



Rapportage gevaarzetting nat vuurwerk Ulicoten

Datum: 24 oktober 2019
Ons kenmerk: 2019-1506/VLH/HDW/smh

RIVM

A. van Leeuwenhoeklaan 9
3721 MA Bilthoven
Postbus 1
3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl

T 030 274 91 11
info@rivm.nl

Managementsamenvatting

Deze rapportage bevat de resultaten van het onderzoek naar de gevaarzetting van nat vuurwerk. Dit onderzoek is op verzoek van de Inspectie Leefomgeving en Transport (ILT) uitgevoerd door het Centrum Veiligheid van het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM). Dit onderzoek is een vervolg op de literatuurstudie die het RIVM in 2018 voor de ILT heeft uitgevoerd.

Auteur
Centrum Veiligheid

In het onderzoek heeft het RIVM de factoren onderzocht die aan de hand van de in december 2018 uitgevoerde literatuurstudie niet konden worden beantwoord. Deze factoren zijn relevant om een afgewogen antwoord te kunnen geven op de vragen van de ILT over de gevaarzetting van nat geworden vuurwerk. Deze factoren betreffen de waterdoorlatendheid van de kartonnen kokers van de flitspoeder bevattende vuurwerkartikelen en de reactie die het flitspoeder met water geeft.

Uit dit onderzoek is gebleken dat water vrij gemakkelijk door het karton kan doordringen, maar dat een etiket op de koker dit proces vertraagt. Indien het in dit onderzoek betrokken flitspoeder nat wordt, zal uitsluitend waterstof ontstaan. De snelheid waarmee dit gebeurt is erg laag. De totale hoeveelheid waterstof die gevormd zal worden, zal niet voldoende zijn om een explosief mengsel te kunnen vormen in een bunker. Daarnaast zijn in de bunkers in Ulicoten, waar het vuurwerk met flitspoeder wordt opgeslagen, ventilatieroosters in het dak aanwezig waardoor het eventueel gevormde waterstof kan ontsnappen.

Al met al kan worden gesteld dat de gevaarzetting van nat geworden vuurwerk dat flitspoeder bevat niet zal toenemen ten opzichte van vuurwerk met flitspoeder dat niet nat is geworden.

Voor een uitgebreide toelichting op deze conclusies wordt korthedshalve verwezen naar de hieronder bijgevoegde rapportage.

Rapportage gevaarstelling nat vuurwerk Ulicoten

1. Inleiding

Naar aanleiding van het incident in Ulicoten op 28 mei 2018, waarbij opgeslagen vuurwerk nat werd door een defecte sprinklerinstallatie, heeft het Centrum Veiligheid in opdracht van de ILT in 2018 een literatuurstudie uitgevoerd om een uitspraak te kunnen doen over de gevaarstelling van nat vuurwerk dat voornamelijk flitspoeder bevat.

In een briefrapport van 10 december 2018 van het RIVM aan de ILT zijn aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek, omdat alleen het uitgevoerde literatuuronderzoek niet toereikend was voor het geven van een afgewogen duiding over de gevaarstelling van het desbetreffende nat geworden vuurwerk.

De ILT heeft op 24 januari 2019 het RIVM gevraagd de aanbevelingen uit de voornoemde literatuurstudie in een vervolgonderzoek uit te voeren. In deze rapportage zijn de resultaten van het vervolgonderzoek beschreven.

In hoofdstuk 2 worden de kennis- en onderzoeksvragen besproken die aan het begin van dit onderzoek zijn opgesteld. Hoofdstuk 3 beschrijft de aanpak van dit onderzoek. In hoofdstuk 4 worden deze deelvragen beantwoord aan de hand van de uitgevoerde onderzoeken betreffende de waterdoorlatendheid van de kartonnen kokers en de reactie van flitspoeder met water. In hoofdstuk 5 wordt de hoofdvraag beantwoord en de conclusie gegeven. In bijlagen 1 en 2 staan de resultaten van de experimenten voor respectievelijk de waterdoorlatendheid van kartonnen kokers en de reactie van flitspoeder met water.

2. Kennis- en onderzoeksvragen

De hoofdkennisvraag die de ILT in 2018 aan het RIVM stelde was: wat is de gevaarstelling van nat geworden vuurwerk dat voornamelijk flitspoeder bevat?

Aan de hand van het uitgevoerde literatuuronderzoek kon geen uitspraak worden gedaan over de waterdoorlatendheid van de kartonnen kokers en de effecten die mogelijk optreden bij de reactie van water en flitspoeder. Deze twee onbekende factoren zijn echter relevant voor het duiden van de hoofdvraag, namelijk de gevaarstelling van nat vuurwerk. Om meer inzicht in deze factoren te krijgen, zijn in het vervolgonderzoek verschillende experimenten en analyses uitgevoerd. Deze zijn in overleg met de ILT gekozen aan de hand van de opgestelde onderzoeksvragen. De uitkomsten van deze experimenten en analyses zijn in deze rapportage beschreven. Er wordt ook een duiding gegeven van de gevaarstelling van het nat vuurwerk dat voornamelijk flitspoeder¹ bevat.

