ikke er noen naturlig vei for en eksplosjonsvind å gå videre.

Noen, men ikke alle takplater løsnet. Dette kan være pga. en eksplosjonsvind som har dratt platene med seg, eller et momentant trykk som har løftet enkelte plater opp. Posisjoner der takplatene har blitt løftet opp (Figur 5-17 Figur 5-19) er stort sett i «blindgater» der trykket kan ha hopet seg opp, heller enn i innsnevninger der en eksplosjonsvind ville hatt størst fart. Et trykk på 40-70 millibar vil være nok til å gjøre slik skade, og trykknivået i kontrollrommet må derfor vært lavere enn dette de fleste steder.

Dørkarmen inn til møterommet ble revet i stykker. Døren var lukket da eksplosjonen inntraff pga møte i rommet. I følge (3) vil et trykk på omtrent 80 mbar være nødvendig for en slik skade.



Figur 5-15: Vindu bak i kontrollrom.



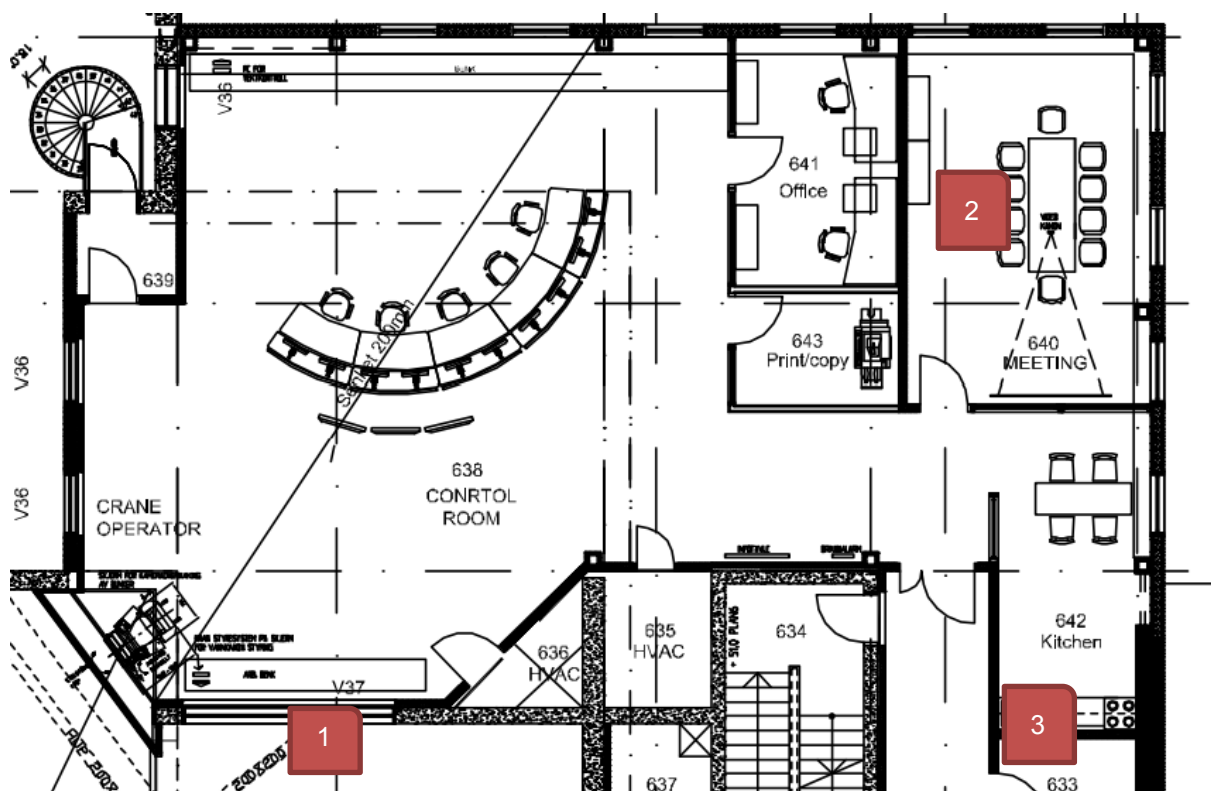
Figur 5-16: Skjermer i taket, og de fleste takplater, er på plass. Bilde fra 29.06.



