



Dammexplosionsrisker i metallbearbetande industri.

Ken Nessvi och Henry Persson



Brandforsk

PROJECT TECHNICAL PANEL

Henrik Braatz (Scania),
Svante Björklund (Carlfors Bruk),
Mats Lerjefors (Höganäs),
Åke Persson (Brandskyddsföreningen)
Thomas Freiholtz (GKN Aerospace)
Lennart Evaldsson (Ing Leneva)

Keywords

combustible dust, metal dust, dust explosion, statistics,
incident reports

RISE Rapport 2019:40

ISBN: 978-91-88907-67-7

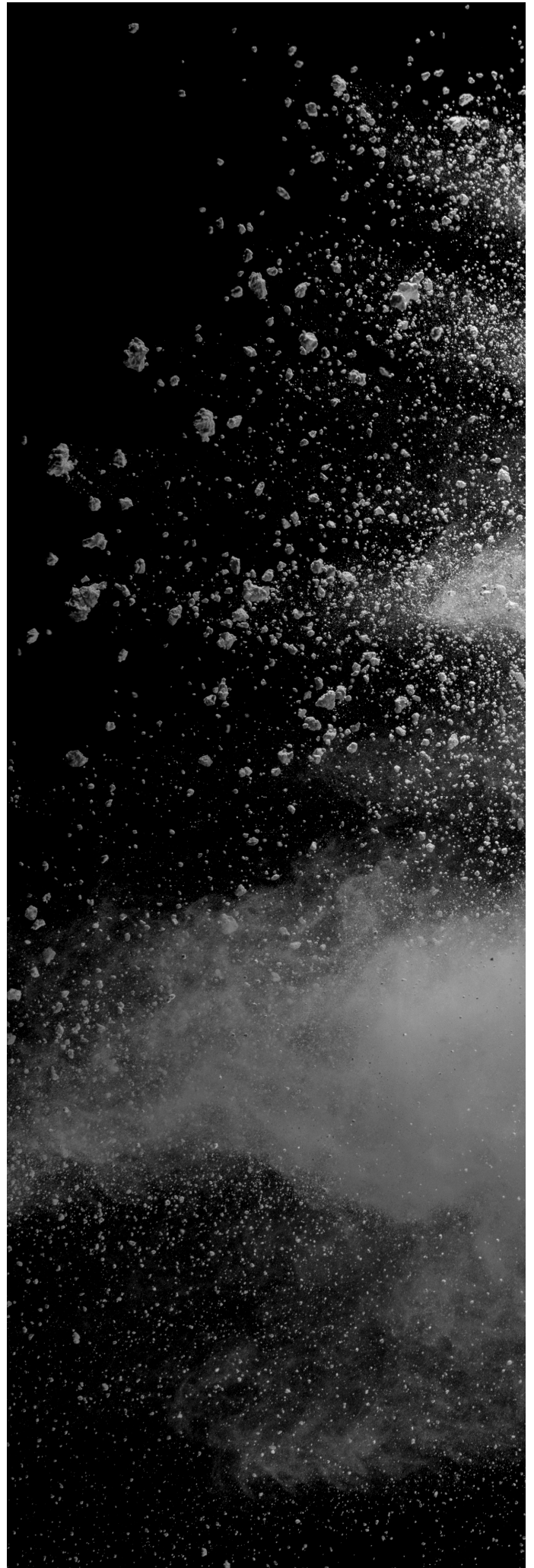
Denna rapport utgör ett slutligt arbetsmanuskript för det
rubricerade projektet.

Den officiella projektrapporten, till vilken referens bör ske
återfinns på RISE:S hemsida:

"Dammexplosionsrisker i metallbearbetande industri"

www.ri.se

BRANDFORSK 2019:3



Abstract

Dust explosion risks in the metalworking industry

The project has focused on the risks of dust explosions and any fire that may arise in various manufacturing processes where metal dust is formed. The work has included studying available statistics to get a better picture of frequency, cause and effect in connection with explosions that occurred, but also to study some real incidents in detail to give examples of events and in some cases also measures taken to reduce the risk of similar events occurring again. In the project, a limited literature review has also been conducted.

Nationally, incidents reported to the Swedish Work Environment Authority have been studied as well as statistics based on the incident reports provided by the Swedish Fire and Rescue Services to the Swedish Civil Contingency Agency (MSB). Internationally, we have mainly studied statistics from the US compiled by CSB (U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board) and from the database "Combustible Dust Incident Database". Studying metal dust explosions specifically, these constitute about 20-25 % of all explosion incidents. It is also clear that the explosions usually occur in dust extraction systems and associated equipment. In several of the incidents, these have also been associated with some form of manual work in the plant, for example cleaning. In many cases, explosions have also been associated with ignorance, e.g. by lack of control of the equipment. The report gives some examples of this type of incident.

Although Sweden has been spared from fatal accidents related to dust explosions, the international statistics show that this is a very common consequence. During the last 15-year period, CSB statistics show that this in average resulted in 0,3 fatalities per reported metal dust incident. It can also be noted that some very serious accidents have occurred in China within the metal industry caused a large number of fatalities. This indicates that dust explosions in the metal industry can be very violent.

Increased knowledge and exchange of experience between metal working industries could result in risk mitigation measures and improved working procedures and are perhaps the most important measures to reduce the risk of serious explosion incidents. There is also a need for more basic knowledge about the explosion processes for different types of metals in order to ensure that different types of protection systems are dimensioned in a correct manner. Today, it cannot be assumed that this is the case as standards for different protection systems are not always adapted for metal dust.

The report also presents some recommendations that form a basis for minimizing the risks for dust explosions.

Key words: combustible dust, metal dust, dust explosion, statistics, incident reports

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE Rapport 2019:40

ISBN: 978-91-88907-67-7

Borås 2019

Innehåll

Abstract.....	1
Innehåll.....	2
Förord.....	4
Sammanfattning	5
1 Introduktion	6
1.1 Syfte och mål.....	6
1.2 Bakgrund och problembeskrivning	6
1.2.1 Kunskapsbrist kan vara en orsak	6
1.3 Allmänt om dammexplosioner	7
1.3.1 Metalldamm	10
2 Definitioner kring dammkaraktärisering.....	12
2.1 Explosionsområde	12
2.2 Limiting oxygen concentration (LOC).....	12
2.3 Maximalt explosionstryck ($P_{\max}$)	12
2.4 Reducerat explosionstryck (P_{red})	12
2.5 Maximal tryckstegringshastighet $(dp/dt)_{\max}$	13
2.6 Tryckstegringskonstant (K_{st})	13
2.7 Explosionsgrupper.....	13
2.8 Minsta tändenergi MIE (minimum ignition energy).....	13
2.9 Minsta tändtemperatur MIT_C för dammoln (minimum ignition temperature dust cloud)	13
2.10 Minsta tändtemperatur MIT_L för dammlager (minimum ignition temperature dust layer)	14
2.11 Volymresistivitet.....	14
2.12 Dammgrupper	14
2.13 Relaxationstid	14
3 Sammanställning av statistik	15
3.1 Statistik baserad på skaderapporter till Arbetsmiljöverket.....	15
3.1.1 Metalldammhändelser	16
3.2 Statistik baserad på insatsrapportering till MSB.....	18
3.3 Internationell statistik	20
3.3.1 Statistik från USA	20
3.3.2 Incidentrapportering på ett internationellt plan	21
3.3.3 Statistik från övriga länder	23
4 Exempel på inträffade incidenter.....	26
4.1 Incidenter i Sverige.....	26
4.1.1 Dammexplosion vid lasersvetsning i titan	26

4.1.2	Dammexplosioner vid kulpeening	31
4.1.3	Explosion i blästeranläggning	33
4.1.4	Ytterligare exempel på händelser med begränsad information	35
4.2	Exempel på incidenter med metalledamm utanför Sverige	36
4.2.1	Dammexplosion i kvarnanläggning 1972 Norge (Kisel)	36
4.2.2	Dammexplosion Gullaug, Norge 1973 (Aluminium)	36
4.2.3	Dammexplosion Aalvik, Norge 1984 (Magnesium)	38
4.2.4	Summering av CSB-utredningar kring metalledammexplosioner	38
4.2.5	Inträffade incidenter i metallindustri under 2018	40
5	Litteraturstudie	41
5.1	Egenskaper metalledamm	41
5.2	Skyddsprinciper	46
5.2.1	Allmänt	46
5.2.2	Standarder	47
5.2.3	Utvärdering av skyddsprinciper	47
6	Diskussion	50
6.1	Egenskaper hos metalledamm	50
6.2	Skyddsprinciper	50
7	Slutsatser och rekommendationer	51
7.1	Dra lärdom av tillbud	51
7.2	Okunskap kring metalledamm	51
8	Referenser	53

Förord

Projektet har genomförts i samarbete mellan PS Group och RISE med finansiering från BRANDFORSK (projekt 601-171), Scania, Carlfors Bruk, Höganäs samt med RISE egna forskningsmedel.

Projektgruppen har bestått av Ken Nessvi (PS Group) och Henry Persson (RISE).

Till stöd för projektet har det funnits en referensgrupp bestående av:

Henrik Braatz (Scania),

Svante Björklund (Carlfors Bruk),

Mats Lerjefors (Höganäs),

Åke Persson (Svenska Brandskyddsföreningen)

Thomas Freiholtz (GKN Aerospace)

Lennart Evaldsson (Ing Leneva)

Vi vill här tacka referensgruppen för dess stöd och bidrag med kunskaper och erfarenheter samt underlag kring inträffade incidenter.

Ett särskilt stort tack till Lennart Evaldsson som tillsammans med Kjell Blom, Arbetsmiljöverket, tagit fram händelserapporter och utifrån detta sammanställt statistik över inträffade händelser med brännbart damm i Sverige. Ett tack även till Morgan Asp på MSB för hjälp med att ta fram relevant brandstatistik.

Ett stort tack också till Stina Dufva och Anton Fast som inom ramen för sitt examensarbete på brandingenjörslinjen på LTH gett underlag till arbetet i projektet.

Sammanfattning

Projektet har varit inriktat mot att belysa risker för dammexplosion och eventuell brand som kan uppstå i olika tillverkningsprocesser där det bildas metalldamm. Arbetet har både omfattat att studera tillgänglig statistik för att få en bättre bild av frekvens, orsak och verkan i samband med inträffade explosioner men också att mer i detalj studera ett antal verkliga incidenter för att ge exempel på händelseförlopp och i vissa fall även åtgärder som vidtagits för att reducera risken för att likande händelser skall inträffa igen. I projektet har även en begränsad litteraturgenomgång genomförts för att sammanställa den forskning som utförts inom metalldammsområdet och vilka frågeställningar som fortfarande kräver ytterligare forskningsinsatser.

Underlag kring inträffade dammexplosioner har inhämtats både nationellt och internationellt. Nationellt har vi studerat inrapporterade incidenter till Arbetsmiljöverket samt gått igenom händelserapporteringarna som landets räddningstjänster gör till MSB som följd av en insats. Internationellt har vi framförallt studerat statistik från USA som sammanställts av CSB (U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board) och de senaste åren i databasen "Combustible Dust Incident Database". Om man studerar metalldammexplosioner så utgör dessa ca 20-25 % av samtliga explosionsincidenter. Det är också tydligt att explosionerna oftast uppstår i ventilationssystem och tillhörande utrustningar såsom utsugskanaler, stoftavskiljare eller filter. I ett flertal fall har det också varit förknippat med någon form av manuellt ingrepp i anläggningen, t.ex. rengöringsarbeten. I många fall har det också varit förknippat med okunskap som direkt eller indirekt (t.ex. bristande kontroll av utrustningen) resulterat i en explosion. I rapporten ges ett antal exempel på denna typ av incidenter.

Även om vi i Sverige varit förskonade från dödsolyckor relaterade till dammexplosioner så visar statistiken sammantaget att detta tyvärr är en mycket vanlig konsekvens internationellt. CSB:s statistik för den senaste 15-årsperioden visar bl.a. att detta ledde till i genomsnitt 0,3 dödsfall per rapporterad incident inom metallbearbetande verksamhet. Ser man internationellt så kan man notera att det skett ett antal mycket allvarliga olyckor i Kina inom metallindustrin med ett stort antal dödsfall. Detta pekar på att dammexplosioner inom metallindustrin kan vara mycket kraftiga vilket också verifieras av forskningsinsatser som visar att metalldammexplosioner leder till mycket högre temperaturer och snabbare tryckstegringsförlopp jämfört med organiskt damm.

Ökad kunskap och erfarenhetsutbyte mellan berörda industrier som kan resultera i riskreducerande åtgärder och arbetsmetoder är kanske de absolut viktigaste åtgärderna för att minska risken för allvarliga explosionsincidenter. Det behövs även mer grundläggande kunskaper kring explosionsförloppen, t.ex. tryckuppbyggnadshastighet, för olika typer av metaller för att säkerställa att olika typer av skyddssystem verkligen dimensioneras på ett korrekt sätt. I dagsläget kan man inte förutsätta att så är fallet då standarderna för olika skyddssystem inte alltid är anpassade för metalldamm.

I rapporten ges också ett antal rekommendationer som utgör en grund för att minimera riskerna för att en dammexplosion skall inträffa.

1 Introduktion

1.1 Syfte och mål

Detta projekt är en förstudie med syfte att studera de risker för dammexplosion och eventuell brand som kan uppstå i olika tillverkningsprocesser där det bildas metalldamm. Målsättningen är att få en bättre bild av frekvens, orsak och verkan i samband med inträffade explosioner och att erhållna resultat kan nyttjas för att öka förståelsen för dessa risker ute i berörd industri. På basis av resultaten ges också möjlighet att definiera vilka framtida insatser som behövs för att höja kunskapsnivån ytterligare. Därmed kan riskerna minimeras, t.ex. genom framtida utbildningsinsatser, riktlinjer, standarder, etc.

1.2 Bakgrund och problembeskrivning

Ett antal dammexplosioner med allvarliga personskador och dödsfall inträffar årligen runt om i världen. Bristen på tillförlitlig statistik är dock ett problem för att bedöma omfattningen/antalet av inträffade incidenter samt konsekvenserna av dessa. I USA började man dock under 2000-talet att följa upp bränder/explosioner som involverat brännbart damm på grund av att man såg en ökning av incidenter och som ett resultat av detta har man nu en statistik som går tillbaka till 1980-talet.

Även i Sverige har vi haft flera dammexplosioner som medfört allvarliga personskador samt omfattande materiella skador. Tyvärr har det saknats en sammanställd statistik men enligt tidigare uppskattningar inom Arbetsmiljöverket rapporterades det in ca en dammexplosion varje månad. Man bedömer dock att det finns ett stort mörkertal och det finns uppskattningar att frekvensen kan vara minst en incident per vecka som har lett till eller skulle kunnat leda till en explosion (se kap 3).

Vad som tidigare noterats är att tillverkning och framförallt eldning av fastbränsle står för ca hälften av explosionerna i Sverige och här är det då oftast trädamm eller annat organisk damm som utgör problem. Den andra hälften står all övrig verksamhet för.

Ett antal metalldammexplosioner har inträffat relativt nyligen med mer eller mindre omfattande materiella skador och i några fall också personskador, vilket varit en orsak till att genomföra denna förstudie. Dessa har bl.a. inträffat i blästeranläggningar och anslutande dammuppsamlingssystem där det i flera fall lett till att personal har skadats, bl.a. hos Scania 2011 [7] och 2016 [8]. Explosioner har även inträffat 2013 hos ABB i Ludvika [9] och 2016 på Gestamp Hardtech [10]. Ytterligare information kring ovan nämnda incidenter och ytterligare exempel på inträffade incidenter ges i kap 4.1.

Internationellt har det under senare år inträffat flera mycket allvarliga metalldammexplosioner, både i USA men framförallt i Kina (se kap 3.3.3)

1.2.1 Kunskapsbrist kan vara en orsak

Vid ett flertal incidenter har en av grundorsakerna varit bristande kunskap, och detta gäller sannolikt i ännu högre grad när det gäller dammexplosioner med metalldamm.

Tvärtemot vad många tror är metaller i allra högsta grad brännbara och därför finns det risk för bl.a. dammexplosioner när metallerna finfördelas i olika processer såsom slipning och blästring.

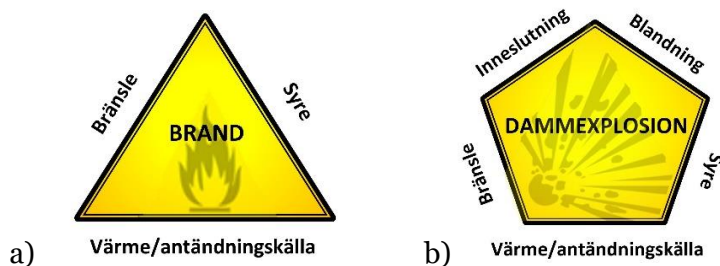
Det till synes ökade antalet explosioner i blästeranläggningar kan ha flera orsaker, bl.a. att användningen av blästermedel förändrats. Tidigare var sand och glas vanligast men på grund av hälsoriskerna har dessa bytts mot andra typer av metalliska blästermedel, t.ex. rostfritt stål, gjutjärn, aluminium. Detta gör att det inte bara är det bortblästrade materialet, t.ex. rester av färg eller annan ytbeläggning som kan skapa explosiv dammatmosfär utan även alstrandet av metalldamm från använt blästermedel.