¹ In het onderhavige onderzoek is uitgegaan van flitspoeder dat voornamelijk is samengesteld uit een binair mengsel van kaliumperchloraat en aluminium. Dit type flitspoeder is representatief voor de samenstelling van de pyrotechnische sas van de verschillende vuurwerkartikelen die in Ulicoten zijn opgeslagen.

De onderzoeksvragen zijn:

1. Wat is de waterdoorlatendheid van de (lege) kartonnen koker van het vuurwerkartikel?
2. Wat is de waterdoorlatendheid van het vuurwerkartikel waarbij de kartonnen koker is gevuld met een ongevaarlijke stof (indicator), in plaats van flitspoeder?
3. Welke reactieproducten van flitspoeder met water worden er gevormd?
4. Welke reactieproducten worden er gevormd van nat vuurwerk dat flitspoeder bevat?
5. Wat is de samenstelling van het flitspoeder in het opgedroogde vuurwerkartikel?
6. Wat is de gevoeligheid voor initiatie (opwarming, schok, wrijving, etc.) van flitspoeder (in vuurwerk) voordat het nat is geworden en nadat het flitspoeder is gedroogd (in vuurwerk)?

3. Aanpak onderzoek voor beantwoorden onderzoeksvragen

Het RIVM heeft onderzoek uitgevoerd naar de waterdoorlatendheid van de kartonnen kokers die worden gebruikt voor Cobra 6 vuurwerkartikelen. Daartoe is de vochtigheid in lege kokers (met en zonder etiket) bepaald met luchtvochtigheidsmeters en is onderzocht hoe snel een (niet reactief) vulmiddel in de koker nat wordt. In bijlage 1 van deze rapportage zijn de resultaten vermeld.

Het onderzoek naar de mogelijke reactie tussen het flitspoeder en water is in opdracht van RIVM door TNO uitgevoerd. Er zijn verschillende experimenten en analyses uitgevoerd met flitspoeder uit Cobra 6 om inzicht te kunnen krijgen in de samenstelling van het gevormde gas, de hoeveelheid gevormd gas en de snelheid waarmee het gas wordt gevormd, de invloed van toevoegingen aan het flitspoeder, de warmteontwikkeling tijdens de reactie en de gevoeligheid van het flitspoeder voor en na het nat worden. Deze testen zijn uitgevoerd met los flitspoeder omdat deze testen niet uitgevoerd kunnen worden voor volledige artikelen. Ook zal blootstelling van het flitspoeder aan water niet constant zijn bij het gebruik van de volledige artikelen. De experimenten zullen dan hoogstwaarschijnlijk ook niet reproduceerbaar zijn. In bijlage 2 staan de resultaten van het TNO-onderzoek.

4. Uitwerking van de onderzoeksvragen

1. *Wat is de waterdoorlatendheid van de kartonnen koker van het vuurwerkartikel?*

Om de waterdoorlatendheid van kartonnen kokers te bepalen, werd de luchtvochtigheid in lege kartonnen kokers, met en zonder etiket, gemeten. De gebruikte opstelling en het verloop van de luchtvochtigheid als functie van de tijd zijn respectievelijk in Figuur 1 en 2 getoond in bijlage 1.

De kokers waren aan de onderzijde afgesloten met een plastic dopje (een vergelijkbaar dopje als wordt toegepast in de Cobra 6). De kokers werden rechtop ondergedompeld in water, wat een worst case scenario is. In het geval dat vuurwerk nat wordt door een sprinkler, zal het vuurwerk niet volledig ondergedompeld zijn. In de praktijk zal het water minder gemakkelijk naar binnen dringen door de kokers dan het geval is in de uitgevoerde experimenten.

Na 30 minuten tot een uur is de luchtvochtigheid in de kokers zonder etiket toegenomen tot respectievelijk 80% en 90% voor twee verschillende kokers. Er zit variatie in de snelheid waarmee het vocht door de kokers zonder etiket naar binnen dringt. Tijdens de experimenten bleek namelijk dat niet alle kokers uit evenveel lagen zijn opgebouwd, wat waarschijnlijk het verschil in doorlaatbaarheid in de kokers verklaart. De luchtvochtigheid in de koker met etiket neemt veel minder snel toe en bereikt niet de waarden van 80 tot 90%. In de praktijk zullen de etiketten van de vuurwerkartikelen en de overige verpakkingen (dozen) een deel van het water tegenhouden en/of opnemen, zodat water minder snel doordringt in de kokers.

Uit de (worst-case) experimenten blijkt de papieren kokers in relatief korte tijd veel water kunnen opnemen en dat het water waarschijnlijk vooral doordringt langs het plastic dopje aan de onderzijde. Het etiket beperkt het doordringen van water in de koker en zorgt voor een langzamere opname van water in de koker.