Figur 5-17: Takplater har løsnet i møterom (venstre) og kjøkken (høyre). Bilder fra 29.06.



Figur 5-18: Takplater nær vinduer mot bunker har løsnet. Stillbilder fra video møterom (venstre) og kjøkken (høyre). Bilder fra video natt til 25.06.



Figur 5-19: Steder hvor takplater har løsnet.

5.4.3.2 Tak over bunker

Taket over bunkeren har ventilasjonsluker som normalt er stengt. Lukene åpnes ved brannalarm slik at røkgass kan ventileres ut. I tømmehallen finnes det 12 luker med lysåpning ca 90x180 cm og på avfallsbunker finnes det 45 luker med lysåpning 100x160 cm.

Alle lukene holdes sammen av to åpningssylindere som åpner på fjær og lukkes med trykkluft (7 bar). Trykklufslangene er laget i en type plast som vil smelte ved høye temperaturer, og dermed vil lukene åpnes hvis det samles røkgass under taket, selv om det automatiserte systemet svikter.

Flere av disse lukene har eksplosjonsskader som tyder på at de ble revet opp før de rakk å åpnes basert på branndeteksjon (Figur 5-20). Taket like over tømmeasjonene og sidetipper har også blitt revet opp av eksplosjonstrykket (Figur 5-21, Figur 5-22). Deler av taket over tømmeasjonene har blitt revet opp som en enhet og lagt seg igjen, mens delene over sidetipp, med et areal på ca. 375 m², forble åpne.

Bakerst i bunkeren er det innsugspunkt for det primære luftesystemet. Dette er koblet på to åpninger tilsvarende de for taklukene, og det har blitt bygd en boks over disse for å koble til avsugsrør. Disse boksene ble ødelagt i eksplosjonen (Figur 5-23).

En luftekanal har skader som tyder på at den har blitt truffet av et prosjektil i høy hastighet. (Figur 5-24 - Figur 5-25). Det er mulig at prosjektilene har skrevet seg fra en lufteluke som ble slått opp, f.eks. den i Figur 5-26 der hele luken har blitt slått av innfestningen.

De to åpningssylindere som holder lukene sammen har en åpningskraft med fjær som er 85 kg. Stempelstangen er Ø20 mm, og sylinderdiameteren er ca Ø44 mm. Dette gir en lukkekraft på ca 1 kN eller ca 100 kg pr sylinder. Hvis en luke veier 30 kg så er lukkekraften når trykket er på 2000N + 300N – 1700 N = 600 N. Denne kraften virker på 1,6 m² (for bunkerluker) slik at trykket (fra undersiden) som skal til for å løfte luken er så lavt som 600/1,6 = 375 N/m² (3,75 mbar). Åpningstrykket for lukene på tømmehallen er 3,7 mbar.

Nesten alle lukene er revet av festene sine (f.eks. Figur 5-27). Luken i denne figuren ligger i et hjørne av bunkeren, nær hvor eksplosjonen inntraff. Det er mulig den har sett høyere eksplosjonstrykk på grunn av trykkstagnasjon i hjørnet, men «naboene» som ligger nærmere hjørnet er intakt. Denne skaden er ikke nødvendigvis direkte forårsaket av trykket på luken mens den har vært lukket. Det virker mer sannsynlig at luken har blitt slått opp og at avrivningen har skjedd når luken har bråstoppet ved maks utslag på festene. Da vil en bevegelsesmengde som har bygget seg opp over tid mens luken har åpnet seg, bli «tatt ut» over en mye kortere periode. Dermed blir kreftene på innfestningen langt sterkere her enn mens luken er lukket.

Skadene på noen av lukene viser i hvert at trykket var betydelig større enn den estimerte åpningstrykket på 3,75 mbar som stemmer overens med trykkestimaterne nevnet ovenfor.