Om blästermedel återanvänds för länge kan det innebära att en större andel finfraktion ansamlas och ackumuleras i stoftutsugningssystemet. Även om utsugssystemet i sig inte innehåller några inneboende tändkällor kan antändning ske genom att glöd och heta partiklar från blästerkammaren sugas in i ventilationssystemet som därigenom kan skapa en explosion i t.ex. filtret. I blästerkammaren finns ständigt tändkällor i form av heta partiklar (blästermedel). Här råder dock en okunskap och bl.a. detta har legat till grund för detta projekt med syfte att sprida den erfarenhet och kunskap som finns inom området.

1.3 Allmänt om dammexplosioner

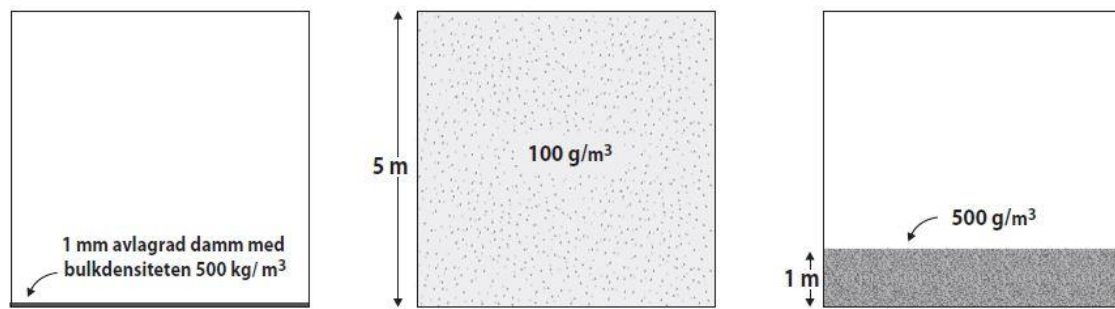
I många fall är en dammexplosion ett resultat av en liten brand, t.ex. i ett dammlager som hettats upp på grund av varmgång i någon utrustning och därmed når materialets självantändningstemperatur. För att brand skall uppstå behövs tre faktorer som vi normalt beskriver i form av en brandtriangel, bränsle, syre (vanligtvis luft) och värme (någon form av tändkälla) (se Figur 1a).

För att en dammexplosion skall kunna inträffa behövs dock ytterligare två faktorer, finfördelning av det brännbara materialet samt en inneslutning (se Figur 1b).



Figur 1. Förutsättningar för en brand respektive en dammexplosion

I detta fall räcker det alltså inte bara med ett brännbart material utan det måste vara finfördelat (partiklar $<500\text{ }\mu\text{m}$ som korn, eller flakes och fibrer) samt att det dispergeras i lagom blandning ihop med ett oxiderande ämne (oftast syret i luften) och att det är inneslutet så att det resulterar i en tryckstegring vid förbränningen. Det är också viktigt att inse att även ett tunt dammlager kan till följd av t.ex. en primärexplosion dispergeras och bilda en brännbar koncentration som i sin tur kan skapa en sekundärexplosion. Detta visas i Figur 2 där ett 1 mm dammlager kan bilda brännbar koncentration i hela eller delar av ett utrymme om det virvlas upp. Det är därför viktigt att undvika användning av tryckluft vid städning.

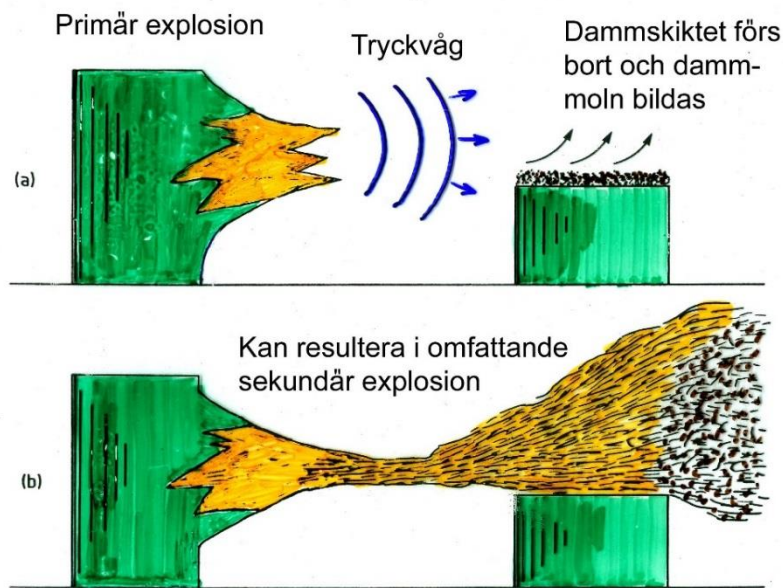


Figur 2. Figuren visar hur ett dammlager på 1 mm kan åstadkomma brännbara koncentrationer om det dispergeras, t.ex. på grund av en tryckvåg från en primärexplosion eller vid städning med tryckluft.

Tändkällan kan utgöras av t.ex. en öppen flamma, glöd, gnista eller het yta. Dammexplosioner inträffar således när finfördelade brännbara fasta ämnen bildar dammoln och antänds.

Man kan urskilja två typer av förlopp, primärexplosion samt en eller flera sekundärexplosioner. Den primära dammexplosionen inträffar nästan alltid inne i en inneslutning (kvarnar, filter, elevatorer) där det finns brännbart, finfördelat pulver som virvlar upp och antänds.

Sekundära explosioner kan t.ex. inträffa om den primära explosionen avlastas ut i ett utrymme med dammansamlingar. På grund av trycket från den primära explosionen virvlas dammet upp till ett dammoln som sedan antänds av flamman från den primära explosionen (se Figur 3). Sekundära explosioner kan även inträffa inne i processutrustning som är sammankopplad. Spridningen sker då genom rörledningar och liknande som kopplar samman olika delar. Till exempel kan en primär explosion som inträffar i ett filter resultera i sekundära explosioner uppströms i ventilationssystemet. I dessa sammanhang kan flera sekundärexplosioner inträffa i mycket snabb följd och det är dessa som oftast ger upphov till allvarliga materiella skador, många gånger med dödsfall som följd.



Figur 3. Princip för sekundär dammexplosion, från "Dust explosions in the process industries" [1]

För att minimera risken för sekundärexplosioner är en av de viktigaste åtgärderna att hålla en dammfri miljö i sina lokaler, d.v.s. regelmässig städning är mycket viktigt. Damm som bildas och inte omedelbart tas om hand i lokala punktutsug leder till att detta hamnar på golvet och andra ytor i lokalen. Ju mindre partiklarna är desto längre kan de transporteras och avsätta sig på ytor som är svåråtkomliga, t.ex. ovanpå balkar, kabelstegar och belysningsarmaturer, i ventilationstrummor etc. Eftersom fina partiklar är mer explosionsbenägna utgör också dessa en större risk.

Explosionen i sig kan karaktäriseras utifrån tryckvågens spridningshastighet. I normala fall är en dammexplosion att beteckna som en deflagration, d.v.s. utbredningshastigheten understiger ljudhastigheten. Vid spridning i slutna utrymmen, t.ex. i rör eller andra inneslutningar kan trycket öka vilket kan få tryckvågen att accelerera och övergå till en detonation, d.v.s. utbredningshastigheten överstiger ljudhastigheten, vilket i sin tur ökar skadeverkningarna dramatiskt.



Figur 4. Dammexplosion i filter. Tryckavlastningen har varit otillräcklig, vilket har resulterat i att filtret rämnat.

Flamutbredning från dammexplosioner sker på liknande sätt som för gasexplosioner. Snabb värmeutveckling ger i slutna utrymmen hög tryckstegringshastighet och utvecklar tryck upp emot 10 bar och ibland ännu högre. Värmeutveckling och flamutbredning kan ge allvarliga personskador och orsaka efterföljande bränder. Byggnader och större konstruktioner tål sällan höga tryck vilket gör att explosioner kan leda till omfattande skador (se Figur 4) och i vissa fall förödande konsekvenser. Det finns exempel på dammexplosioner där anläggningar helt jämnats med marken.

1.3.1 Metaldamm

Metaldamm liknar organiskt damm på så sätt att när det väl är antänt, kan oxidationsprocessen fortgå och utbreda sig i hela dammolnet. Däremot skiljer det sig åt när det gäller förbränningsprodukter. Organiska ämnen bildar gasformiga förbränningsprodukter i form av koldioxid och vatten, medan metall bildar motsvarande metalloxid i fast form.

Exempel på reaktioner och bildning av förbränningsprodukter för organiska ämnen respektive metaller visas nedan (aluminium visas som exempel).

Bränsle + syre $\longrightarrow$ Oxider + värme

Organiskt ämne $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{värme}$

Metalldamm $\text{Al} + 3/4\text{O}_2 \longrightarrow 1/2\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{värme}$

Som ett resultat av detta har organiska bränslen liknande förbränningsegenskaper, medan metaller kan delas upp i lågreaktiva (t.ex. järn, zink), medel- (kisel) respektive högreaktiva metaller (t.ex. aluminium, magnesium).

De flesta dammexplosioner med organiska ämnen utvecklas genom heterogena processer, d.v.s. de enskilda partiklarna hettas upp, börjar pyrolysera och bilda brännbara gaser som sedan förbränns i gasfasen. För metaller kan detta ske dels som en förgasningsprocess, men också genom en ytkemisk reaktion.

En annan skillnad är att den ideala blandningen ligger vid betydligt högre koncentrationer för metaller jämfört med organiska ämnen. Liksom för organiska ämnen har partikelstorlek och partikelform stor inverkan på metallernas explosionsegenskaper.

Medan de flesta metalldamm uppvisar låg till måttlig reaktivitet och kan behandlas jämförbart med organiskt damm, utgör de mest reaktiva metalldammen (t.ex. aluminium och magnesium) större utmaningar. Metaller brinner med betydligt högre temperatur vilket ger högre flamstrålning och kan för aluminium vara 6 gånger högre jämfört med t.ex. järndamm som i detta avseende är mer likt organiskt damm.

2 Definitioner kring dammkaraktärisering

För att kunna avgöra vilken risk ett specifikt damm kan utgöra ur explosionssynpunkt karaktäriseras dessa enligt fastställda standarder. I Sverige tillämpas ISO/IEC 80079-20-2 samt ett antal EN-standarder som beskriver provningsmetodikerna för olika utrustningar och resultaten utgör en grund för klassning av utrymmen och vilka skyddsåtgärder som eventuellt behöver vidtas, t.ex. krav på explosionsskyddad utrustning, utformning och dimensionering av explosionsavlastningar, mm.

Nedan redovisas de vanligaste egenskaperna som ingår i denna karaktärisering.

2.1 Explosionsområde

Explosionsområde avser ett koncentrationsintervall angett i g/m^3 inom vilket en dammexplosion kan ske och anges vid normalt tryck och temperatur. Undre och övre explosionsgränsen definierar explosionsområdet. Undre explosionsgränsen uttrycks som MEC (minimum explosive concentration). Det är normalt MEC som bestäms vid dammtester.

För organiskt damm som träddamm är ett typiskt värde för MEC ca 50 g/m^3 och övre explosionsgränsen vid några 1000 g/m^3 . En idealisk koncentration (ger kraftigast explosion, är lättast att antända) för organiskt damm ligger vid ca 500 g/m^3 .

För metaldamm varierar MEC utifrån exempelvis densitet, partikelform och partikelstorlek. Fint damm från lättmetaller kan ha ungefär samma värden som för träddamm, medan andra metaller som t.ex. järn kan ha betydligt högre värden (100-tals g/m^3).

2.2 Limiting oxygen concentration (LOC)

LOC anger den lägsta syrehalten i vilken en dammexplosion kan ske. Typiska värden ligger i området 5 – 15 % syre. För att minska syrehalten vid bestämning av LOC används inertgas, vanligtvis kväve. Även andra gaser som exempelvis argon och koldioxid, används. Observera att LOC är beroende av vilken inertgas man använder.

2.3 Maximalt explosionstryck (P_{max})

P_{max} anger maximalt explosionsövertryck vilket används för dimensionering av tryckhållfasta kärl, tryckavlastningssystem och explosionsundertryckande system, det senare även benämnt "suppression-system".

2.4 Reducerat explosionstryck (P_{red})

P_{red} anger det resulterande övertrycket vid en explosion i ett kärl efter tryckavlastningssystemet öppnat eller explosionsundertryckningssystemet aktiverats.

2.5 Maximal tryckstegringshastighet $(dp/dt)_{\max}$

Beräknad maximal tryckstegringshastighet används för bl.a. dimensionering av tryckavlastning och explosionsundertryckande system.

2.6 Tryckstegringskonstant (K_{st})

K_{st} -värdet anger den maximala tryckstegringshastigheten i en 1 m^3 standardtestbehållare. För att omsätta värden från en 20-liters-kammare används beräkningssambandet;

$$(dp/dt)_{\max} = K_{st}/(V)^{1/3}$$

V =volym på testkärlet (vanligtvis 20-liter ($0,020 \text{ m}^3$) alternativt 1 m^3 kärle)

Enheten på K_{st} är bar m/s.

K_{st} -värdet används för dimensionering av tryckavlastningssystem och explosionsundertryckande system.

2.7 Explosionsgrupper

Dammet kan delas upp i olika explosionsgrupper med utgångspunkt från K_{st} -värdet.

Dammexplosionsklass	K_{st} (bar m/s)
St 1	0 - 200
St 2	>200 - 300
St 3	>300

2.8 Minsta tändenergi MIE (minimum ignition energy)

MIE anger minsta tändenergi för en dammexplosion och anges i regel som ett intervall där det lägre värdet anger vid vilken högsta energi ingen antändning sker. Det högre värdet anger den lägsta energin vid vilken antändning sker minst 1 gång på 10 försök.

Testet kan göras med eller utan induktans. Utan induktans är gnistan kapacitiv vilket resulterar i en mycket kortvarig gnista (t.ex. motsvarande urladdning p.g.a statisk elektricitet) och detta ger normalt högre MIE-värden än med induktans. I normalfallet använder man därför MIE uppmätt med induktans.

2.9 Minsta tändtemperatur MIT_c för dammoln (minimum ignition temperature dust cloud)

MIT_c anger den lägsta temperaturen på en het yta som antänder ett dammoln. Här finns 2 olika testutrustningar; BAM-ugnen och Godbert-Greenwald (G-G-röret). BAM-ugnen

kan ibland ge lägre värden då den är horisontell och dammavlagringar kan bildas i ugnen, som kan ge gaser som antänds (fördröjd). Det är G-G-röret som anges som standardiserad utrustning enligt SS-EN ISO 80079-36:2016 [9].

2.10 Minsta tändtemperatur MIT_L för dammlager (minimum ignition temperature dust layer)

MIT_L anger den lägsta temperaturen på en het yta som leder till antändning av ett dammlager, vanligtvis 5 mm tjockt [9]. Ett tjockare dammlager ger lägre antändningstemperatur.

2.11 Volymresistivitet

Ett mått på om pulvret är isolerande eller inte. Enligt SEK 433 [32] delas pulver in i 3 grupper:

Låg resistivitet	$< 10^6 \Omega \text{ m}$
Medium	$10^6 \Omega \text{ m} - 10^{10} \Omega \text{ m}$
Hög	$> 10^{10} \Omega \text{ m}$

2.12 Dammgrupper

Dammgrupper definieras i SS-EN 60079-0.

Grupp IIIA Brännbara flingor, fibrer med nominell storlek $>0,5\text{mm}$, som kan bilda explosiva blandningar med luft, under atmosfäriska förhållanden

Grupp IIIB Brännbart damm med nominell storlek $<0,5\text{mm}$, som kan bilda explosiva blandningar med luft, under atmosfäriska förhållanden

Grupp IIIC Ledande brännbart damm (resistivitet $<10^3 \Omega \text{ m}$) som kan bilda explosiva blandningar med luft, under atmosfäriska förhållanden

2.13 Relaxationstid

Ger en uppfattning om hur lång tid det tar för ett laddat material eller ämne att avleda sin laddning, d.v.s. hur lång tid det tar att avleda cirka 2/3 av ursprunglig laddning. För vissa pulver rör det sig om timmar och till och med dygn. Enligt definition i SEK 433 [32].