2. *Wat is de waterdoorlatendheid van de kartonnen koker, waarbij de koker is gevuld met een ongevaarlijke stof (indicator), in plaats van fliitspoeder?*

Om de waterdoorlatendheid van de kartonnen kokers die gevuld zijn met een vulstof te bepalen, is gebruik gemaakt van keukenzout als vulstof. Het fliitspoeder bevat het zout kaliumperchloraat ($KClO_4$) en is hygroscopisch (aantrekken van vocht). Keukenzout is ook hygroscopisch en is daardoor representatief voor het fliitspoeder.

In bijlage 1 in Figuur 3 zijn kokers te zien die zijn gevuld met keukenzout en verschillende tijden in het water ondergedompeld zijn geweest. Na 45 minuten is het zout geheel samengeklonterd aan de kant waar de koker in het water stond. Het water dringt waarschijnlijk dus vooral door langs het plastic dopje, dat de koker aan de onderkant afdicht. In de praktijk zullen de kokers niet ondergedompeld zijn en de verwachting is dat de opname van water in de koker langzamer zal verlopen dan tijdens deze experimenten is waargenomen.

3. *Welke reactieproducten van fliitspoeder met water worden er gevormd?*

TNO heeft vastgesteld dat bij de reactie van water met fliitspoeder uitsluitend waterstofgas wordt gevormd (zie hoofdstuk 3 'Chemische gevaren van nat gemaakt vuurwerk' van bijlage 2). De snelheid van de vorming van waterstof was niet afhankelijk van de hoeveelheid water die

werd toegevoegd. Daarnaast werd de snelheid van de vorming van waterstof gemeten, en bedroeg de vormingssnelheid van waterstof maximaal 0,0015 mL H₂/uur/g flitspoeder² (zie hoofdstuk 3 van bijlage 2).

Indicatie brand- en explosiegevaar door vorming van waterstofgas in Ulicoten

Er wordt aangenomen dat de vuurwerkartikelen zodanig nat zijn geworden dat het water is doorgedrongen tot het flitspoeder in de artikelen en dat er waterstof wordt gevormd en vrijkomt. Aan de hand van de vormingssnelheid van waterstof kan een inschatting worden gemaakt van de maximale hoeveelheid flitspoeder (in Cobra's) in de opslag in Ulicoten die zou kunnen leiden tot de vorming van een brandbaar en/of explosief waterstof-luchtmengsel (de minimale hoeveelheid waterstof die nodig is voor een explosief mengsel is 4,1 vol.-%, de onderste explosiegrens van waterstof). Er wordt verder uitgegaan van een reactietijd van 24 uur³ en daarbij wordt conservatief aangenomen dat de opslagruimten niet worden geventileerd⁴.

Het gevormde waterstofgas, ruim 14 keer lichter dan lucht, zal nadat het is gevormd vrijwel direct opstijgen en zich ophopen in de bovenste laag van de opslagruimte (aanname: geen ventilatie in de nok van het dak). In de berekening is met dit ongunstige scenario rekening gehouden door aan te nemen dat al het gevormde waterstofgas zich in de bovenste 1 meter van de opslagruimte zal ophopen⁵.

In het geval dat het waterstofgas niet door de ventilatieroosters kan ontsnappen, zal het gas onder het dak blijven hangen. De bunkers van Ulicoten hebben geen vlak dak, maar een puntdak. De grootste bunker in Ulicoten heeft een oppervlak van 200 m² (10x20 m). Om in 24 uur in de nok van het dak van de bunker de onderste explosiegrens van waterstof te bereiken, is minimaal 62.600 kg flitspoeder nodig dat geheel nat is geworden. De indicatieve berekening hiervoor is in bijlage 1 gegeven.

In de bunkers waar de vuurwerkartikelen met flitspoeder worden bewaard in Ulicoten bevinden zich echter ventilatieroosters in de onderzijde van de wanden en in de nok van het dak. Zoals gezegd, is waterstofgas een zeer licht gas en het is daarom aannemelijk dat het waterstofgas in de opslagruimte heel snel zal opstijgen en via de ventilatieroosters in de nok van het dak naar buiten zal treden en zich niet in de opslagruimte zal kunnen ophopen.

Gelet op de grootte van de bunkers is het in de praktijk niet mogelijk om een partij vuurwerk op te slaan die overeenkomt met de hiervoor berekende hoeveelheid flitspoeder. Bovendien zal het waterstof door de

² Voor artikelen met kleine hoeveelheden flitspoeder verwachten wij dezelfde vormingssnelheid van waterstof bij reactie met water, per gram flitspoeder.

³ In de regel zal veel eerder worden ingegrepen door hulpverleners en/of de bedrijfsvoering.

⁴ Waterstof zal zich ophopen in de bovenlaag van de ruimte, doordat het gas veel lichter is dan lucht. De ventilatie zal alleen effect hebben op de concentratie waterstof, als het bovenste deel van de ruimte ook geventileerd wordt.