Figur 5-20: Takluke med skade i innfestning. Bilde fra 11. august.



Figur 5-21: Skade i tak over tømmestasjoner. Bilde fra 11. august.



Figur 5-22: Skade i tak over sidetipp. Bilde fra 25.juni.



Figur 5-23: Påkoblingspunkt for luftesystem er ødelagt. Bilde fra 11. august.



Figur 5-24: Skade på luftekanal (oversikt). Bilde fra 11. august.



Figur 5-25: Skade på luftekanal (nærbilde). Bilde fra 11. august.



Figur 5-26: Mulig utgangspunkt for prosjektiler mot luftekanal. Bilde fra 11. august.



Figur 5-27: Luke som er revet av innfestningen. Bilde fra 11. august.

5.4.3.3 Vegger i tømmehall

Flere veggpaneler ble slått ut i nærheten av tømmelukene. Totalt ca. 215 m² ble slått ut (Figur 5-28 og Figur 5-29). Dette skjedde hovedsakelig i hjørnet av bygget. Eksplosjonstrykk kan ofte være høyere i hjørner på grunn av trykkrefleksjonstagnasjon. Panelene er imidlertid slått ut i nordøstsiden av hjørnet, men ikke nordvestsiden. Grunnen til dette er ikke kjent. Det er sannsynlig at trykkene på de to sidene av hjørnet har vært relativt like, selv om overlappende trykkbølger kan gi lokale topper som avhenger av både eksplosjonsforløpet og omgivelsene.

Innfestningene på veggelementene er ikke kjent, men panelene har stort overflateareal, og vil nok løsne ved et trykk på 50-150 mbar. De fleste panelene i bygget er intakte, og dette tyder på at trykknivået i bygget som helhet nok må ha vært lavere enn dette.

Fire av fem porter på sørøstsiden av tømmehallen var lukket når eksplosjonen inntraff (Figur 5-30). Alle disse portene ble slått ut av eksplosjonen, og noen traff fjellveggen tvers over plassen og veien utenfor portene – ca. 20-25 meter unna (Figur 5-31, Figur 5-32). Fra videoen ser det ut som at festet øverst har holdt lengst, slik at portene har fått fart opp og ut i et skrått kast. Det gir i så fall en lenger kastelengde enn hvis portene hadde blitt slått rett ut, og reduserer forventet impuls som er nødvendig for å kaste portene så langt. Kastelengden øker med vinkelen opp til 45 grader, det betyr at et 45 graders «kast» trenger minst energi for å kaste en gitt lengde. Ved en enkel fysisk betraktning som ser bort fra luftmotstand, får vi:

$$V_0 = \sqrt{d * g / (\sin 2\theta)}$$

Der V_0 er initial fart, d er avstand, g er tyngdeakselerasjonen og θ er vinkelen fra horisontal. Dette gir en fart mellom 24 m/s (15 grader, 20 meter) og 16 m/s (45 grader, 15 meter). Fra overvåkingskameraer ser vi at det går ca. 15 bilder fra antennelse til portene flyr ut, dvs. ca. 2,1 sekunder. Hvis vi anslår ca. 0,6 sekund fra antennelse til eksplosjonen når sitt maksimum, og en avstand på 35 meter fra eksplosjonen til portene (100 ms med lydhastigheten), får vi at at eksplosjonstrykket virket på portene i ca. 1,4 sekunder. Portelementene er tynne stålplater med isolasjon imellom med en vekt på ca 32,6 kg/m². Å akselerere disse til 16 eller 24 m/s i løpet av 1,4 sekunder krever en akselerasjon på 11,4 eller 17,1 m/s/s, tilsvarende et trykk på 3,7 mbar eller 5,5 mbar, et trykk i samme størrelsesorden som estimert for taklukene. I vurderingen er det en god del usikkerhetsmomenter, bl.a. at portene ser ut til å ha truffet fjellveggen med en del gjenværende fart (dvs. at potensiell kastelengde ville vært lenger enn 25-30 meter). Portene kan også ha overført en god del energi til bygget før de løsnet (sprekker i betongen kan tyde på dette).