3 Sammanställning av statistik

3.1 Statistik baserad på skaderapporter till Arbetsmiljöverket

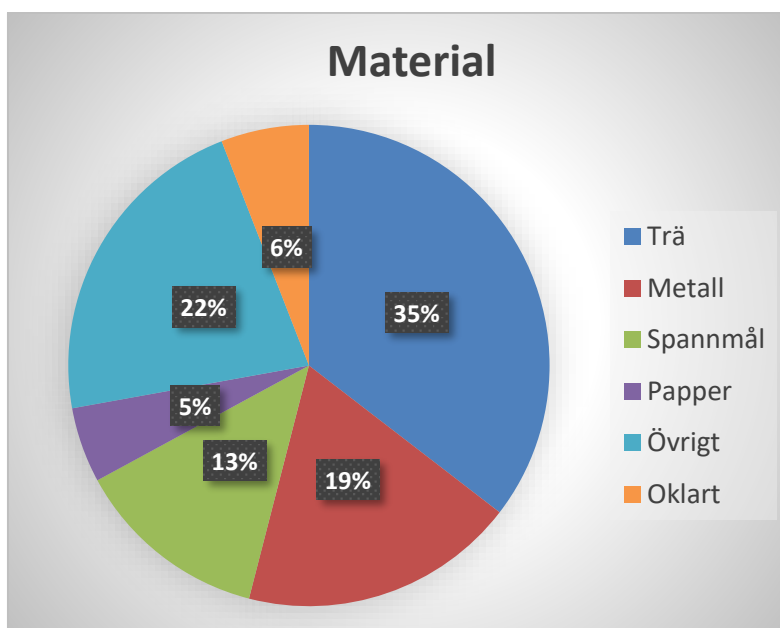
Olycksfall och tillbud på arbetsplatser ska anmälas till Arbetsmiljöverket. Sedan slutet av 2011 finns dessa anmälningar samlade i en nationell databas. Denna databas är av "semiofficiell" karaktär. Uppgifterna som lagras utgör så kallade allmänna handlingar och kan göras tillgänglig för vem som helst i form av offentliga handlingar. För att en allmän handling ska övergå till att bli en offentlig handling krävs sekretessgranskning hos myndigheten.

PS Group har tillsammans med Ing Leneva erhållit ett utdrag från Arbetsmiljöverkets nationella databas som innehåller händelser som på ett eller annat sätt är kopplade till dammalstrande processer med brännbart material.

Statistiken bygger således på inrapporterade incidenter till Arbetsmiljöverket relaterade till dammexplosioner och omfattar tidsperioden 2012-2017.

Totalt inrapporterades över 50 000 "händelser" (arbetsolyckor och allvarliga tillbud som kunde ha lett till personskada) på arbetsplatser under denna tidsperiod. Omkring 3000 av dem involverade bränder och explosioner. Av dessa involverade totalt 237 brännbart damm. Incidenterna fördelades över olika typer av damm, vilket framgår av Figur 5.

Som framgår av sammanställningen kan man grovt säga att 1 av 3 incidenter är kopplade till trädamdamm och 1 av 5 incidenter är kopplade till metalledamm.

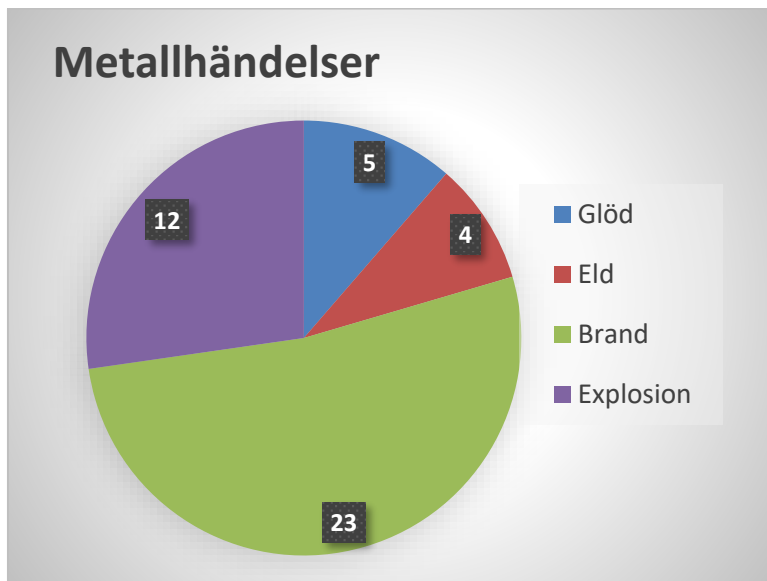


Figur 5. Typer av damm som varit involverade i de 237 rapporterade incidenterna till Arbetsmiljöverket som involverade "brännbart damm".

3.1.1 Metalledammhändelser

53 händelser från 2012 till mars 2017 har bedömts vara metalledammsincidenter. Dock finns en viss osäkerhet för 9 av dessa. Denna rapport baseras på en analys av de 44 händelserna som kan betraktas som säkra.

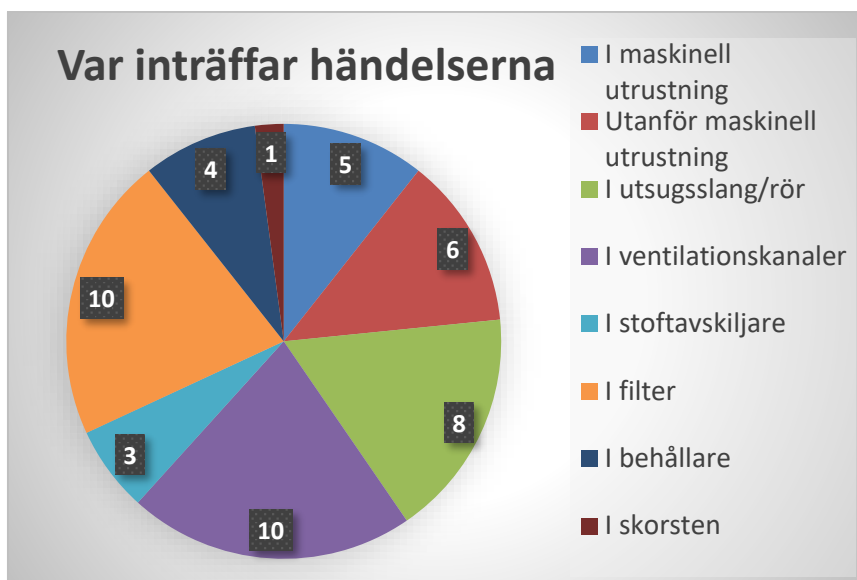
Händelserna har delats upp utifrån omfattning och förlopp. I vissa fall har det stannat vid en *glödbbrand* (5 st), i andra fall har en *eldslåga* (4st) observerats, i vissa fall har elden spridits och resulterat i *brand* (23 st) och till sist har några resulterat i en *explosion* (12 st), se Figur 6. Det bör noteras att i vissa fall har explosionen dessutom lett till en efterföljande brand.



Figur 6. Fördelning av antalet av de rapporterade händelsernas omfattning.

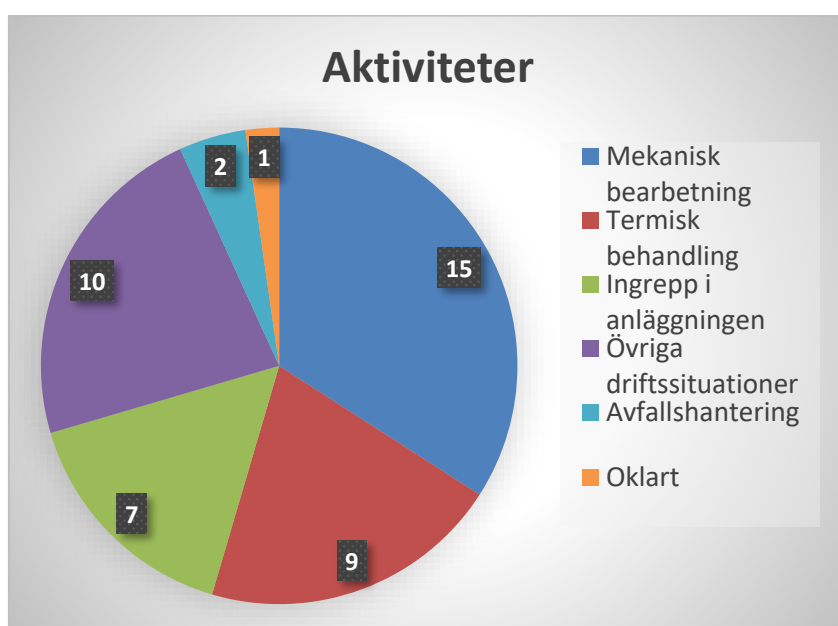
Bland händelserna har även angivits var i utrustningen de inträffat och detta redovisas i Figur 7. I tre fall av händelserna "utanför maskinell utrustning" har denna också spridit sig till annan utrustning, och den procentuella fördelningen i diagrammet är därför baserat på 47 händelser (istället för 44).

Det som kan konstateras är att 31 st (65 %) av händelserna var relaterade till dammavskiljningssystem (utsugsslang/rör, ventilationskanaler, stoftavskiljare, filter) vilket tydligt visar att dessa sammantaget är en avsevärd riskkälla i en anläggning.



Figur 7. Figuren visar antalet händelser relaterat till typ av utrustning som var involverad

Ur statistiken har ett antal olika typer av aktiviteter identifierats i samband med händelserna vilka redovisas i Figur 8. Dessa aktiviteter inkluderar "mekanisk bearbetning" (fräsning, gradning, slipning, svarvning, blästring), "termisk behandling" (svetsning, smältning, värmning, härdning, torkning), "ingrepp i anläggning" (rengöring, underhåll), "övriga driftssituationer" (tråddragning, avställning, stationär maskin, satsning, blästring, härdning), "avfallshantering", samt "oklart". Man kan också konstatera att den konsekvens som uppstår vid antändning av metalldamm synes vara något slumpartad. Exempelvis har slipning gett upphov till alla fyra angivna konsekvenser (glöd, eld, brand, explosion) redovisade i Figur 6.



Figur 8. Redovisning av antalet händelser relaterat till den typ av aktivitet som pågick i samband med att händelsen inträffade.

Man kan också konstatera att i 1 av 5 händelser så inträffade incidenten vid manuell hantering (exempelvis manuell tömning eller rengöring). Med tanke på att normal produktion generellt förekommer i betydligt större utsträckning än manuell hantering, så representerar incidenter vid manuella operationer en stor andel i relation till produktionstid.

Av de utvärderade metalledamphändelserna klassas 15 som explosioner. De flesta händelser har medfört mer eller mindre omfattande materiella skador medan endast ett fåtal har medfört personskador. Vid två tillfällen uppstod allvarliga personskador (brännskador).

Av de anmälningar som inkommer till Arbetsmiljöverket kan konstateras att anmälningarna oftast inte innehåller några detaljerade uppgifter om skador. Likaså framgår mycket sällan några mer specificerade orsaker till händelserna. Möjligen kan tändkälla utläsas direkt eller indirekt.

3.2 Statistik baserad på insatsrapportering till MSB

MSB har en databas där man samlar alla insatsrapporter från landets räddningstjänster. Denna innehåller totalt ca 25 000 "insatser avseende brand" per år och räddningstjänsterna använder en rapporteringsmall som innehåller ett stort antal fördefinierade val kombinerat med möjlighet att ange fritext. I huvuddelen av rapporten anges vad det är för typ av händelse insatsen avser och vidare anger man bl.a. typ av verksamhet där händelsen utlöstes, till exempel "Metall- eller maskinindustri". Man anger även om det är "Brand i Byggnad" eller "Brand ej i Byggnad". Vidare anges bl.a. brandorsak, startutrymme, startföremål och slutligen i ett fritextfält kan man beskriva vad som hänt m.m.

Sökkriterier för detta projekt var följande:

Objekttyp: *Metall-/maskinindustri*

Brandorsak: *Explosion*

På grund av ett nytt inrapporteringssystem till IDA-databasen har MSB inte haft möjlighet att inom projektets ram sammanställa statistik för 2016 och framåt varför statistiken avser åren 2006-2015. En preliminär redovisning av statistik för 2016-2018 erhöles dock i ett sent skede av projektet vilken redovisas separat nedan.

Totalt fanns 36 incidenter under 2006-2015 som uppfyllde ovanstående sökkriterier och en summering av dessa visas i tabellform i Figur 9. "Brand i byggnad" omfattade 35 bränder och således var det bara en incident som klassats som "Brand ej i byggnad" (Eskilstuna 2010-02-04 som var en explosion i ett ställverk). Av de övriga incidenterna är det bara i ett fall som preciserat orsaken till "dammexplosion" (Södertälje 2011-12-02), i övriga fall anges bara att det inträffat en explosion av något slag.

Datum	Kommun	Startutrymme	Precisera startutrymme	Startföremål	Precisera startföremål
2006-01-26	Landskrona	Annat		Annat	Shaktugn
2006-02-27	Skövde	Annat	motorprovrum	Annat	provmotor
2006-03-10	Eskilstuna	Maskin		Maskin	
2006-09-01	Oxelösund	Annat		Annat	Flytande stål
2006-09-24	Skellefteå	Annat	Ställverk	Annat	Ställverk
2006-12-01	Kristianstad	Okänt	Kemikalieförråd	Okänt	
2007-01-18	Luleå	Annat		Annat	MANÖVERKUR
2007-04-02	Hallstahammar	Maskin		Maskin	
2007-05-09	Mjölby	Rökkanal		Rökkanal	Filter
2008-05-28	Gislaved	Maskin		Maskin	
2008-11-26	Västervik	Maskin		Maskin	
2009-08-12	Ludvika	Andra elinstallationer	provrum	Andra elinstallationer	kondensator
2010-02-04	Eskilstuna	NULL	NULL	NULL	NULL
2010-04-28	Hudiksvall	Maskin		Maskin	
2010-06-30	Boxholm	Fläkt/annan vent.anläggning		Fläkt/annan vent.anläggning	
2010-12-16	Skellefteå	Byggnadens utsida, Annat	Magasin för slig	Byggnadens utsida, Annat	utsida vägg
2011-03-05	Smedjebacken	Byggnadens utsida		Byggnadens utsida	
2011-06-09	Halmstad	Annat		Annat	Arbetsprocess
2011-10-25	Skellefteå	Brandfarlig vätska	Cyklon	Brandfarlig vätska	
2011-10-27	Hagfors	Annat		Annat	Induktionsugn för stålsmältning
2011-12-02	Södertälje	Andra elinstallationer	Silorum för lagring av metallstoft/avfall	Andra elinstallationer	
2011-12-12	Hagfors	Annat		Annat	Luft-hydraulslangar
2012-02-23	Smedjebacken	Uppvärmningsanordning		Uppvärmningsanordning	
2012-02-25	Älmhult	Annat	Smältverk	Annat	smält-ugn
2012-12-04	Sundsvall	Annat	Ugn	Annat	Ugn
2013-05-16	Landskrona	Annat		Annat	Schaktugnen
2013-07-25	Hultsfred	Uppvärmningsanordning	smältugn	Uppvärmningsanordning	
2014-01-23	Tierp	Annat	Järnbruk, flytande stål	Annat	Ugnshall
2014-03-04	Hultsfred	Maskin		Maskin	
2014-05-13	Eskilstuna	Maskin		Maskin	
2014-09-11	Trollhättan	Fläkt/annan vent.anläggning	Fläktrum	Fläkt/annan vent.anläggning	
2014-10-26	Hagfors	Annat	Smältugn	Annat	Smältugn
2015-03-16	Oskarshamn	Annat		Annat	kompressor
2015-07-01	Landskrona	Maskin, Brandfarlig gas		Maskin, Brandfarlig gas	
2015-09-30	Luleå	Fläkt/annan vent.anläggning		Fläkt/annan vent.anläggning	
2015-11-10	Hagfors	Papper/kartong		Papper/kartong	

Figur 9. En del av den information som redovisats utifrån genomförd sökning i MSB:s IDA-databas under 2006-2015 där angiven brandorsak uppgetts vara "explosion".

Vid en genomgång av dessa incidenter kan man notera att en stor andel av dessa (16 st) är kopplade till någon form av smältugn eller hantering av smältor och i 7 fall verkar det varit vatten/is som kommit i kontakt med smältan och orsakat explosionen. I tre av incidenterna anges startutrymmet vara någon form av fläkt-/ventilationsanläggning. Endast två av de incidenter som redovisas som "fallstudier" i kapitel 4.1 finns med (2011 i Södertälje och 2014 i Trollhättan). Utöver dessa kan man utifrån redovisad beskrivning i fritextfält se att en explosion inträffat i en kvarn (Hallstahammar 2007), brand/explosion i en gjutmaskin för magnesium (Hultsfred 2013) och explosion i oljerummet till en slipmaskin (Eskilstuna 2014).

Denna statistik pekar på att antalet inträffade dammexplosioner skulle vara mycket få men sannolikt finns det flera brister i rapporteringsunderlaget, exempelvis om en incident inträffat som ej medfört larm till räddningstjänsten, eller att räddningstjänsten klassat incidenten som en brand istället för en explosion, etc. Detta kan leda till att det finns ett visst mörkertal i statistiken.

Eftersom det är svårt att utröna om händelserna i MSB statistiken gäller metalldammexplosioner är det svårt att dra några slutsatser huruvida inrapportering till Arbetsmiljöverket saknas utöver de två incidenter som finns med i båda databaserna.

Omvänt; slutsatsen att det skulle finnas ett stort mörkertal i MSB:s statistik över metalldammhändelser går inte heller att dra, eftersom endast sådana bränder/incidenter som lett till räddningsinsats från kommunens räddningstjänst finns med.

En preliminär redovisning av åren 2016-2018 erhöles från MSB i januari 2019. Sökbegreppet var här "Dammexplosion" och totalt identifierades 23 incidenter. Av dessa var 6 incidenter relaterade till "Metall- eller maskinindustri" medan 13 incidenter var relaterade till "Trävaruindustri" eller "Annan industri" där det framgick att trämaterial var involverat i händelsen.