⁵ Zoals beschreven in de Nederlandse praktijkrichtlijn: NPR 7910-1+C1, Gevarenclassificatie met betrekking tot explosiegevaar - Deel 1: Gasexplosiegevaar, gebaseerd op NEN-EN-IEC 60079-10-1:2009.

(geopende) ventilatieroosters in de nok van het dak ontsnappen. Het is dus zeer onwaarschijnlijk dat de onderste explosiegrens zal worden bereikt in deze bunkers. Nat geworden vuurwerk dat voornamelijk flitspoeder bevat en is opgeslagen in de bunkers zal geen reëel gevaar opleveren door waterstofgasvorming.

Overige factoren voor bevordering van waterstofproductie

In de meeste artikelen met flitspoeder zit ook zwart buskruit (niet gemengd met het flitspoeder, maar als aparte voorlading). In zwart buskruit zit onder andere kaliumnitraat (KNO_3) en zwavel (S). Aan sommige typen flitspoeder worden deze stoffen ook toegevoegd voor een hogere gevoeligheid (bijvoorbeeld zwavel) of kleureffect (bijvoorbeeld nitratozouten). In de literatuur wordt gemeld dat deze stoffen de reactie tussen water en aluminium kunnen versnellen. Daarom is de invloed van deze stoffen op de vormingssnelheid van waterstof onderzocht (zie parameter studie van bijlage 2). De door TNO uitgevoerde experimenten tonen aan dat de toevoegingen van KNO_3 en/of S niet leiden tot een snellere of hogere productie van waterstof. Zodoende kan worden gesteld dat de aanwezigheid van deze stoffen in het desbetreffende vuurwerkartikel niet zal leiden tot een hogere gevaarstelling bij nat vuurwerk met flitspoeder.

4. *Welke reactieproducten worden er gevormd van nat vuurwerk dat flitspoeder bevat?*

TNO heeft de samenstelling van het gas onderzocht dat wordt gevormd bij de reactie van flitspoeder met water. Uit deze analyse blijkt dat bij deze reactie alleen waterstofgas (H_2) wordt gevormd (zie hoofdstuk 3 van bijlage 2). Er worden dus geen andere gassen gevormd die eventueel voor een gevaar zouden kunnen zorgen. Daarom hoeft bij het bepalen van de gevaarstelling door de gevormde gassen van nat vuurwerk met flitspoeder alleen rekening te worden gehouden met de vorming van waterstofgas.

5. *Wat is de samenstelling van het flitspoeder in het opgedroogde vuurwerkartikel?*

De eigenschappen (uiterlijk en deeltjesgrootte) en samenstelling van het flitspoeder in een Cobra 6 zijn voor en na reactie met water bepaald met Scanning Electron Microscopy (SEM) en Röntgendiffractie (XRD) (zie hoofdstuk 5 (karakterisering) van bijlage 2).

Zowel voor als na de reactie met water blijkt uit de voornoemde analyses dat het flitspoeder voornamelijk is samengesteld uit kaliumperchloraat en aluminium. Na de reactie met water blijkt er een kleine amorfe fractie aanwezig te zijn, die is samengesteld uit aluminiumhydroxide ($\text{Al}(\text{OH})_3$). Op basis van deze informatie kan worden gesteld dat de samenstelling van het flitspoeder in het opgedroogde vuurwerkartikel nauwelijks is veranderd ten opzichte van het flitspoeder in het nat geworden vuurwerkartikel.

6. *Wat is de gevoeligheid voor initiatie (opwarming, schok, wrijving, etc.) van flitspoeder (in vuurwerk) voordat het nat is geworden en nadat het flitspoeder is opgedroogd (in vuurwerk)?*

In het onderzoek dat door TNO is uitgevoerd is de gevoeligheid voor stoot en wrijving getest van zowel droog (voor bevochtiging van) flitspoeder als flitspoeder dat is nat geworden en vervolgens is gedroogd (zie hoofdstuk 4 'Mechanische gevaren' van bijlage 2). Uit deze testen bleek dat flitspoeder dat nat is geweest minder gevoelig is voor stoot en wrijving dan flitspoeder dat niet nat is geworden. Dit betekent dat vuurwerk dat nat is geweest niet gevaarlijker is dan vuurwerk dat niet nat is geweest.

Daarnaast is de warmteontwikkeling gemeten tijdens de reactie van flitspoeder met water (zie hoofdstuk 2 'Thermische gevaren' van bijlage 2). Het flitspoeder werd hierbij gemengd met water in verschillende verhoudingen. Echter, bij geen enkele mengverhouding met water werd een significante warmteontwikkeling gemeten. Dit betekent dat bij het nat worden van vuurwerk dat flitspoeder bevat het zeer onwaarschijnlijk is dat er voldoende warmte wordt gegenereerd die kan leiden tot initiatie van het vuurwerkartikel.