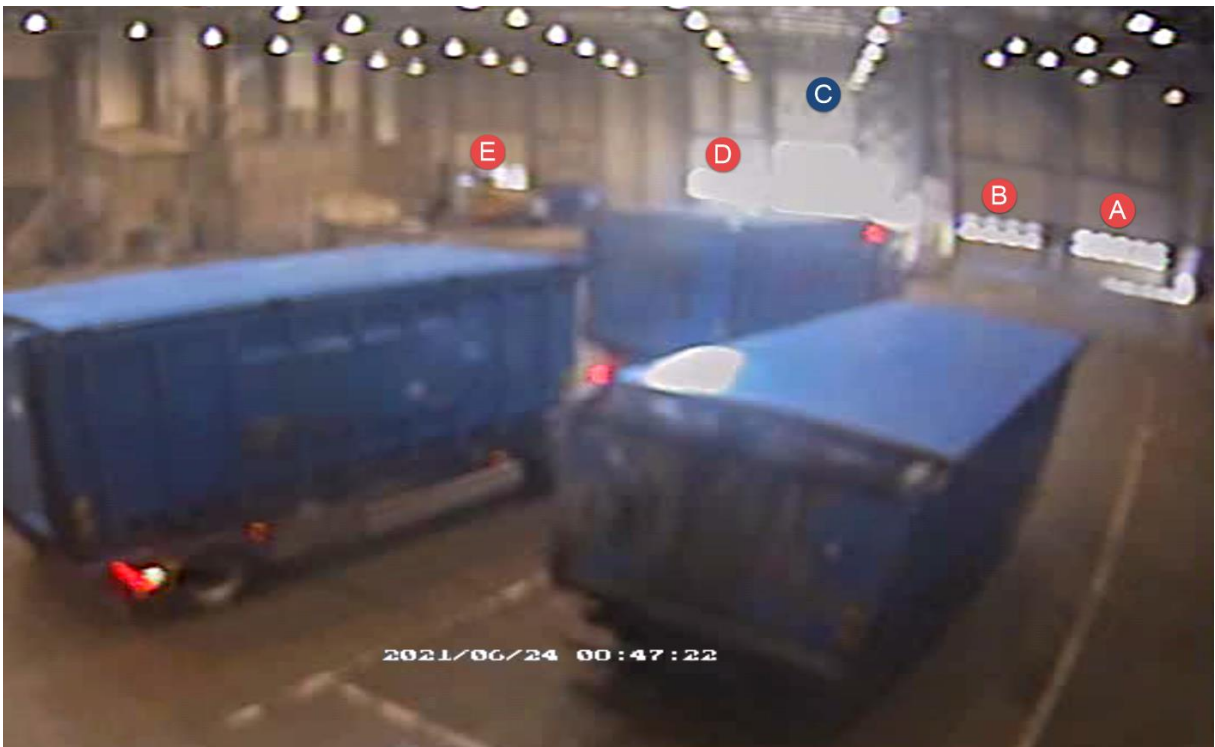
De beregnede trykkverdiene er lave, og det er sannsynlig at kraften som trengtes for å rive portene av hengslene, heller enn kraften som trengs for å kaste dem, er dominerende. Portene har relativt stort areal, og ca. 25-100 mbar vil være nok til å rive dem av hengslene. I tillegg er veggpanelet og stålkonstruksjonen kraftig deformert rett ved siden av port C.



Figur 5-28: Utslåtte elementer i tømmehall. Bilde fra 25. juni.



Figur 5-29: Glippe fra bøyde elementer sørvest i tømmehall. Bilder fra 11. august.



Figur 5-30: Posisjon på porter rett før eksplosjonen: Port C var åpen, de andre lukket.



Figur 5-31: Fire porter slått ut. Bilde fra 25. juni.



Figur 5-32: Noen porter ble slått ut med nok kraft til å treffe fjellveggen, 25-30 m unna. Bilde fra 25. juni.