Slutsatsen man ändå kan dra är att MSB:s statistik har varit av begränsat värde i detta projekt, då endast ett fåtal händelser har rapporterats in, och för dessa är informationen mycket knapphändig. Möjligtvis ger den nya händelserapporteringen från MSB från och med 2016 en något bättre träffbild men här krävs ytterligare framtida analyser för att avgöra detta.

3.3 Internationell statistik

Även om vi i Sverige tycks ha varit förskonade från allvarliga explosioner med dödlig utgång så är det viktigt att inte ledas in i en falsk trygghet. Ser man till statistik och specifika utredningar av olyckor utomlands så är det uppenbart att explosioner kan inträffa, även i industrier där man tror sig ha bra kontroll eller där man kanske inte insett vilka risker man har i sin tillverkningsprocess. Nedan ges en summering av sammanställd statistik, framförallt avseende Nordamerika, men även till viss del relaterat till andra länder.

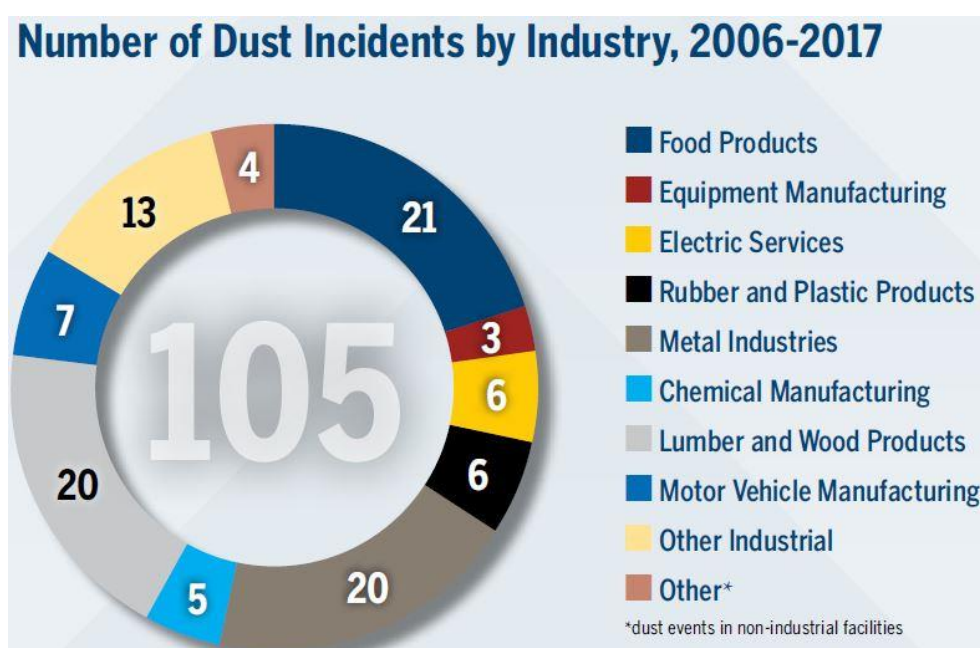
3.3.1 Statistik från USA

I USA finns en relativt bra uppföljning av bränder/explosioner relaterat till brännbart damm genom CSB (U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board). Incidenter relaterade till damm är ett prioriterat område inom CSB:s verksamhet och därför genomfördes en sammanställning av inträffade incidenter inom projektet "Combustible Dust Hazard Study" som publicerades 2006 [14]. Studien initierades till en följd av tre katastrofala olyckor relaterade till dammexplosioner 2003 i USA där totalt 14 personer omkom. I projektet genomfördes en noggrann olycksutredning för dessa tre olyckor, varav en inträffade i en metallindustri (Huntington, Indiana) och en summering av denna utredningen redovisas i kapitel 4.2. Utöver detta så gjorde man också en sammanställning av inträffade bränder och explosioner relaterade till brännbart damm för tidsperioden 1980-2005.

Denna sammanställning innefattar totalt 281 identifierade incidenter och resulterade i totalt 119 dödade arbetstagare och 718 skadade. Av detta kan man notera att i genomsnitt ledde detta till ca 0,4 dödsfall per rapporterad incident. Studerar man sammanställningen så kan man konstatera att det sannolikt finns ett avsevärt mörkertal vad gäller rapporterade incidenter, speciellt under 1980-talet då antalet incidenter varierar mellan 0-10 st årligen för att därefter öka till mer än 20 incidenter årligen under början av 2000-talet med som mest 28 incidenter identifierade under 2004. Av de 281 incidenterna var det 56 st som involverade "bränslet" metalldamm, d.v.s. motsvarande 20 % av incidenterna. Antalet omkomna i dessa metalldammsolyckor var 33 st, d.v.s. ca 28 % av det totala antalet omkomna under tidsperioden. Sett till antalet incidenter relaterade till metalldamm, så ledde detta i genomsnitt till ca 0,6 dödsfall per rapporterad incident.

Under efterföljande år inträffar ytterligare flera allvarliga olyckor relaterade till brännbart damm vilket ledde till ett fortsatt arbete inom CSB med specifika olycksutredningar och uppföljning av statistik. Två incidenter som medfört att CSB genomfört specifika olycksutredningar involverade metalledamm och dessa har publicerats i separata rapporter (New Cumberland, West Virginia, 2010 [33] och Gallatin, Tennessee, 2011 [3]), se kap 4.2.

Under 2018 har CSB publicerat ännu en ny sammanställning av statistik som täcker åren 2006-2017 vilken omfattar totalt 105 incidenter (se Figur 10) som resulterade i totalt 59 omkomna och 303 skadade personer, d.v.s. i snitt leder detta till drygt 0,5 dödsfall per rapporterad incident [34]. Även här har man gjort en kategorisering av incidenterna, inte direkt relaterat till typ av damm utan snarare relaterat till typ av industri.



Figur 10. Summering av statistik för bränder och explosioner relaterat till brännbart damm i USA under perioden 2006-2017 [34].

När det gäller incidenter relaterade till "Metal Industries" så omfattar detta 20 st incidenter och räknar man dessutom in "Motor Vehicle Manufacturing", som sannolikt också är relaterade till bearbetning av metaller så tillkommer ytterligare 7 incidenter, d.v.s. total 27 st vilket motsvarar 26 % av samtliga incidenter. Antal omkomna i dessa olyckor var 9 personer vilket motsvarar 15 % av totalt antal omkomna. Sett till incidenter som involverade metalledamm ledde detta till i genomsnitt 0,3 dödsfall per rapporterad incident.

3.3.2 Incidentrapportering på ett internationellt plan

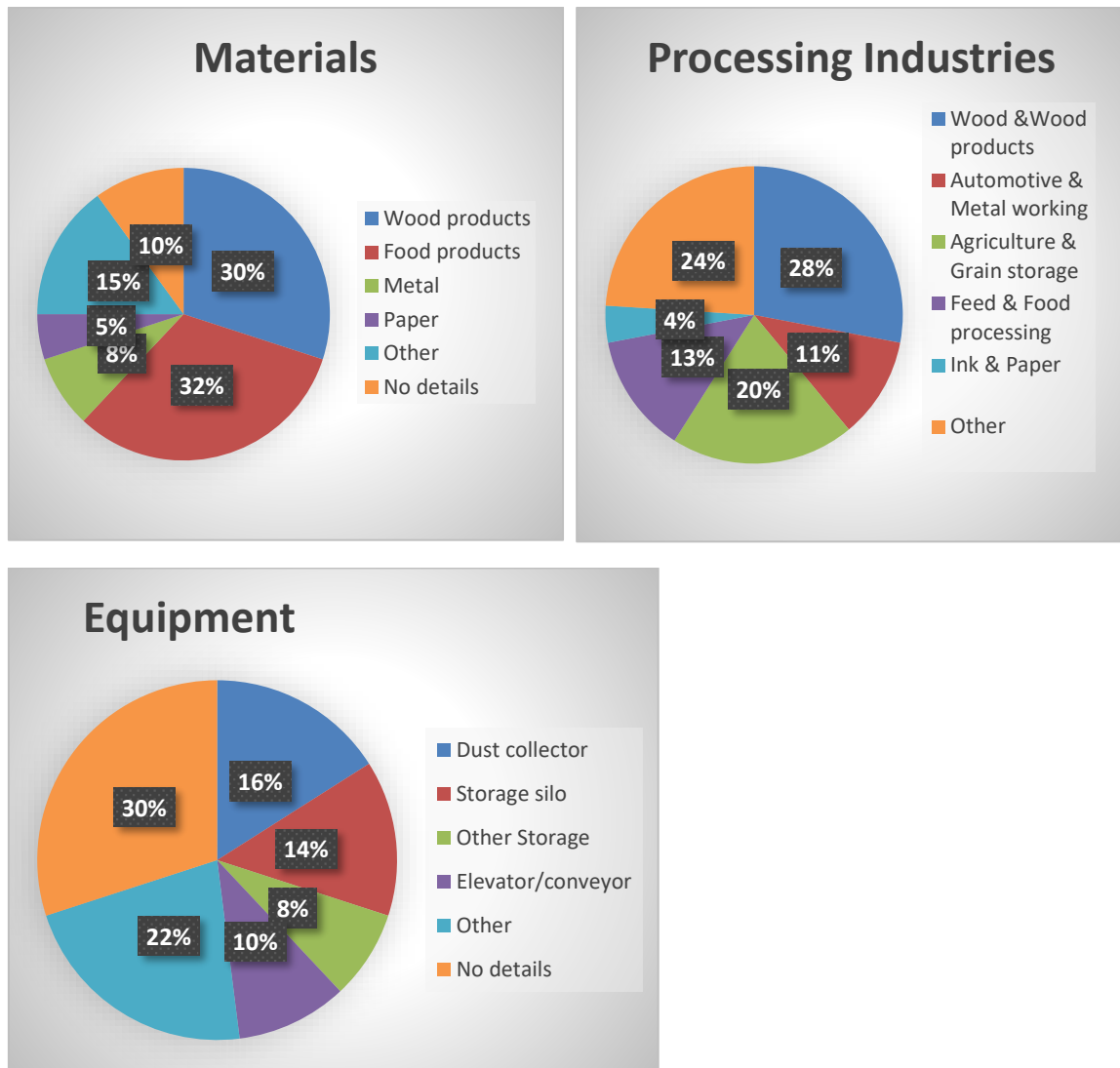
På senare år publiceras även ett nyhetsbrev relaterat till bränder och explosioner som kan hänföras till brännbart damm. Arbetet initierades av Chris Cloney, som ett resultat av hans doktorandstudier kring modellering av damm och hybridexplosioner vid Dalhousie University i Nova Scotia, Kanada. I sitt doktorsarbete kunde han lista källor

som totalt rapporterat över 2000 incidenter med ca 4000 skadade och 1000 omkomna över hela världen sedan början av 1900-talet. Han insåg också att det var mycket svårt att identifiera denna typ av incidenter då det kom från många olika källor. Svårigheten att hitta ett samlat material, kombinerat med att medvetenheten om de risker som finns är mycket låg inom många sektorer, samt att mycket erfarenhet och lärdomar aldrig fick spridning, resulterade i att han startade en webb-plats och ett nyhetsbrev. Syftet var att bygga en plattform kring kunskap och erfarenheter relaterade till förebyggande arbete, skyddssystem samt forskning kring damm- och gasexplosioner och skapa en bas för utveckling av utbildningsmaterial för alla involverade i denna problematik med målet att kunna reducera antalet incidenter.

I detta arbete har han skapat en databas, "Combustible Dust Incident Database" som ligger på webbplatsen <https://dustsafetyscience.com/>. Här kan man även anmäla sig till ett nyhetsbrev som skickas ut på veckobasis och som sammanställer de brand/explosionsincidenter man lyckats identifiera globalt (se exempel i kap 4.2). Utifrån dessa incidenter har man även sammanställt information om antalet incidenter samt involverade typer av industrier/material samt i vilken typ av utrustning som branden/explosionen inträffade i.

En första summerande statistik har sammanställts för 2016 [35] och omfattar Nordamerika och där totalt 33 incidenter identifierats. Under 2017 [36] har insamlingen och sammanställningen av incidenter utökats och inkluderar nu även incidenter på det internationella planet och innefattar totalt 222 incidenter relaterat till brännbart damm/material varav 68 st var klassade som explosion. För 2018 har även en halvårsrapport redovisats [37] vilken även denna inkluderar både Nordamerika och internationella incidenter, totalt 115 st, varav 24 klassats som explosioner. I rapporten finns även redovisat ett antal incidenter med lite mer fakta kring den aktuella händelsen och här redovisas två incidenter relaterade till metallbrand/explosion.

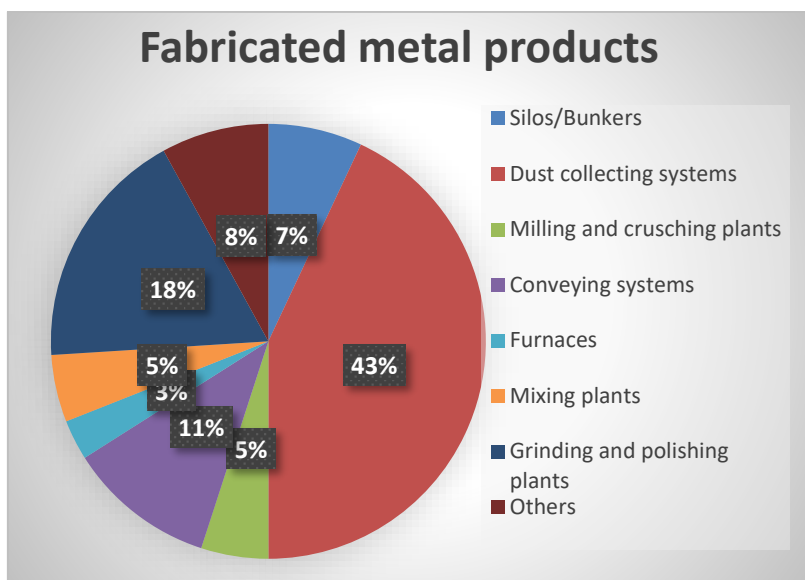
I Figur 11 redovisas sammanställningen av incidenterna för 2017 avseende typ av brännbart material, typ av industri samt typ av processutrustning. Man kan här notera att metall som material är involverade i ca 8 % av incidenterna och bil-/metallindustri representerar 11 %. När det gäller involverad utrustning är det tydligt att ventilation/stoftavskiljare med 16 % utgör den största gruppen av specifika utrustningar som redovisas.



Figur 11. Statistik för 2017 från "Combustible Dust Incident Report" [36] vilket även involverar incidenter på internationell nivå.

3.3.3 Statistik från övriga länder

Yuan et al. [29] undersökte mer än 2000 dammexplosionsolyckor som inträffade över hela världen mellan 1785 och 2012. Data för brännbart damm som leder till dammexplosioner i både Kina och USA samlades också in och kategoriserades. Olika användningskällor, typer av verksamheter och den kritiska utrustningen i sådana företag undersöktes också. Bland annat undersöktes metallindustrin. Figur 12 visar fördelningen av antalet incidenter för de olika processerna.



Figur 12. Fördelning av metaldammexplosioner utifrån process och utrustning inom tillverkningsindustrin för metallprodukter [29].

Nedan ges några exempel på statistik redovisad i ett antal andra länder.

I Tyskland indikerar tillgänglig statistisk att ca 13 % av dammexplosionerna under tidsperioden 1965-1980 involverade metaldamm [12]. Statistiken visar också att den genomsnittliga andelen skadade och omkomna var relativt hög för dammexplosioner som involverade metaldamm. Omkring 65 % av metaldammexplosionerna inträffade i dammutslagnings- och slipmaskiner. En betydande andel, ca 15 %, inträffade också i kvarnar, blandare och siktmaskiner. Av dessa initierades 60 % av mekaniska gnistor. Enligt en senare studie av Jeske och Beck [45], uppstod 44 % av metaldammexplosionerna i dammuppsamlingsenheter där den dominerande tändorsaken var mekanisk friktion eller gnistor (ca hälften av de undersökta fallen). Sex aluminiumdammexplosioner inträffade mellan 1981 och 1985, vilket resulterade i 6 skadade men dock inga dödsfall.

I Storbritannien involverade totalt 18 % av explosionerna metaldamm under perioden 1979-1988 [13].

I Japan involverade 24 % av explosionerna metaldamm och orsakade 27 % av personskadorna och 39 % av dödsfallen för 1952-1995 period [15].

När det gäller Kina har vi inte funnit någon sammanställd statistik kring dammexplosioner, däremot finns det uppgifter om inträffade incidenter, i vissa fall med mycket allvarliga konsekvenser och ett stort antal skadade och döda.

När det gäller metaldamm rapporterar Yan och Yu (2012) [41] om sju explosioner med metaldamm i Kina under perioden 2009-2011, fem av dem som involverar aluminium, med totalt 11 dödsfall och 54 skadade.