Overige bevindingen

De zuurgraad heeft invloed op de reactiesnelheid van aluminium met water tot de vorming van waterstof. Om uit te sluiten dat de kartonnen kokers invloed hebben op de zuurgraad van het binnengedrongen water, werd de pH van het water waarin kartonnen kokers waren ondergedompeld gemeten gedurende 24 uur, zoals beschreven in bijlage 1. De pH bleef gedurende 24 uur ongewijzigd. Natte kartonnen kokers zullen zeer waarschijnlijk niet van invloed zijn op de vormingssnelheid van waterstof bij de reactie van water en flitspoeder, zoals die is gemeten voor los flitspoeder en water.

5. Beantwoorden van de hoofdkennisvraag en conclusie

Het bleek dat water onder de worst case condities redelijk snel door het karton heendringt, waarschijnlijk vooral langs het plastic dopje waarmee de onderzijde van de koker is afgedicht. Verder is aan de hand van experimenten vastgesteld dat een etiket de opname van water in de koker vertraagt. Aangezien het opgeslagen vuurwerk in het algemeen verpakt zal zijn in kartonnen dozen en/of plastic, is het aannemelijk dat deze verpakkingen het contact van flitspoeder met water verder zullen vertragen.

Bij het nat worden van flitspoeder ontstaat uitsluitend waterstof. De vorming van waterstof vindt echter zeer langzaam plaats (0,0015 mL H₂/uur/g flitspoeder).

Een indicatieve berekening van het RIVM wijst uit dat, om in 24 uur de onderste explosiegrens van waterstof te bereiken in een bunker van Ulicoten, er ten minste 62.600 kg flitspoeder nodig is dat geheel nat is

geworden en waarbij is aangenomen dat er geen sprake is van ventilatie. Gelet op de grootte van de bunkers is het in de praktijk niet mogelijk om een partij vuurwerk op te slaan die overeenkomt met deze hoeveelheid flitspoeder.

In Ulicoten zijn ventilatieroosters aanwezig in de nok van het dak van de opslagruimten voor vuurwerk en daardoor is het aannemelijk dat het zeer lichte waterstof dat ontstaat vrijwel direct zal opstijgen en via de geopende ventilatieroosters zal ontsnappen. Daarom is het aannemelijk dat de vorming van waterstof in deze bunkers geen gevaar voor brand en/of explosie zal opleveren.

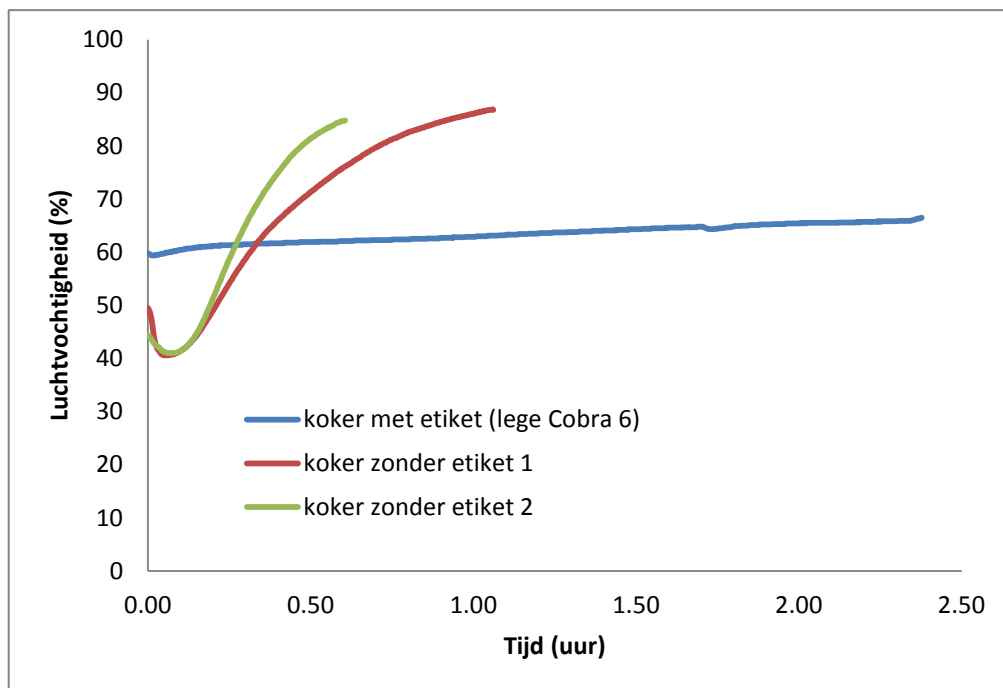
Daarnaast zal het nat worden van vuurwerk niet leiden tot het optreden van warmteontwikkeling die kan leiden tot initiatie van de opgeslagen vuurwerkartikelen en eventueel gevormd waterstofgas in de bunkers. Zodoende zijn er geen additionele risico's te verwachten van het nat worden van vuurwerk dat voornamelijk flitspoeder bevat ten opzichte van droog vuurwerk met flitspoeder.