6 Konklusjon

Eksplosjonen ved energigjenvinningsanlegget Returkraft driver på Langemyr 24. juni 2021 ble forårsaket av antennelse av en tung sky av brennbar damp som samlet seg i gropen nær tømmelukene. Gasskyen ble antent av gnister fra sveising over skråtippet. Slike gnister hadde falt ned i området over lengre tid den morgenen, uten at antennelse skjedde. Gnister fra sveising er kraftige tennkilder med en høy tenndyktighet og der er derfor sannsynlig at dampskyen oppsto i løpet av en relativ kort tid (< 15 minutter) før eksplosjonen.

Vurderinger av hva som er skadet og ikke skadet i anlegget gir et underlag for å anslå eksplosjonsstyrken. For å slå inn vinduet til kontrollrommet trengs et trykk på minst 30-60 mbar. Intakte vinduer i kontrollrommet antyder at trykket i dette rommet nok var lavere enn ca. 70 mbar (det kan fortsatt ha vært høyere trykk enn dette i bunker/tømmehall). Intakte veggelementer i størsteparten av tømmehallen betyr at snitt-trykket nok ikke har vært over 50-150 mbar. Refleksjoner i hjørner kan ha hevet trykket noe for å slå ut de panelene som faktisk er slått ut. At portene ble slått ut tyder på et trykk mellom 25-100 mbar. At trykkene nær tennpunktet og lenger borte er såpass like, kan tyde på at forbrenningen har skjedd relativt langsomt, og involvert en stor mengde gass. For en nær støkiometrisk sky, får man vanligvis en ekspansjon på 8 ganger. For å gi et trykk på 50 mbar i hele bunkeren og tømmehallen (volum ca. 100 000 m³) kreves en gassky på 625 m³. Dette er forenlig med beregninger som viser at gropen i bunkeren opp til punktet der det antentes har et volum på ca. 1290 m³. (Virkelige gasskyer er ofte inhomogene, med rike og tynne deler som bidrar mindre til overtrykke enn en støkiometrisk blanding).

Å skape en gassky av slik størrelse i et delvis åpent område med noe grad av ventilasjon, og med turbulens fra søppeltømmingen som vil bidra til å tynne ut gassen (som også trengs for å opprettholde en stor nok fordampningsrate), krever et stoff med flammepunkt vesentlig under temperaturen i søppelhaugen. Prøver fra tankbilen som leverte væske frem til eksplosjonen hendte, viser imidlertid et flammepunkt på 21,5 °C. Et flammepunkt på 21,5 °C vil sannsynligvis ikke kunne gi en så stor eksplosiv sky som video og en vurdering av skadene antyder innenfor en såpass kort periode. Flammepunktet av væsken som ble levert 24. juni 2021 kan imidlertid ha vært betydelig lavere pga brannen tankbilen ble utsatt for (som varte lengre enn 55 minutter) og som kan ha ført til avdampning av lette komponenter i væsken og som resulterer et høyere flammepunkt. Den brennende væskestrålen som oppstår umiddelbart etter eksplosjonen tyder på en hurtig fordampning hurtigere enn man skulle forvente for en væske med et flammepunkt på 21,5 °C. Også en brann på de åpne lukene på tankbilen som oppstår samtidig og det faktum at det ikke oppsto en eksplosjon i kamrene på tankbilen som peker på at blandingen i kamrene var for rik for å kunne brenne som innebærer et høyt damptrykk (og dermed et lavt flammepunkt).

7 Referanser

1. *The bathtub vortex in a rotating container.* **Andersen, A., Bohr, T. og Stenum, B. & Juulrasmussen.** 2006, Journal of Fluid Mechanics Volume 556, ss. 121 - 146.
2. *The response of glass windows to explosion pressures.* **Harris, R.J. og Marshall, M.R. & Moppet, D.J.** Manchester : s.n., 1977. 6th Symposium Chemical Process Hazards.
3. **Lautkaski, R..** *Understanding vented gas explosions.* Research note 1812 : VTT, 1997.