Även andra metalledammsexplosioner i Kina har rapporterats av andra källor;

2012: Wenzhou, Zhejiang, polering

2012: Shenzhen, Guangdong, metallprodukter putsning

2014: Kunshan Zhongong Metal Production Co, aluminiumdamm, 146 döda, 114 skadade [30, 38]

2016: Shenzhen, Guangdong, poleringsanläggning för cykeltillbehör

2016: Jiangmen, Guangdong, tillverkningsanläggning för köksredskap

De flesta händelserna har skett i samband med polering av aluminiumdelar.

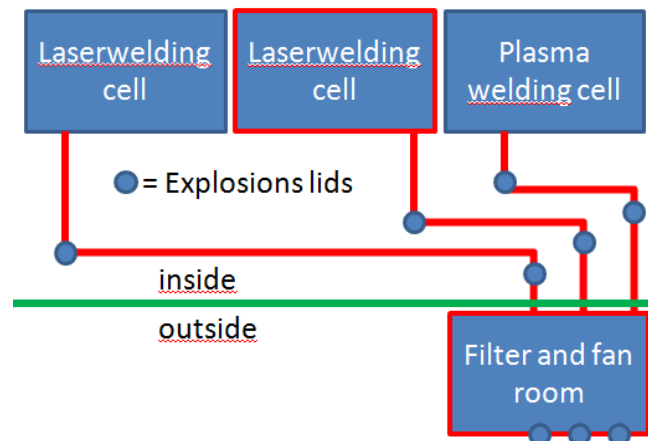
4 Exempel på inträffade incidenter

4.1 Incidenter i Sverige

Ett antal metaldammexplosioner har även inträffat i Sverige. Dessa har bl.a. inträffat i olika typer av blästeranläggningar och anslutande dammuppsamlingssystem där det i flera fall lett till att personal har skadats, och i kapitel 4.1.1 -4.1.4 ges några exempel.

4.1.1 Dammexplosion vid lasersvetsning i titan

Händelserna inträffade på ett tillverkningsföretag inom flygindustrin. En mängd olika material används, inklusive titan, titanlegeringar och nickellegeringar. De använder lasersvetsning i titan och nickellegeringar vilket ger ett mycket fint damm som en restprodukt.



Figur 13. Principiell skiss av anläggningens utformning med tre svetsutrustningar placerade inomhus och filteranläggningen placerad utomhus. Blå punkter markerar explosionsavlastningar

Lasersvetsningen utförs i en inert miljö (argon), titandammet är ooxiderat och extremt brännbart. Ventilationssystemet konstruerades och klassificerades enligt ATEX-föreskrifterna.

Ett antal incidenter har rapporterats från företaget under åren. Några av dem presenteras enligt följande.

4.1.1.1 Brand vid rengöring av ventilationskanaler feb 2013.

Rengöring och kontroll av ventilationskanalerna är oerhört viktigt för att förhindra att farliga mängder av titandamm ackumuleras. Detta var också grunden till den inträffade incidenten som redovisas nedan.

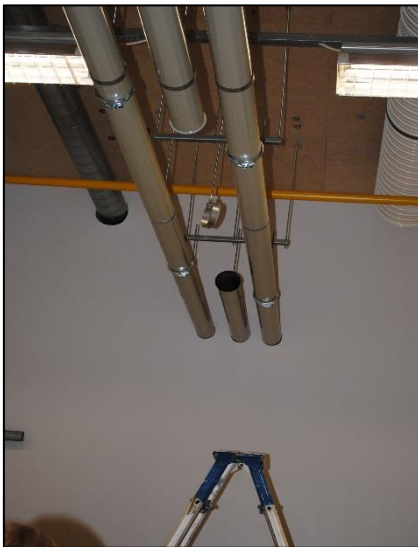
Vid kontroll och rengöring av ventilationskanalen monterades aktuella rörsektioner ned och en lätt fuktad trasa drogs genom kanalen. Avlägsnat damm uppsamlades i ett plåtfat, se foton i Figur 14.

När titandammet föll ner i tunnan skedde förmodligen en elektrostatisk urladdning som antände stoftet, vilket resulterade i att det började brinna i ena ärmen på personen närmast tunnan.

Lärdomar och åtgärder

Personlig skyddsutrustning användes inte i den utsträckning som angetts i instruktionerna för arbetet.

Som ett resultat infördes nya och mer omfattande rutiner avseende procedurer och skyddsutrustning. Rengöringsutrustningen förbättrades.



Figur 14. Rengöring av ventilationskanal som orsakade en antändning.

4.1.1.2 Brand i filter 2014-01-29

Titandamm uppsamlades i ett filter. Filterkassetterna byttes ut månadsvis. En brand inträffade i samband med filterbytet.

Gällande säkerhetsbestämmelser följdes. Brandvakt med brandsläckare var närvarande under arbetet. Brandlarm och första hjälpen fungerade enligt nödåtgärdsplanen.

Operatören fick första gradens brännskada på ena kinden, se foton i Figur 15.

För att minimera ackumulerad dammängd i filtret förkortades bytesintervallen från månadsvis till veckovis. Vidare skärptes rutiner avseende procedurer och skyddsutrustning.



Figur 15. Foton som visar filterskåpen utvändigt (överst), efter incidenten (mellan) samt brännskada på operatören.

4.1.1.3 Brand i filterskåp 2014-05-15

Operatören förberedde sig för att starta 1:a svetsningen i lasercellen.

Processventilationen hade varit avstängd i ungefär 12 timmar och var förmodligen fylld med argon (inert).

När operatören startade processen och ventilationssystemet fylldes med normal luftatmosfär hörde han ett obekant ljud. Han förstod dock inte att någonting hade inträffat i ventilationskanalen.

En brand i filterkabinettet indikerades med automatiskt brandlarm. Man bedömde att branden hade startat i filterskåpet eftersom det var rent runt tryckavlastningsöppningarna på röret, se foton i Figur 16. En sannolik orsak till elden kan vara att syre kommer in i systemet och ooxiderat titan i filtret antänds spontant.



Figur 16. Foton som visar filterkabinettet där tryckavlastningar fungerade och öppnade som de skulle. Även en tryckavlastning i rörsystemet öppnade.

Åtgärder

Enligt svensk lag måste en riskbedömning genomföras innan man kan starta om. Detta gjordes samma dag.

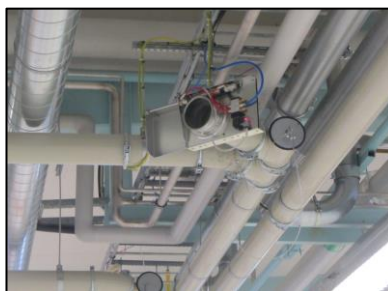
För att säkerställa en inert miljö infördes kontinuerlig övervakning av syrehalten i processventilationen och processen förreglades så att uppstart endast var möjlig vid inert miljö i ventilationssystemet.

4.1.1.4 Brand i filterhus 2014-09-11

Ytterligare en brand inträffade i filterhuset på grund av att damm ackumulerats i ventilationskanaler och i filtret. Filterrummet var låst, endast tillgängligt för brandmän och underhållspersonal.

På grund av det låga luftflödet i systemet (ca 2 m/s) uppstod ett problem med dammavlagringar inne i rören. Därför installerades en ventil för att öka lufthastigheten i systemet till ca. 20 m/s mellan varje svetscykel och den inerta miljön ersattes med luft.

För att eliminera brand- och explosionsrisken avlägsnades filtret, så att titandamm blåses direkt till omgivningen, se foton i Figur 17.



Figur 17 Foton från ytterligare en incident, och där man sedan installerade en ventil i systemet för att öka lufthastigheten. Man demonterade dessutom filterskåpet och evakuerade ventilationsluften ut i det fria. (Nedre foton visar filterrum med respektive utan filterskåp).

4.1.1.5 Explosioner fortsatte att inträffa

Även om filtret avlägsnades och mer omfattande förfaranden infördes, inträffade ändå ytterligare bränder/explosioner med titanstoft. Dock har man med olika förfaranden för procedurer och användning av skyddsutrustning förhindrat personskador vid dessa tillfällen. Citaten nedan är hämtade från olycksrapporter inskickade till Arbetsmiljöverket.

2016/12/30; "Vid rengöring av ventilationssystemet och byte av slang tändes en liten mängd ooxiderat titandamm i svetsrummet. Under rengöringen finns ingen personal närvarande. Tryckavlastningar i ventilationssystemet öppnade som avsett. Ingen skada på utrustningen i allmänhet. "

2017-02-27 "Vid periodisk dammsugning/rengöring av ventilationssystemet från svetsning av titan i en inert atmosfär antändes oxiderat titandamm i en sugslang. Några tryckavlastningsöppningar öppnade som avsett och utsugsslangen skadades av värmen. Ingen person var i svetscellen under dammsugning i enlighet med etablerade säkerhetsförfaranden. Uppföljning och riskbedömning genomfördes innan produktionen återupptogs. Ytterligare åtgärder har vidtagits med jordning och flexibel slangförkortning. "

2017-03-17 "Vid regelbunden dammsugning/rengöring av ventilationssystemet från robot svetsstoft antänds titandamm?? i cell 10. Dammsugning är planerad till 06:00 varje måndag. Robotsvetsning utförs i en inert miljö, varför ooxiderat titandamm finns i ventilationskanalen, som måste rengöras regelbundet för att förhindra uppbyggnad av farliga dammlager. Tryckavlastningsventil öppnades som avsett och ingen person befann sig i svetscellen under dammsugning i enlighet med etablerade säkerhetsförfaranden. Uppföljning och riskbedömning genomfördes innan produktionen återupptogs. "

4.1.1.6 Ändringar inför planerad produktionsökning

Bolaget planerar för framtida expansion. Idag finns det begränsningar på grund av utsläpp av titandamm till omgivningen. Därför planeras att installera ett recirkulerande ventilationssystem, så att hela processen kommer att vara i en inert miljö. Filterkammaren ska vara hermetiskt förseglad när processen stoppas. Särskilda procedurer planeras vid filterbyte.

4.1.2 Dammexplosioner vid kulpeening

4.1.2.1 Händelser

På morgonen fredagen 2011-12-02 uppstod en explosion i ett filter i en fordonsindustri.

Filtret betjänade en kulpeeningsmaskin för transmissionsdetaljer. Materialet som används för kulpeening är små stålklipp och processen används för att förbättra den bearbetade metallens mekaniska ytegenskaper. Vid blästring sönderdelas stålklippen till ett fint metallstoft som samlas i filtret i filterhuset.

Vid händelsen startade en operatör processen från en manöverpanel i filterrummet, på kort avstånd från kulblästern. Maskinen och filtret startades upp efter periodiskt underhåll och rengöring.

När operatören var klar med arbetet, tryckte han på startknappen. Ingenting hände så han tryckte på knappen igen och nu startade utrustningen.

Inne i filterrummet uppstår en dammexplosion direkt efter starten.

Explosionen var så kraftfull att tre servicedörrar med gångjärn till filterhuset pressades ut. Tryckavlastningen som var försedd med en flam- och tryckdämpande anordning, en s.k. Q-box, som dock inte öppnade, se Figur 18. Det slog eldsflammar i filterrummet och svart rök började snabbt bildas. Operatören kunde på egen hand ta sig ut ur filterrummet.

Operatören blev allvarligt skadad vid explosionen. Han fick allvarliga brännskador på armar, huvud, händer och fötter och mindre skador på ögonen. Han fick också lungödem och blodförgiftning på grund av explosionen. Hans kollegor började ge första hjälpen till operatören, samtidigt som de började försöka släcka branden i rummet.

Den tekniska undersökningen visade att orsaken var att filtret hade varit igång utan filterstrumpor monterade under ca. två månader tidigare under samma år. Detta innebär att stoftavskiljningen också var ur funktion under denna period.

Den tekniska undersökningen visade också obalans i fläkten eftersom dammet fastnat på fläktbladen. Fläkten kan på grund av obalans ha slagit i kanten på höljet vilket lett till att gnistor eller heta ytor skapats. Å andra sidan var det inga tecken på att fläkten slagit i höljet. Det som också talar emot detta är att explosionen skedde direkt vid uppstart.

En annan teori är att det fanns dammavlagringar i filtret som kunde ha fungerat som tändkälla när processen startades. Antändningstester med det faktiska dammet visade att även då ingen antändning med flamma erhöles, bildades det glödande avlagringar i testutrustningen, som flammade upp i samband med att provet avslutats och dammet skrapats ner i behållaren.



Figur 18. Filter med Q-box och bortsprängda manluckor

En riskbedömning genomfördes för projektet, med fokus normal drift, medan service- och underhåll endast behandlades översiktligt. Det innebär att de olika hanteringsmomenten inte identifierades så att en bedömning av sannolikhet och konsekvenser kunde utföras. Exempelvis hade inte avvikelser som att operera filtret utan filterstrumpor identifierats som en risk, sannolikt för att ingen tänkt på att detta skulle kunna inträffa.

Anställda som deltog i arbetet hade inte informerats om alla risker som var förknippade med arbetet. De förstod därför inte riskerna med att man hade kört processen utan filterstrumpor.

Utrustningen hade funnits i två månader utan filterstrumpor installerade, vilket innebar att mycket damm hade ackumulerats i kanalerna i filterhuset och i fläkten.

Filtret var försett med tryckavlastning och flam- och tryckdämpare i form av Q-box, men denna öppnades inte. En fungerande tryckavlastning hade begränsat förloppet och skadeverkningarna betydligt.

Det finns inga tecken på att Q-boxen var felaktigt monterad eller uppgifter kring att dimensioneringen av filterhusets tryckhållfasthet hade överskattats vid dimensioneringen av tryckavlastningen. Däremot visade det sig efteråt att manluckornas infästning var den svaga punkten, något som inte hade tagits med i beräkningarna.

I maj 2016 inträffade ytterligare en dammexplosion på samma fabrik, även här i ett filter till en kulpeening blästeranläggning [8]. Efter ett underhållsstopp startas blästeranläggningen men efter knappt 1 minut från uppstarten slår det ut flammor från ett par öppningar på maskinen. Man upptäcker då att filtret, som står utomhus, brinner och att explosionsavlastningarna har öppnats. Ingen person skadades vid olyckan. Antändningskällan har inte kunnat fastställas.

4.1.3 Explosion i blästeranläggning

På morgonen den 25 april 2013 inträffade en allvarlig explosion i en blästermaskin i en mekanisk tillverkningsindustri där en operatör brändes svårt på armarna och ryggen. Blästermaskinen hade varit i drift i ca 10 månader, varav de senaste 6 månaderna på nuvarande plats, efter att ha flyttats från en annan anläggning.

Explosionen bröt upp manöverdörren till blästerkammaren, en servicelucka på toppen av blästern öppnades, och en lucka på det tillhörande filtret lossnade och flög in i väggen precis intill. Trycket var så högt att väggarna i blästerrummet flyttades ut ca 15 cm, se Figur 19.



Figur 19 Blästermaskinen där effekterna av explosionen syns på väggen till höger om maskinen.

Explosionen inträffade efter att operatören hällde använt blästermedel från en returbehållare tillbaka in i blästerkammaren. Vid explosionen uppehöll sig operatören under dammfiltret där luckan lossnade. Han upplevde explosionen som en "stor eldboll" och "mycket damm". Det började brinna i skjortan, och han drog av den på väg ut från lokalen.

Det har säkerställts att det är en dammexplosion och förmodligen har den primära explosionen inträffat i blästerkammaren.

I företagets olycksutredning framkom följande:

- Den direkta orsaken till incidenten var att operatören hällde använt blästermedel i blästerkammaren. Inne i blästerkammaren bildades en explosiv dammatmosfär som antändes då blästeranläggningen startades. Blästerkulor som slungas ut med hög hastighet kan orsaka både elektrostatiske urladdningar, mekaniska gnistor och glödhärdar.

- En bidragande omständighet kan vara att en lucka på vindsikten saknades, förmodligen på grund av att den inte återställdes efter att maskinen hade installerats på den nya platsen. Detta bidrog till att uppsamlingsbehållaren för rejekt fylldes med fint damm från blästerkammaren

- Det aktuella dammet testades i efterhand och resultaten framgår av Figur 20 nedan.

Explosionsdata

Max. explosion pressure: $P_{\max} = 5,0$ bar

Max. rate of pressure rise: $(dP/dt)_{\max} = 488$ bar/s

Product specific constant: $K_{St} = 132$ m·bar/s

MIE (minimum ignition energy): = 10-20 mJ

MIT_c (minimum ignition temperature, cloud): = 280 °C

MIT_l (minimum ignition temperature, layer): = 200 °C

Figur 20. Explosionsegenskaper hos metalledammet

-Antändningstemperaturen för det aktuella dammet är relativt låg och heta kroppar och glöd kan eventuellt antända dammet. Med en lägsta tändenergi på 10-20 mJ är vissa typer av elektrostatiske urladdningar tillräckligt kraftiga för att kunna antända en explosiv dammatmosfär.

-Explosionsegenskaperna för aktuellt blästerdamm ($P_{\max}$, K_{St}) bekräftar det relativt häftiga explosionsförloppet.

Slutsatsen från företagets olycksutredning var att utrustningen förmodligen hade varit i drift utan att luckan i vindsikten varit installerad sedan 6 månader tillbaka, vilket innebar att explosivt damm samlades i rejektbehållaren, istället för som avsett i dammfiltret. Luckan borde ha installerats innan man driftsatte systemet första gången men detta var inget som kontrollerades. Operatörer hade heller inte informerats om alla risker som var förknippade med arbetet. De förstod därför inte riskerna med att hålla tillbaka blästermedel i blästerkammaren.