Bijlage 1: Resultaten waterdoorlatendheid kartonnen kokers

Vochtigheid in kokers zonder vulstof

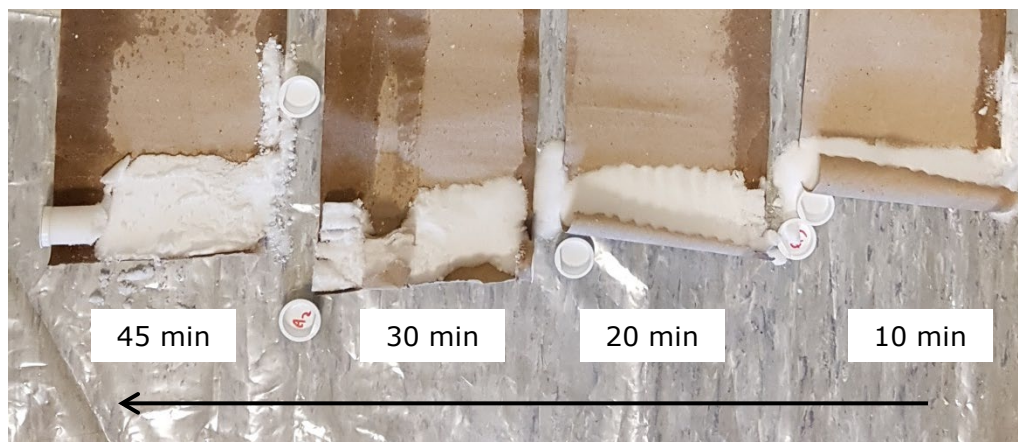


Figuur 1: Links de kartonnen kokers zonder etiket en rechts een lege Cobra 6 met etiket in water. De kokers zijn aan de onderzijde afgesloten met een plastic dopje. De luchtvochtigheidsmeter bevindt zich in de koker en aan de bovenzijde is de koker afgesloten met tape. De luchtvochtigheid, gemeten met de luchtvochtigheidsmeter, is in de volgende grafiek weergegeven.



Figuur 2: Luchtvochtigheid in de kokers als functie van tijd. De rode en de groene grafiek zijn gemeten in een kartonnen koker zonder etiket. De blauwe curve is gemeten in een lege Cobra 6 met een etiket. De luchtvochtigheid in de Cobra 6 is op een andere dag gemeten en begint daarom op een andere waarde. De luchtvochtigheid in de Cobra 6 met etiket stijgt veel langzamer dan die in een koker zonder etiket. Het etiket zorgt voor een langzamere opname van water in de koker.

Vochtigheid in kokers gevuld met vulstof



Figuur 3: Foto's van vier verschillende nat geworden, opengerolde kokers na 10, 20, 30 en 45 minuten onderdompeling in water. De kokers waren gevuld met keuzenzout en aan beide zijden met een plastic dopje afgedicht. De kokers waren op dezelfde manier ondergedompeld als in Figuur 1. Na 20 minuten is een klein gedeelte van het zout samengeklonterd. Na 45 minuten is het zout geheel samengeklonterd aan de onderzijde van de koker. Het water dringt waarschijnlijk vooral binnen langs het plastic dopje. Daarnaast vormt het zout ook een vaste laag aan de binnenwand van de koker.

Invloed kokers op pH (zuurgraad)

Een kartonnen koker zonder etiket en een koker met etiket (lege Cobra 6) werden elk gedurende 24 uur in een bakje met water gelegd. De pH van het water werd een aantal keer gemeten met teststrips. De pH veranderde gedurende deze periode van 24 uur niet en de pH-waarde bleef tussen de 6 en 7.

De pH kan van invloed zijn op de reactiesnelheid van water met flitspoeder. Het water dat in aanraking komt met de kartonnen kokers wordt dus niet zuur of basisch. Daarom is het niet aannemelijk dat natte kartonnen kokers invloed zullen hebben op de snelheid waarmee waterstof wordt gevormd in een koker met daarin flitspoeder dat reageert met water.

Berekening volume waterstof explosielimiet

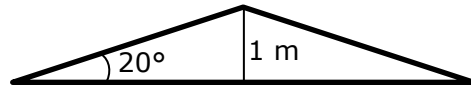
Het volume waarin het waterstofgas zich zal ophopen onder een schuin dak waarin geen ventilatieroosters aanwezig zijn, wordt gegeven door het oppervlak van de dwarsdoorsnede maal de lengte van de ruimte⁶ (conservatief: 20 m voor de grootste bunker). Aangenomen wordt dat het waterstofgas zich in de bovenste meter ophoopt⁷.

⁶ Volume = oppervlak x lengte; oppervlak driehoek = $\frac{1}{2} \times \text{breedte} \times \text{hoogte}$. De hoek van het dak (20°) is geschat van foto's van de opslag.

⁷ Zoals beschreven in de Nederlandse praktijkrichtlijn: NPR 7910-1+C1, Gevarensone-indeling met betrekking tot explosiegevaar - Deel 1: Gasexplosiegevaar, gebaseerd op NEN-EN-IEC 60079-10-1:2009.

$$\text{Oppervlak} = \frac{1}{2} \cdot b \cdot h = \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{\tan(20^\circ)} \cdot 1 = 2,75 \text{ m}^2$$

$$\text{Volume} = 2,75 \text{ m}^2 \cdot 20 \text{ m} = 55 \text{ m}^3$$



De onderste explosiegrens voor waterstof is 4,1 vol.-%. Deze grens zal dus behaald worden wanneer in dit volume 2,3 m³ waterstof zich ophoopt. Om in de nok van het dak de onderste explosiegrens te halen in 24 uur is 62.600 kg (62,6 ton flitspoeder) nodig, die geheel nat moet worden. Hierbij is uitgegaan van de door TNO bepaalde reactiesnelheid van 0,0015 mL H₂/uur/g flitspoeder. In een Cobra 6 zit ongeveer 30 g flitspoeder.

Bijlage 2: TNO rapportage

Memorandum

Aan
RIVM

Onderwerp
Rapportage metingen met flitspoeder en water

Defence, Safety & Security

Ypenburgse Boslaan 2
2496 ZA Den Haag
Postbus 480
2501 CL Den Haag

www.tno.nl

Datum
17 oktober 2019

Onze referentie
19EM/0626/Rev.1

1 Inleiding

In dit brieffrapport worden de resultaten van de metingen die zijn uitgevoerd om de gevaarszetting van nat geworden vuurwerk met flitspoeder als hoofdlading te bepalen. Initiële feedback van het RIVM is in deze versie verwerkt.

De metingen zijn uitgevoerd met flitspoeder dat afkomstig is uit de Cobra 6. Flitspoeders uit andere bronnen zijn niet gebruikt in dit onderzoek. Hoewel het in eerste instantie voor de hand lijkt te liggen om metingen uit te voeren met complete vuurwerk artikelen, is dit in de praktijk niet goed uitvoerbaar. Ten eerste omdat er geen (standaard) testmethoden zijn om de reactiviteit van artikelen met water te bepalen. De bestaande testen zijn ontworpen om de reactiviteit met water van relatief kleine hoeveelheden stoffen te meten. Hele vuurwerkartikelen passen niet monsterhouders. Er zou dus een test moeten worden ontwikkeld voor dit doel.

Wellicht nog belangrijker is dat wanneer complete artikelen worden getest, er veel factoren zijn die een betrouwbare meting hinderen. Door de omhulling (etiket, lijm karton, afdichtingsdoppen, doorvoer voor ontstekingslont, etc.) is de mate van blootstelling van het flitspoeder aan water niet constant en hoogstwaarschijnlijk ook niet reproduceerbaar. De uitkomst van een dergelijke meting is daardoor moeilijk, of misschien onmogelijk, naar de praktijk te vertalen.

Door aan de stoffen te meten wordt een 'worst case' situatie bepaald. Wanneer maatregelen worden genomen uitgaande van deze worst case, terwijl in de praktijk de gevaarszetting minder zal zijn, zijn de maatregelen in ieder geval afdoende.

De mogelijke gevaarszetting van nat geworden, en eventueel weer gedroogd, vuurwerk met flitspoeder als hoofdlading is in drie categorieën te onderscheiden:

- thermisch (kunnen broei-achtige verschijnselen optreden die eventueel leiden tot ontsteking van het vuurwerk)
- chemisch (reactie van water met aluminium onder vorming van waterstofgas)
- mechanisch (wordt het flitspoeder gevoeliger voor mechanische stimuli, zoals stoot en wrijving, wanneer het nat is geweest)

In onderstaande secties worden deze drie categorieën afzonderlijk behandeld. Tevens wordt een kwalitatieve analyse gegeven over hoe de inwerking van water het pyrotechnische mengsel beïnvloedt.

Tot slot wordt door middel van foto's inzichtelijk gemaakt wat de invloed van water op het pyrotechnische mengsel is. Om na te gaan wat de samenstelling van het pyrotechnische mengsel na contact met water is, worden de resultaten van XRD metingen aan onbehandeld flitspoeder gegeven en van deze metingen aan flitspoeder dat nat geweest is en weer gedroogd.

Datum

17 oktober 2019

Onze referentie

19EM/0626/Rev.1

Blad

2/13

2 Thermische gevaren

Er zijn aanwijzingen dat tijdens het incident in Ulicoten het vuurwerk 'warm is geworden'. Dit kon niet verder worden onderzocht omdat het betreffende vuurwerk direct is afgevoerd. Het incident trad op tijdens een warme (zomer-)periode.

Het klassieke broeiverschijnsel (zoals bijvoorbeeld bij hooi optreedt) is een oxidatieve zelfopwarming waarbij – in ieder geval in de kern van het materiaal – de warmteproductie (door ontleding) hoger is dan het warmteverlies naar de omgeving.