4.1.4 Ytterligare exempel på händelser med begränsad information

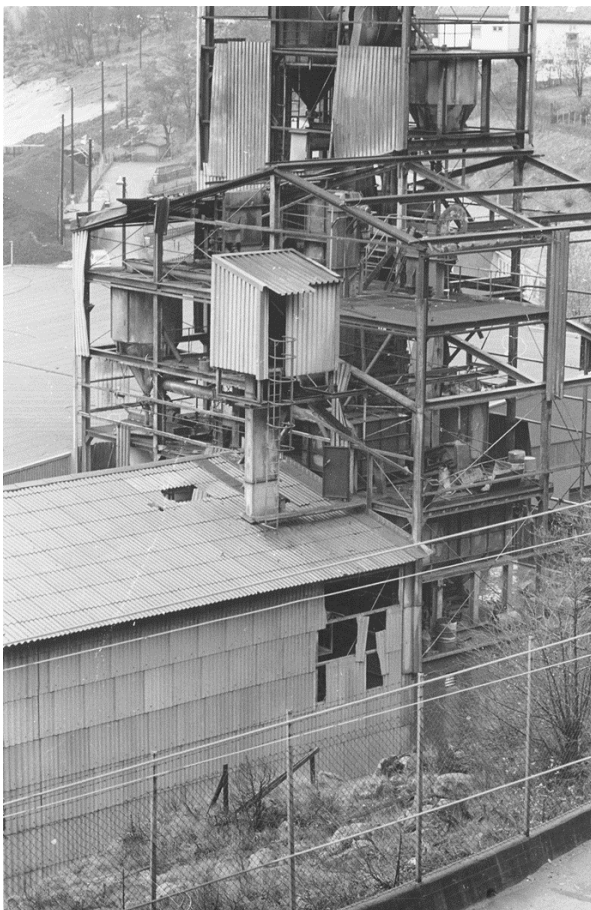
I januari 2016 inträffade en dammexplosion i en dammutsugningsanläggning i anslutning till en blästeranläggning på ett gjuteri [10]. Inga personer skadades och antändningskällan är fortfarande oklar.

Sommaren 2017 skedde en dammexplosion i en dammsugare på ett företag som arbetar med bl.a. metallbearbetning. Dammsugarens lock flög av vilket ledde till att damm virvlade upp och antändes utanför dammsugaren [30].

4.2 Exempel på incidenter med metalledamm utanför Sverige

4.2.1 Dammexplosion i kvarnanläggning 1972 Norge (Kisel)

Eckhoff [19] beskriver två dammexplosioner som inträffat inom stållegeringsindustrin i Norge. Den som var mest omfattande och med allvarliga konsekvenser inträffade i kvarndelen på en fabrik som hanterade kisel (Si), i Bremanger 1972, se Figur 21. Vid explosionen omkom 5 personer och 4 blev allvarligt skadade. Vid den här tidpunkten saknades regelverk för dammexplosioner i Norge. Vid explosionen observerades en intensiv och omfattande flamma som karaktäriserar lättmetaller. Detta är ett tecken på att flamtemperaturen varit mycket hög, vilket också var huvudorsaken till de allvarliga brännskador som de 9 anställda ådrog sig. Orsaken till explosionen var svetsning på en ventilationskanal, som sedan spreds vidare via ventilationssystemet som var i drift.



Figur 21. Totalt förstörd kvarndel på en stållegeringsanläggning [1]

4.2.2 Dammexplosion Gullaug, Norge 1973 (Aluminium)

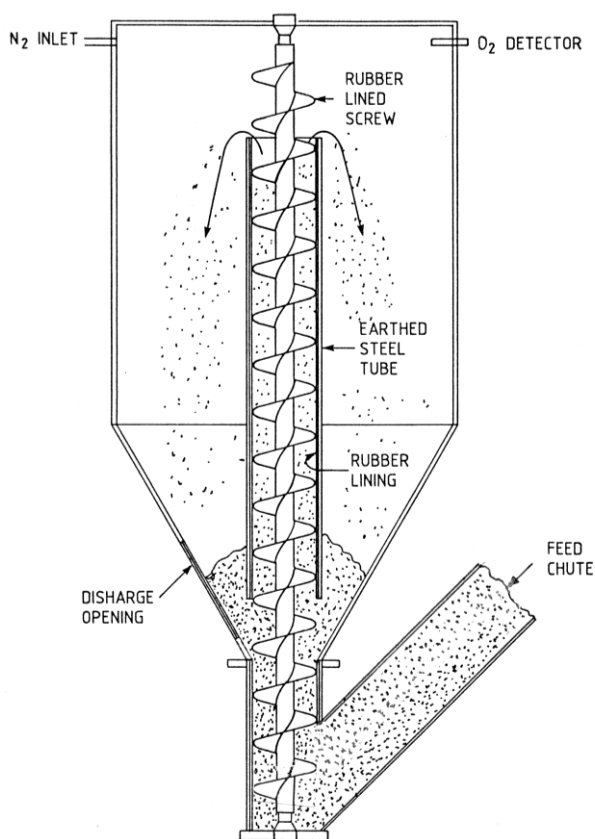
Följande år inträffade en explosion i en fabrik som tillverkade explosivämnen. Explosionen dödade fem personer och förstörde helt premix-byggnaden, se Figur 22, [1].

Det verkar ha börjat i en skruvtransportör, som var fodrad med gummi för att undvika mekaniska gnistor. Ett kväveinerteringssystem var på plats, men man kan ha underskattat syrekoncentration i blandningsutrustningen. Aluminium var i flingform med en tjocklek av 0,1 mikron och en minsta antändningsenergi av <1 mJ.



Figur 22. Totalt förstörd fabrik. [1]

Antändningsorsaken tros vara propagerande borsturladdning (en elektrostatisk urladdning som sker genom ett isolerande skikt, i detta fallet gummiinklädnaden av centrumskruven), se Figur 23.



Figur 23. Blandare med inertering [1]

4.2.3 Dammexplosion Aalvik, Norge 1984 (Magnesium)

Den andra explosionen inom stållegeringsindustrin inträffade 1984 i en kross på en anläggning i Aalvik som producerade MgFeSi-legeringar. Bränder i krossen hade observerats innan händelsen, och släckts, men efter lunchrasten, när man hade lastat på 3-4 skopor av råvaran, inträffade en explosion. Man misstänkte att Mg-halten var ovanligt hög, och att denna antändes i krossen, alternativt att glödnästen funnits kvar när man på nytt lastade in material efter lunchrasten. En alternativ antändningsplats var i ventilationskanalen, där glödande material påträffats.

Konsekvenserna blev begränsade, delvis beroende på att man innan incidenten hade bytt ut filter och cykloner mot en våtskrubber. Efteråt förbättrade man bland annat påförings/hållningstekniken så att distributionen av de olika faserna förfinades.

4.2.4 Summering av CSB-utredningar kring metallammexplosioner

Som tidigare nämnts i kap 3.3.1 så har CSB i USA arbetat med statistik och specifika och mycket omfattande utredningar kring dammexplosioner. I flera fall har man också som ett resultat av utredningarna skapat animerade videos för att på ett instruktivt sätt förklara vad som hände vid den aktuella incidenten. Nedan ges en mycket kort redovisning av tre incidenter som involverar metallamm och som medfört både dödsfall och allvarliga personskador samt omfattande materiella skador. För ytterligare information kring dessa incidenter och andra typer av bränder/explosioner rekommenderar vi att besöka CSB hemsida, www.csb.gov där också refererade rapporter kan laddas ner.

4.2.4.1 Huntington, Indiana, 2003 (Aluminium)

Explosionen inträffade på Hayes Lemmerz International Inc. den 29 okt 2003 och ledde till att en anställd dödades, två skadades mycket allvarligt och en tredje fick mindre brännskador [39]. Dessutom fick ytterligare fyra arbetare lindriga skador. Vid anläggningen tillverkades aluminiumfälgar och det material som bildades vid efterbearbetningen av fälgarna torkades innan det gick för omsmältning. Det damm och mindre metallflingor som bildades vid bearbetning och torkning transporterades i ett ventilationssystem till en stoftavskiljare placerad utanför fabriksbyggnaden.

Explosionen inträffade inne i stoftavskiljaren och skickade en kraftig tryckvåg genom ventilationskanalerna tillbaka in i fabriken vilket startade sekundära explosioner som resulterade i ett omfattande eldklot från antänt ackumulerat damm som skakades loss från ventilationskanaler, balkar och annan utrustning.

Utredningen visade att man från företagets sida inte uppmärksammat och åtgärdat onormalt hög dammalstring från torkprocessen. Stoftavskiljaren var inte utförd enligt gällande NFPA-rekommendationer [43] för hantering av metallamm och företaget hade inte tagit lärdom av ett flertal incidenter i form av mindre bränder i dammet som inträffat tidigare i anläggningen.

Utredningen kunde inte säkert fastställa tändkällan men man bedömde att heta ytor, statisk elektricitet eller glödande partiklar mycket väl kunde vara orsaken. Incidenten visar hur en ansamling av stoft som dispergeras mycket lätt kan antändas och kan leda till mycket allvarliga konsekvenser.

4.2.4.2 New Cumberland, West Virginia, 2010 (Titan)

Explosionen inträffade på AL Solutions den 9 december 2010 och medförde att 3 anställda omkom och en inhyrd personal skadades allvarligt [33]. Företaget arbetade med återvinning av titan och zirkonium genom malning till pulver, blandning och pressning till ”puckar”. Explosionen uppstod i blandaren för pulvret vilken hade ett mekaniskt problem vilket inte blivit åtgärdat. Ett av bladen på omröraren skrapade emot ytterhöljet vilket skapade gnistor och eventuell heta ytor/punkter.

Vid antändningen i blandaren uppstod en eldsflamma av brinnande damm som i sin tur genererade ett moln av metalldamm från blandaren som antändes. Detta antände i sin tur ytterligare damm inne i anläggningen vilket ledde till en sekundärexplosion som dödade de 3 anställda och skadade den inhyrda personalen.

Utredningen visade att företaget haft ytterligare två tidigare incidenter med dödlig utgång (1995 resp 2006) och från 1993 till 2010 hade man dessutom haft minst 7 bränder i anläggningen som krävt släckinsats från den lokala räddningstjänsten. Utredningen konstaterade att NFPA 484 [43] ger rekommendationer kring hantering av metalldamm men att företaget valt att inte följa dessa på grund av att det saknats lagstiftningskrav inom området.

4.2.4.3 Gallatin, Tennessee, 2011

Utredningen omfattar tre incidenter på Hoeganas metallpulverfabrik under 2011 där ”flashfires” och explosioner dödade totalt 5 personer och skadade ytterligare 3 personer [3].

Den första incidenten inträffade den 31 januari 2011 när fint järndamm antändes som en följd av att två anställda försökte hitta ett fel i en skopelevator. En kraftig flamma uppstod och båda fick så allvarliga brännskador att de senare avled.

CSB-utredningen av incidenten i januari pågick när en likande brandincident inträffade den 29 mars vilket resulterade i ännu en brandskadad arbetare.

27 maj inträffade en vätgasexplosion på fabriken p.g.a. en rostangripen gasledning till en ugn. Explosionen skakade loss avlagrat damm på olika ytor i fabriken vilket antändes och ”regnade” ner över personalen. Explosionen och den efterföljande branden dödade tre arbetare och skadade ytterligare två arbetare.

CSB konstaterade att när fabriken byggdes ca 30 år tidigare så följde man inte de råd kring säkerhet som då fanns, b.l.a. i NFPA-standards och man hade ej heller under följande år vidtagit åtgärder för att förbättra säkerheten. Man konstaterade också att inne i lokalerna fanns det många ytor under taknivå som kunde samla stora mängder damm och som var svåråtkomliga för rengöring. Det fanns också flera maskiner som ingick i tillverkningsprocessen som ej var bra kapslade vilket ledde till utsläpp av mycket damm och flera maskiner och utrustningar var inte kopplade till något ventilations- och stoftavskiljningssystem.

4.2.5 Inträffade incidenter i metallindustri under 2018

I det nyhetsbrev som skickas ut veckovis kring nya incidenter som kommit in i "Combustible Dust Incident Database" (se kap 3.3.2) så har det redovisats åtminstone en explosionsincident från USA relaterande till metallbearbetande industri.

Incidenten inträffade i Eaton Rapids, Michigan den 2 maj 2018 i en fabrik som jobbar med pressgjutning för tillverkning av delar till bilindustrin [40]. En brand utbröt i en "tunneldel" i fabriken där magnesiumskrot transporterades på en bandtransportör. Branden följdes av en serie explosioner i anläggningen. Brandorsaken är okänd, men den andra och tredje explosionen var ett resultat av brinnande magnesium som reagerade med vatten från det installerade släcksystemet.

Två anställda skadades och incidenten hade en stor påverkan på bilindustrin eftersom man var leverantör till bl.a. Ford, Chrysler och General Motors. En olycksutredning har startats av OSHA.

5 Litteraturstudie

Här följer utdrag från några forskningsrapporter som behandlar metalldammexplosioner. För en mera utförlig referenslista över FoU-publikationer under de senaste 10 åren hänvisas till genomfört examensarbete på brandingenjörsutbildningen vid Lunds Tekniska Högskola, Rapport 5557, "Explosionsrisker med metalldamm", [30] som delvis finansierats av detta forskningsprojekt.

5.1 Egenskaper metalldamm

De flesta dammexplosioner med organiska ämnen utvecklas genom heterogena processer, d.v.s. de enskilda partiklarna hettas upp, börjar pyrolysera och bilda brännbara gaser som sedan förbränns i gasfasen.

Förbränningsegenskaperna hos metaller påverkas starkt av metallernas fysikaliska egenskaper såsom flyktighet; för aluminium och magnesium är förbränning i förångad metall dominerande, medan för järn ytkemisk förbränning i den fasta fasen överväger.

En annan faktor som skiljer sig, är att undre explosionsgränsen (MEC) normalt är högre för metaller jämfört med organiska ämnen. Detta påverkas av partikelstorlek (ju större partiklar desto högre MEC) och densitet (högre densitet ger högre MEC).

Partikelstorlek och partikelform har stor inverkan på metallers explosionsegenskaper, vilket ju för övrigt gäller för allt brännbart damm.

Medan många metaller uppvisar låg till måttlig reaktivitet och kan jämföras med organiskt damm, är vissa metaller (kalcium, aluminium, magnesium, titan m.fl.) mycket reaktiva. Dessa metaller ger vid förbränning höga flamtemperaturer. Flamtemperaturen är beroende av förbränningsvärmen. I Tabell 1 nedan redovisas förbränningsvärme för olika ämnen [19].

Tabell 1. Förbränningsvärme för metalledamm [1]

Ämne	Oxidationsprodukt (fast)	Förbränningsvärme per mol syre (kJ/mol O ₂)
Ca	CaO	1270
Mg	MgO	1240
Sr	SrO	1180
Al	Al ₂ O ₃	1100
Zr	ZrO ₂	1100
Ti	TiO ₂	910
Si	SiO ₂	830
Cr	Cr ₂ O ₃	750
Zn	ZnO	700
Mn	Mn ₃ O ₄	690
Fe	Fe ₂ O ₃	530
Cu	CuO	300
Data för jämförelse		
Sukros	CO ₂ and H ₂ O	470
Stärkelse	CO ₂ and H ₂ O	470
Polyetylen	CO ₂ and H ₂ O	400
Kol (ren)	CO ₂	400
Kol	CO ₂ and H ₂ O	400
Svavel	SO ₂	300

Till skillnad från det som är allmänt känt, att *värmeledning* och *konvektion* är de huvudsakliga flamspridningsmekanismerna för dammexplosioner, har även *värmestrålning* en stor påverkan för metaller med höga förbränningsvärmen och flamtemperaturer, se Tabell 2 nedan. Eftersom värmestrålningen är proportionell mot temperaturen upphöjt till fyra (temperaturen gånger sig själv fyra gånger) är t.ex. flamstrålningen från aluminium (flamtemperatur 2800 K), 6 gånger högre jämfört med järn (flamtemperatur 1800 K) som i detta avseende påminner mer om organiskt damm [6].

Tabell 2. Uppmätta flamtemperaturer för ett antal metalledamm [17].

Ämne	Median partikel-diameter (μm)	Flamtemperatur (K)
Aluminum	15	2800
Aluminum	40	2400
Titanium	25	2850
Magnesium	16	2800
Hf	8	2400
Ta	10	2350
Si	4	2300
Nb	20	2100
Iron	4	1800
Iron	45	1600
Zn	4	1750
B	3	1700
Cr	10	1850
Sn	8	1550
W	1	1550
Kol	1	1700

I och med att strålningen är skalningsberoende (påverkas av flamstorlek) kommer detta också påverka testresultaten beroende på om man använder en 20-liters-kammare jämfört med en 1 m³ behållare.

I en studie [17] utredde man explosionsegenskaperna hos grundämnen, däribland metaller. Fokus lades på flamtemperaturer. Andra parametrar som mättes var LEL (MEC), P_{max} och K_{st} . Försöken gjordes i en 20-liters-kammare.

Flamtemperaturer mellan 1550 K (wolfram, tenn) och 2800 K (aluminium, magnesium, titan) uppmättes. Varken nickel (Ni), koppar (Cu), molybden (Mo) eller bly (Pb) kunde antändas vid testerna, trots att en kraftig kemisk tändare (5 kJ) användes. Detta är inte oväntat. Den teoretiskt beräknade flamtemperaturen är för låg för att värma upp en explosiv blandning till det relativt höga värdet för den beräknade undre explosionsgränsen (MEC) för koppar och bly.

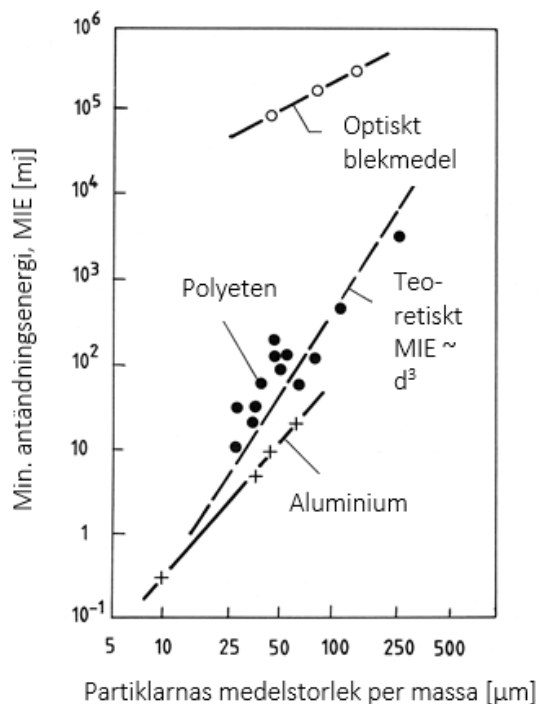
Yu [18] studerade förbränningsegenskaper och flam(mikro)strukturer för titanpartiklar med storleken 50 nm (50×10^{-9} m) respektive 35 μm (35×10^{-6} m). Försöken visade bland annat att flamspridning var helt annorlunda mellan dessa. 50 nm partiklarna karaktäriserades av diskreta enskilda glödande partiklar, medan 35 μm utmärktes av clusterbildning av glödande partiklar. Den genomsnittliga flamhastigheten för atmosfärer med nanopartiklar var också högre än för mikropartiklarna.

Eckhoff [19] beskriver olika egenskaper hos metaller som påverkar explosionsfaran. Bland annat påverkar resistiviteten antändningsriskerna på olika sätt. Om resistiviteten är låg, vilket den är i många fall, så kan damm som tränger in i elektriska installationer orsaka kortslutning. Är den hög så kan den lagra elektrostatiske laddning, som sedan kan urladdas, och på så sätt orsaka antändning av explosiv atmosfär. I Tabell 3 nedan ges en sammanfattning av egenskaperna hos vissa metaller.

Tabell 3. Sammanfattande egenskaper hos metalledamm (Utdrag från Eckhoff [1])

Dust	Median particle diameter (μm)	MEC (g/m^3)	P_{max} (bar)	K_{St} (bar m/s)	MIT dust cloud ($^{\circ}\text{C}$)	MIE (mJ)	MIT dust layer ($^{\circ}\text{C}$)
Aluminium	<10	60	11.2	515	560	-	430
Aluminium	22	30	11.5	1100	500	-	>450
Aluminium grit	41	60	10.2	100	>850	-	>450
Bronze powder	18	750	4.1	31	390	-	260
Iron	12	500	5.2	50	580	-	>450
FeSiMg (22:45:26)	17	-	9.4	169	670	210	>450
Ferrosilicon (22:78)	21	125	9,2	87	>850	54	>450
Magnesium	28	30	17.5	508	-	-	-
Magnesium	240	500	7.0	12	760	-	>450
Silicon	<10	125	10.2	126	>850	54	>450
Zinc (from zinc coating)	21	250	6.8	93	790	-	>450
Zinc (dust from collector)	<10	250	6.7	125	570	-	440

Antändligheten påverkas av partikelstorlek och partikelform. Ju mindre partiklar, desto känsligare för antändning. Om man tar ett runt korn och plattar ut till en flinga ökar ytan och därmed också kontakten med omgivande syre.



Figur 24. Hur partikelstorlek påverkar lägsta tändenergi [1]

Brand och explosionsegenskaperna för magnesium och aluminium har varit föremål för omfattande forskning. Som för alla metaller, så ökar antändligheten och explosionsstyrkan med minskande partikelstorlek, ner till under 1 μm . Dammoln med finfördelat aluminium/magnesium har exceptionella värden. Å andra sidan så uppvisar aluminiumpulver med grövre partikelstorlek på sin höjd ”måttliga” explosionsegenskaper. För produktion av finkornigt aluminium och magnesium krävs att man inverterar processen. För aluminium passar kväve som inertgas, medan argon/helium är mera kompatibelt med magnesium.

Explosionsegenskaperna för kisel påminner om de för magnesium och aluminium. Även för kisel ökar antändlighet och explosionsstyrka med minskande partikelstorlek. För legeringar med järn minskar explosionsrisken, med ökande järnhalt.

Vid partikelstorlek $<1 \mu\text{m}$, så kan det vara svårt att dispergera dammpartiklarna, och därför uppträder dessa som grövre partiklar (agglomerat) vilket också avspeglar sig när det gäller explosionsegenskaperna.

För mangan och ferromangan kan gnistor uppstå vid mekanisk bearbetning, som kan antända en explosiv dammatmosfär. Denna speciella egenskap har också kunnat påvisas för legeringar med ferrokisel. Mangandamm kan ha mycket låga tändenergier, i storleksordningen 1 mJ. Å andra sidan är flamutbredningen i dammoln relativt långsam.

Luca Marmo et al. [25] studerade över 30 dammtyper från olika metallbearbetningsprocesser som t.ex. laserskärning, blästring, slipning, svetsning och polering.

Nedan redovisas några slutsatser från detta arbete;

- Metallstoft från gjuteriavfall är i allmänhet extremt oxiderat och behöver normalt sett inte betraktas som explosionsfarligt
- Bläster- och kulpeeninganläggningar samt slipverkstäder kan generera explosivt damm med relativt hög tryckstegringshastighet
- Majoriteten av de testade proverna bör betraktas som antändliga
- Kemisk sammansättning är en viktig faktor: Aluminiumbaserade prover verkade ge högre K_{St} , även med en högre oxidhalt, jämfört med järnbaserade dammtyper
- Kemisk sammansättning och partikelstorleken är viktiga faktorer för att bestämma explosionsegenskaper. Ökad oxidhalt minskar reaktiviteten i stor utsträckning. Detta är huvudorsaken till den låga eller mycket låga reaktiviteten hos damm som produceras genom laserskärning och svetsning i icke inert miljö.

Utöver detta har Millogo et al. [27] undersökt förbränningsegenskaperna hos legeringar av kisel, aluminium och magnesium med de rena ämnena och fann att de rena ämnena gav högre värden på P_{max} och K_{St} jämfört med de olika legeringarna.

Clouthier et al. [28], jämförde tester med järndamm gjorda i en 20-liters-kammare med ett 1 m^3 -kärl. Järnpulver med fin, medium och grov partikelstorlek som med 20-liters-kammaren gav K_{St} -värden mindre än 45 bar m/s befanns också vara explosiva i 1 m^3 -kärlet. Det grova järndammet befanns vara icke explosivt endast om finfraktionen

<75 μm var borttagen. Det fina, medelstora och grova järndammet gav lägre tryckstegringshastigheter över alla koncentrationer i 20-liters-kammaren jämfört med 1 m^3 -kärlet.

Fin, medium och grovpartiklar av aluminiumpulver testades också. Det grova aluminiumet befanns vara marginellt explosivt i 20-liters-kammare och icke-explosiv i 1 m^3 -kärlet. Fint och medelfint damm gav betydligt högre K_{st} -värde i 1 m^3 -kärlet jämfört med 20-liters-kammaren.

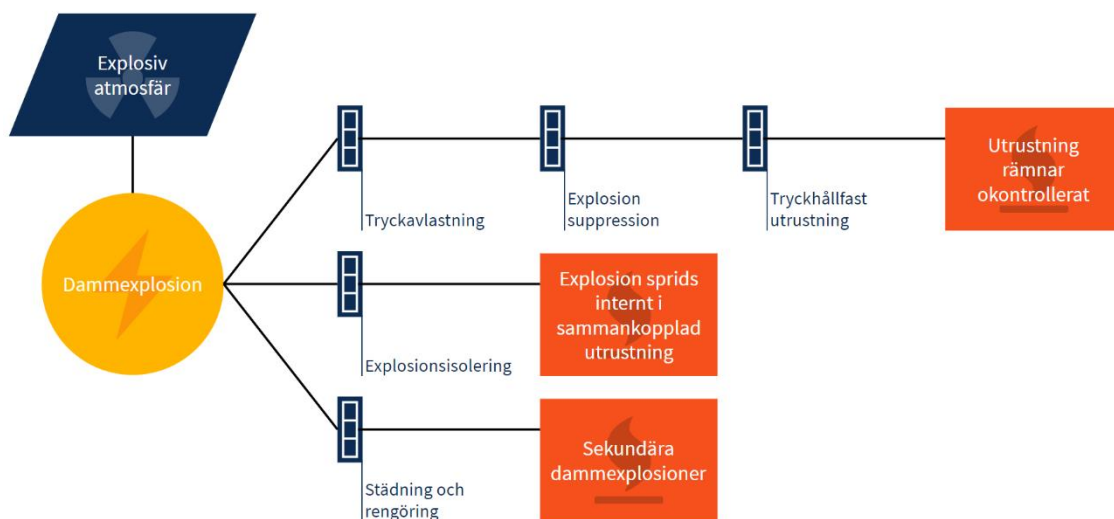
5.2 Skyddsprinciper

5.2.1 Allmänt

Dammexplosioner kännetecknas av snabba förlopp. Flamutbredning och värmestrålning kan ge svåra brännskador och orsaka efterföljande bränder i utrustning och byggnader. Tryckverkan kan skada människor och konstruktioner. Byggnader och större konstruktioner tål sällan höga tryck vilket gör att explosioner kan ge allvarliga skador på konstruktioner.

I Figur 25 har olika förlopp vid dammexplosioner definierats.

- Utrustning rämna okontrollerat
- Explosion fortplantas inuti utrustning
- Sekundära explosioner och öppna flammor



Figur 25. Explosionsförlopp där en eller flera olika barriärer kan förhindra allvarliga skadeverkningar

De blå boxarna utgör barriärer för att förhindra sluthändelserna. Exempelvis kan man skydda en behållare från att rämna vid en explosion genom tryckavlastning, explosionsundertryckande system (suppression system) eller inneslutning, antingen i kombination eller en av dessa.

Tryckavlastning används för att en inneslutning (utrustning, lokal, byggnad) inte ska rämna okontrollerat på grund av explosionstrycket. Istället avlastas trycket genom att

luckor eller membran öppnas och släpper ut flammor och heta gaser, till ett säkert område.

Explosionsundertryckande system (suppression system) är en metod för att inom tusendelar av en sekund detektera och släcka en explosion. Rätt dimensionerad reduceras därigenom explosionstrycket till en nivå som utrustningen tål.

Explosionshållfast utrustning bygger på att man gör konstruktionen så hållfast att den kan motstå det maximala explosionstrycket som kan uppstå inne i processutrustningen. Detta kan vara ett alternativ till övriga skyddsmetoder där man reducerar trycket i inneslutningen på olika sätt. Exempelvis kan det vara ett alternativ då man inte vill få ut giftiga gaser till omgivningen eller där tryckavlastning inte kan ske på ett säkert sätt.

Explosionsisolering innebär att man förhindrar att en explosion sprider sig internt från en del av processen till en annan.

5.2.2 Standarder

Nedan listas standarder som är aktuella när det gäller skyddssystem för dammexplosioner. För provning och godkännande av olika typer av skyddssystem nämns särskilt metalledamm i några av standarderna. *Dessa markeras kursivt nedan.*

- SS-EN_14373:2005 Explosionsundertryckande system
- SS-EN_14797:2006 Tryckavlastning vid explosion
- *SS-EN_15089:2009 Explosionsisolering*
- SS-EN 16009: 2011 Tryckavlastning vid flamlös explosion
- *SS-EN_14491:2012 Dammexplosionsskydd genom tryckavlastning*
- *SS-EN 16447: 2014 Explosionsisolering av klaffventiler*

När det gäller explosionsisolering (inklusive klaffventiler) ska det särskilt i ATEX-certifikatet framgå om utrustningen är godkänd för metalledamm. I standarden för dimensionering av tryckavlastning (EN 14491) är vissa formler när det gäller tryckavlastningsrör inte tillämpliga för metalledamm.

5.2.3 Utvärdering av skyddsprinciper

Här följer en kort litteraturgenomgång vad gäller utvärdering av skyddsprinciper för metalledammexplosioner.

Going, J.E. et al [20], gör en genomgång av de olika skyddsprinciperna (tryckavlastning, inneslutning, explosionsundertryckning, isolering) för metalledammexplosioner och dess begränsningar. Genomförda experiment redovisas och pekar på att de olika skyddsprinciperna framgångsrikt kan appliceras, om de tillämpas på rätt sätt.

Explosionsundertryckande system kan åstadkomma reducerat tryck på <1 bar för metalledamm upp till K_{st} 300 bar m/s. Vid högre K_{st} värden, har suppression-system inte varit effektiva, men i kombination med tryckavlastning har man uppnått lovande resultat. Inga tester med magnesium har rapporterats.

Försök med tryckavlastning har rapporterats för behållare på 2,6 respektive 18 m³. I det första fallet användes aluminiumdamm med P_{max} 10 bar och K_{st} 170 bar m/s och i det andra P_{max} 10,5 bar, och K_{st} 350 bar m/s. I bägge fallen observerades att det resulterande

explosionstrycket blev högre än det beräknade utifrån VDI 3673 [31]. Man kom fram till att tryckavlastning säkert är möjligt, men det återstår att undersöka dimensioneringen av sådana tryckavlastningar.

Explosionsisolering med kemiska (explosionsundertryckande system) och mekaniska barriärer (spjäll) var för sig, eller i kombination, samt kombination av mekanisk explosionsisolering och tryckavlastning har genomförts. Kemisk isolering fungerade i en rak rörledning upp till K_{St} 650 bar m/s. Med en explosion som initierats i en förbehållare krävdes vid mekanisk isolering som tillägg även en tryckavlastning i direkt anslutning till den mekaniska isoleringen. En kombination av kemisk och mekanisk isolering fungerade också.

P. Moore et al. [20], beskriver tester gjorda för att utvärdera om explosionsundertryckande system och tryckavlastning, var för sig eller tillsammans, är effektiva för att hantera explosionsriskerna med aluminium. Försöken visade att användningen av ett kommersiellt brandsläckningspulver baserat på natriumbikarbonat (ICI Dessikarb) var det mest effektiva släckmedlet i det explosionsundertryckande systemet för att förhindra dammexplosioner med aluminiumflingor. Men även under optimala förhållanden uppkom ett reducerat explosionstryck (P_{red}) på upp till 2 bar, att jämföra med ett normalt reducerat explosionstryck på 0,2–0,3 bar för organiska damm. Det reducerade explosionstrycket måste vara lägre än designtrycket för utrustningen, och används vid dimensionering av tryckavlastningssystem och explosionsundertryckande system.

Vid försök med aluminiumdamm gav tryckavlastning ett reducerat explosionstryck på 3–8 bar. I kombination med ett explosionsundertryckande system erhöles ytterligare en reducering med 30–45 % (1–4 bar).

Taveau [21] presenterar genomförda explosionstester med olika typer av metalledamm. Explosionstester med järn genomfördes först i en 1 m³ behållare för att bestämma explosionsdata, och sedan i en 2 m³ behållare med tryckavlastning. Det reducerade explosionstrycket blev dubbelt så högt som förväntat. Detta tillskrivs skaleffekten.

Tester med aluminiumdamm [22] visade att dammkoncentrationen är avgörande för hur högt det reducerade explosionstrycket blir vid undertryckning med brandsläckningspulver. Dammkoncentrationer på 1000 g/m³ eller högre resulterade i höga reducerade explosionstryck. Eftersom genomförda mätningar i filter visar att dammkoncentrationen i filter i praktiken sällan överstiger 500 g/m³, bedöms undertryckning kunna fungera som skydd i de flesta fall. Försök med undertryckning av explosioner med kisel visade att aktiveringstrycket hade stor inverkan på hur effektiv undertryckningen blev.

Dufaud et al. [23], visade också att medan ökad luftfuktighet tenderar att sänka explosionshastigheten för organisk damm kan den leda till högre K_{St} för aluminiumstoff (475 bar m/s för torrt aluminium vs 680 bar m/s i närvaro av vatten).

Davis och van Wingerden [11] rapporterade genomförda försök som involverade ett 5,8 m³ tryckavlastat slangfilter anslutet till ett 2 m³ tryckavlastat cylindriskt kärl via en 22 m lång kanal (d=150 mm) (se Figur 26). Antändning initierades i slangfiltret och spreds via kanalen till det mottagande cylindriska kärlet. De använde sig av vete (K_{St} = 55 bar m/s), majsstärkelse (K_{St} = 145 bar m/s) och kisel (K_{St} = 140 bar m/s).

För majsstärkelse resp. kisel, med nästan samma K_{St} -värde, blev det resulterande trycket i det mottagande kärlet 0,6 bar för majsstärkelse och 0,77 bar för kisel. Mer tydligt var skillnaden i det maximala trycket uppmätt i kanalen, där majs gav ett tryck på 0,55 bar och kisel ett tryck på $>2,5$ bar.

I artikeln tilldelas denna effekt det ökade inflytandet av värmestrålning i större skala.



Figur 26. Försökupställning med slangfilter, 22 m kanal och ett mottagande kärl.

6 Diskussion

6.1 Egenskaper hos metalledamm

Medan många metaller uppvisar låg till måttlig reaktivitet och kan jämföras med organiskt damm, är vissa metaller (kalcium, aluminium, magnesium, titan m.fl.) mycket reaktiva. Dessa metaller ger vid förbränning höga flamtemperaturer. Det beror på att förbränningsvärmets värme är hög.

Till skillnad från det som är allmänt känt, att värmeledning och konvektion är de huvudsakliga flamspridningsmekanismerna för dammexplosioner, har även värmestrålning en stor påverkan för metaller med höga förbränningsvärmen och flamtemperaturer.

Strålningsvärmets värme som påverkar en partikel i närheten av en flamma är beroende av flammans storlek. Detta gör att tester i en 20-liters-kammare och en 1 m³-behållare ej är jämförbara, strålningsvärmen blir betydligt lägre i den mindre testvolymen. För att likna verkliga förhållanden borde man göra testerna i en 1m³-behållare, när man t. ex. ska dimensionera ett explosionsskydd. Detta är dock ett problem eftersom det inte finns så många sådana testutrustningar att tillgå och den databank (GESTIS) med över 6000 testresultat publicerade bygger i huvudsak på tester utförda i en 20-liters-kammare.

Tyvärr finns ingen bra lösning på detta i dagsläget. Det man kan göra är att söka efter specifika data uppmätta i en 1 m³-behållare, eller att anpassa dimensioneringen för betydligt högre värden än de som redovisas för en 20-liters-kammare.

6.2 Skyddsprinciper

Som tidigare har diskuterats har vissa metaller extrema explosionsegenskaper. Därför är design och dimensionering av skyddssystem för metalledammexplosioner en stor utmaning.

Ett tips kan vara att studera utvecklingen i USA, där man har riktlinjer och råd för hantering av brand- och explosionsrisker för metaller: NFPA 484 Standard for Combustible Metals [43]. National Fire Protection Association har så sent som 2019 reviderat denna omfattande guideline (158 sidor). Man varnar bl.a. för att tillämpningen av gängse normer för dimensionering och utformning av system för undertryckning, isolering och tryckavlastning kanske inte är lämpliga för vissa brännbara metalledamm. Även i NFPA 68 [44] påpekas att resultat från 20-liters-kammaren är för låga för lättmetaller och där uppmanas man att använda en säkerhetsfaktor på 2 vid dimensionering av skyddssystem. Ett stort ansvar läggs härmed på tillverkare av sådan skyddsutrustning, som med tester måste visa att utrustningen är lämplig för aktuell applikation. Detta är något som ännu inte implementerats fullt ut i relevanta EN-standarder. Tyvärr är det nog så att många inom lättmetallindustrin lever i den falska tron att deras tryckavlastningar och explosionsskydd i övrigt är dimensionerat och anpassat för deras hantering.

7 Slutsatser och rekommendationer

7.1 Dra lärdom av tillbud

Om man studerar orsakerna till inträffade explosioner, både utifrån statistiken och från utredningar av specifika incidenter så kan man se att det finns många olika orsaker men samtidigt vissa likheter. I många fall har allvarigare incidenter föregåtts av flera mindre incidenter men där man inte tagit lärdom utan arbetat vidare utan förändringar i processutrustning eller drifts-och underhållsrutiner. Utgående från redovisad statistik innebär mindre incidenter att man förr eller senare kommer att råka ut för en allvarlig olycka, kanske t o m med dödsfall som följd. Att lära av ”små-incidenter” är således oerhört viktigt.

När det gäller incidenter relaterade till metalledamm är dessa primärt kopplade till olika typer av bearbetningsprocesser i form av blästring, kulblästring eller lasersvetsning i inert miljö och där explosionerna oftast uppstår i ventilationssystem och tillhörande utrustningar. Flera händelser har varit förknippat med någon form av manuellt ingrepp i anläggningen och där okunskap varit en direkt eller indirekt orsak till händelserna.

Den utrustning som visat sig vara mest involverad i incidenterna var dammavskiljningssystem (utsugsslang/rör, ventilationskanaler, stoftavskiljare, filter) vilket tydligt visar att detta är en avsevärd riskkälla i en anläggning. Detta stämmer också väl med internationell statistik. Resultatet är egentligen inte förvånande, eftersom det är där man har det mesta av dammet, och där olika tändkällor (som gnistor, heta partiklar och glödande material) kan följa med luftströmmen från t.ex. en bearbetningsprocess.

Det är också tydligt att manuella åtgärder och hantering (exempelvis manuell tömning, rengöring etc.) utgör en framträdande riskfaktor.

Man bör särskilt ta fram insatsplaner och kommunicera kring riskerna med metalledamm tillsammans med räddningstjänsten samt diskutera de speciella risker som brandsläckning vid metallbrand medför. Användningen av t.ex. vatten kan i vissa fall leda till att man virvlar upp brännbart damm, eller i kontakt med brinnande metaller leda till vätegasbildning, vilket i båda fallen kan resultera i en förvärrad situation.

Sammantaget rekommenderas att fortsätta följa olycks- och tillbudsstatistik från bl a Arbetsmiljöverket. Detta kan ingå arbetsuppgifterna i den intressentgrupp som föreslås under punkt 7.2.

7.2 Okunskap kring metalledamm

När det gäller forskning kring metalledammsexplosioner så kan man konstatera att kunskapen kring detta är betydligt mindre utredd än för organiska damm. Försök i testutrustning med volymen 1 m³ visar betydligt högre värden och är sannolikt mer representativa för många verkliga applikationer med lättmetaller. Detta har också visats i några fåtal försök i större skala. I NFPA 68 (2018) rekommenderas numera att man skall använda en säkerhetsfaktor på 2 på data framtagna med en 20-liters-kammare.

Slutsatsen är att man inom metallbearbetande industrin kan behöva se över dimensioneringen av befintliga tryckavlastningar och explosionsskydd.

Ett viktig och effektivt komplement till en mer långsiktig forskning är att sprida den kunskap och de erfarenheter som redan finns ute i industrin. Att utifrån projektets referensgrupp, med inbjudan till ytterligare intressenter, bilda någon form av permanent säkerhetsgrupp skulle kunna vara en möjlighet till kunskapsutbyte. I en sådan grupp kan man fortsätta att utbyta erfarenheter och ta fram någon form av branschrekommendationer för berörda industrier. En sådan gruppering finns t.ex. bland aluminiumhanterande industri på ett europeiskt plan genom EMPA (European Metallic Particulate Association) där man bl.a. samarbetar kring säkerhetsfrågor. Det pågår också ett initiativ med att skapa en portal för utbyte av erfarenheter inom dammexplosionsområdet, www.safedustexplosion.org, som skulle kunna vara ett komplement för informationsspridning.

8 Referenser

- [1] Eckhoff, R.K., Dust Explosions in the Process Industries, Third Edition, CBS Publishers & Distributors Pvt. Ltd., 2004
- [2] Många döda i explosion vid fabrik i Kina, <http://www.svt.se/nyheter/utrikes/explosion-vid-fabrik-i-kina>
- [3] CSB Case Study, "Hoeganaes Corporation: Gallatin, TN, Metal Dust Flash Fires and Hydrogen Explosion", CSB report. 2011-4-I-TN 2011.
- [4] Undersökningsrapport, aluminium dammexplosion, US kemikaliesäkerhet och Hazard undersökning rapport nr. 2004-01-I-IN, 2005
- [5] Lunn, G.A., Aluminiumpulver explosion vid ALPOCO, Anglesey, Storbritannien, rapport nr. SMR 46/235/0171, HSE, 1984.
- [6] Wingerden, K., Davis, S., "Unknown aspects of metal dust explosions", 10th Global congress on process safety, New Orleans, LA, March 30-April 2, 2014
- [7] "Anställd skadad efter explosion på Scania", <http://lt.se/nyheter/sodertalje/1.1458939-anstalld-skadad-efter-explosion-pa-scania> (publ 2 dec 2011)
- [8] Personlig kommunikation, Henrik Braatz, Scania 2016
- [9] "Anställd skadad vid explosion på ABB", www.dt.se/anstalld-skadad-vid-explosion-pa-abb (publ 25 april 2013)
- [10] "Brand på Gestamp Hardtech", <http://www.nsd.se/nyheter/lulea/brand-pa-gestamp-hardtech-9819700.aspx> (publ 25 jan 2016)
- [11] Van Wingerden, K. and Davies, S., Scaling of metal dust explosions, ISHPMIE 2015
- [12a] Beck, H. and Jeske, A., Dokumentation Staubexplosionen. Analyse und Einzelfalldarstellung, Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit Report no. BIA 4-82, 1982
- [13] Lunn, G.A., Dust explosion prevention and protection. Part 1 – Venting, 3rd Edition, Institution of Chemical Engineers
- [14] Investigation report, Combustible dust hazard study, U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board report no. 2006-H-1, 2006
- [15] Nifuku, M., Matsuda, T. and Enomoto, H., Recent developments of standardization of testing methods for dust explosion in Japan, *J. Loss Prev. Process Ind.*, 13, 243-251, 2000
- [16] Jeske, A. and Beck, H., Dokumentation Staubexplosionen. Analyse und Einzelfalldarstellung, Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit report no. BIA 11-97, 1997
- [17] Cashdollar, K.L. and Zlochower, I.A., Explosion temperatures of metals and other elemental dust clouds, *Process Safety Progress*, 13 (3), 139–145, 1994

- [18] Jianliang Yu et al., Combustion behaviors and flame microstructures of micro- and nano-titanium dust explosions, *Fuel* 181 (2016) 785-793
- [19] Eckhoff, R.K., Dust explosion Hazards in the Ferro-Alloys Industry, Proc. 52nd Electric Furnace Conference, Nashville, pp.283-302, 1994
- [20] Going, J.E., Snoeys J., Explosion Protection with Metal Dust Fuels, *Process Safety Progress* Vol.21, No.4, pp.305-312, 2002
- [21] Taveau, J.R.1*, Vingerhoets, J.2, Snoeys, J.2, Going, J.E.1, and Farrell, T.M.1, Explosion Protection with Metal Dust Fuels: New Experimental Evidence, Proc. of the Seventh International Seminar on Fire and Explosion Hazards (ISFEH7), 2013
- [22] Jerome Taveau, Jim Vingerhoets, Jef Snoeys , John Going , Thomas Farrell, Suppression of metal dust deflagrations, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 36 (2015) 244-251
- [23] Jerome Taveau, Combustible Metal Dusts: A Particular Class, 17th Annual International Symposium, 2014, College Station, Texas
- [24] Jérôme Taveau, Simone Hochgreb, Saul Lemkowitz, Dirk Roekaerts, Explosion hazards of aluminum finishing operations, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 51 (2018) 84-93
- [25] Enrico Danzia, Luca Marmoa (2018). Dust explosion risk in metal workings, ISHPMIE 2018
- [26] Michelle McRae, Philippe Julien, Santino Salvo, Samuel Goroshin, David L. Frost, Jeffrey M. Berghorson, Department of Mechanical Engineering, McGill University, Montreal, Canada. Stabilized, flat iron flames on a hot-product counterflow burner, ISHPMIE 2018
- [27] Myriam Millogo, Stéphane Bernard & Philippe Gillard, Univ. Orléans, France ; Combustion characteristics of Aluminum alloy and mixtures of metal powders ISHPMIE 2018
- [28] Martin P. Clouthier, Jérôme R. Taveau, Ashok G. Dastidar, Luke S. Morrison, Robert G. Zalosh, Robert C. Ripley, Faisal I. Khan & Paul R. Amyotte ; Iron and aluminum powder explosibility in 20-L and 1-m³ chambers, ISHPMIE 2018
- [29] Yuan, Z., Khakzad, N., Khan, F., & Amyotte, P. (2015). Dust explosions: A threat to the process industries. *Process Safety and Environmental Protection*, 98, 57–71.
- [30] Rapport 5557, Explosionsrisker med metall dam (Dufva S. och Fast A. 2017)
- [31] VDI 3673, "Pressure Venting of Dust Explosions," Verein Deutscher Ingenieure - Kommission Reinhaltung, der Luft, Dusseldorf, VDI Verlag GmbH, Dusseldorf, Germany, 2000
- [32] SEK Handbok 433, "Statisk elektricitet i explosionsfarliga områden"
- [33] CSB Case Study, "AL Solutions, Inc., New Cumberland, WV Metal Dust Explosion and Fire", Final Investigation Report 2011-3-I-WV, July 2014.

- [34] "Dust incidents 2006-2017", CSB U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, https://www.csb.gov/assets/1/17/csb_dust_incidents.pdf?16406
- [35] "2016 Combustible Dust Incident Report (North America)", <http://www.mydustexplosionresearch.com/2016-Report>
- [36] "2017 Combustible Dust Incident Report", <https://dustsafetyscience.com/2017-report/>
- [37] "2018 Mid-Year Combustible Dust Incident Report", <http://www.mydustexplosionresearch.com/2018-Report/>
- [38] "2014 Kunshan explosion", https://en.wikipedia.org/wiki/2014_Kunshan_explosion
- [39] CSB "Investigation Report Aluminium Dust Explosion-Hayes Lemmerz International-Huntington, Inc", Report No 2004-01-I-IN, September 2005,
- [40] "Magnesium Dust Fire and Explosions in Eaton Rapids, Michigan Injures Two and Cuts Automotive Parts Supply Line", <https://dustsafetyscience.com/magnesium-dust-explosion-eaton-rapids-michigan/>
- [41] Yan, X.Q., Yu, J.L., 2012. Dust explosion incidents in China. *Process Saf. Prog.* 31, 187–189.
- [42] P. E. Moore and P. L. Cooke, Report on a Research project on the Suppression of Metal Dust Explosions, *J. Loss Prev. Process Ind.*, 1989, Vol.7, October
- [43] NFPA 484 Standard for Combustible Metals, National Fire Protection Association, 2019
- [44] NFPA 68 Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting, 2018
- [45] Beck, H. and Jeske, A., Dokumentation Staubexplosionen. Analyse und Einzelfalldarstellung, Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit Report no. BIA 2-87, 1987

Through our international collaboration programmes with academia, industry, and the public sector, we ensure the competitiveness of the Swedish business community on an international level and contribute to a sustainable society. Our 2,200 employees support and promote all manner of innovative processes, and our roughly 100 testbeds and demonstration facilities are instrumental in developing the future-proofing of products, technologies, and services. RISE Research Institutes of Sweden is fully owned by the Swedish state.

I internationell samverkan med akademi, näringsliv och offentlig sektor bidrar vi till ett konkurrenskraftigt näringsliv och ett hållbart samhälle. RISE 2 200 medarbetare driver och stöder alla typer av innovationsprocesser. Vi erbjuder ett 100-tal test- och demonstrationsmiljöer för framtidssäkra produkter, tekniker och tjänster. RISE Research Institutes of Sweden ägs av svenska staten.



RISE Research Institutes of Sweden AB
Box 857, 501 15 BORÅS
Telefon: 010-516 50 00
E-post: info@ri.se, Internet: www.ri.se

SAFETY
RISE Rapport 2019:40
ISBN:



RISE Research Institutes of Sweden
P.O. Box 857, 501 15 BORÅS, SWEDEN
PHONE: 0046-10-516 50 00
E-post: info@ri.se,
Internet: www.ri.se

OUR SPONSORS & PARTNERS:



RAPPORTER UTGIVNA AV BRANDFORSK 2019

- 2019:1** Measuring the impact of fire on the environment.
Fire Impact Tool, version I
- 2019:2** Systemperspektiv på industriell brandsäkerhet - en studie av organisering och användbarhet i brandskyddet
- 2019:3** Dammexplosioner i metallbearbetande industri



1979 bildades Brandforsk som svar på behovet av ett gemensamt organ för att initiera och finansiera forskning och utveckling inom brandsäkerhetsområdet.

Brandforsk är statens, försäkringsbranschens och industrins gemensamma organ för att initiera, bekosta och följa upp olika slag av brandforskning.

Huvudman för Brandforsk är Brandskyddsföreningen och verksamheten leds av en styrelse och bedrivs i form av projekt vid universitet och högskolor, forskningsinstitut, myndigheter och företag.



Brandforsk

Årstaängsvägen 21 c
Box 472 44, 100 74 Stockholm
Tel: 08-588 474 14
brandforsk@brandskyddsforeningen.se