Bij de inwerking van water op vuurwerk of flitspoeder treedt een andersoortige reactie op waarbij zuurstof uit de lucht geen rol speelt. Wat eventueel wel tot opwarming zou kunnen leiden is een scenario waarbij de warmte die ontstaat door de reactie van water met aluminium, om welke reden dan ook, niet kan ontsnappen naar de omgeving waardoor de temperatuur toeneemt.

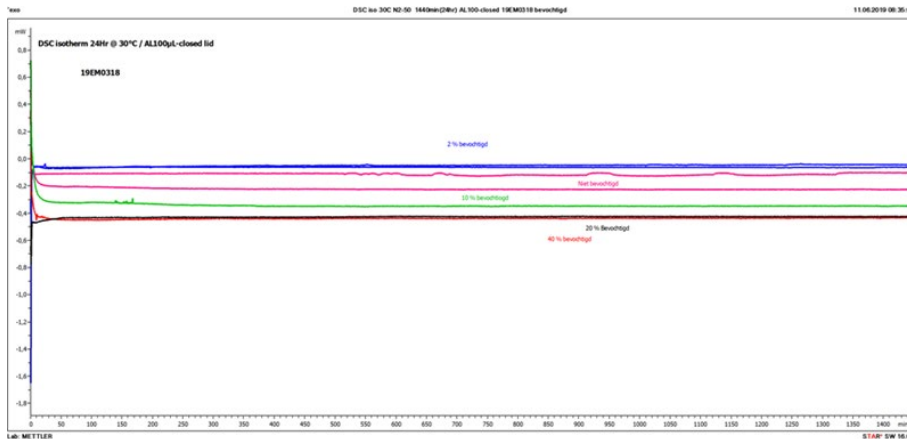
Om dit na te gaan zijn metingen met een 'differential scanning calorimeter' (DSC) uitgevoerd. Hierin worden thermische effecten (zowel endotherm als exotherm) van de te meten stof of het mengsel dat in een compatibele monsterhouder zit bepaald ten opzichte van eenzelfde lege monsterhouder. Met deze methode kunnen warmte-effecten tot 0,2 mW worden bepaald.

Toevoeging van water heeft een aantal effecten. Ten eerste kan er een reactie optreden met het in het flitspoeder aanwezige aluminium, hierbij komt warmte vrij. Ten tweede zal een deel van het eveneens aanwezige kaliumperchloraat oplossen waarvoor warmte nodig is. Ten derde zorgt de aanwezigheid van water voor een warmtebuffer: het aanwezige water moet de temperatuur aan gaan nemen van de omgeving. Welke effect de overhand heeft is niet op voorhand te voorspellen, maar verwacht wordt dat met kleine hoeveelheden water de thermische effecten het grootst zouden kunnen zijn.

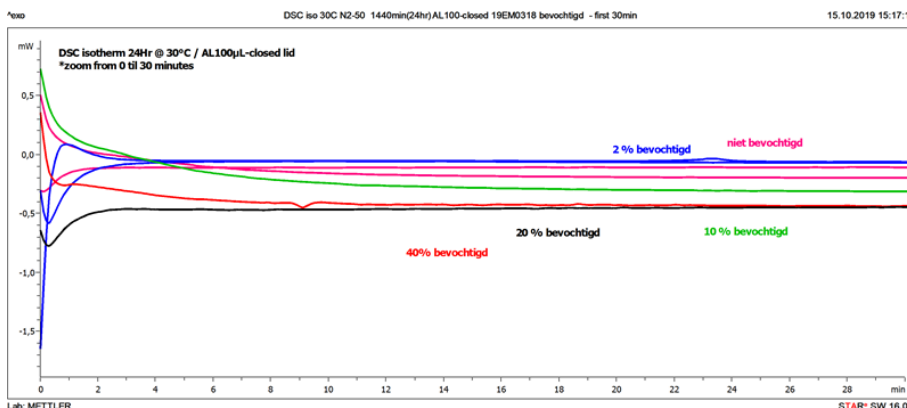
De DSC metingen zijn bij een constante temperatuur van 30 °C in gesloten inerte aluminium cupjes uitgevoerd. De massa van het monster was 20 mg, de metingen zijn gedurende 24 uur uitgevoerd.

Bij het toevoegen van water valt het op dat het water zich niet goed mengt met het flitspoeder vanwege de oppervlaktespanning van het water. Na het sluiten van het cupje is geschud om het contact te forceren. Daarna is het cupje zo snel mogelijk in de DSC geplaatst.

Omdat met 2 massa-% watertoevoeging nauwelijks tot geen thermische effecten waar te nemen zijn, zijn ook metingen uitgevoerd met 10, 20 en 40 massa-% watertoevoeging. De resultaten staan in figuur 1(a) en (b) weergegeven.



Figuur 1(a) Overzicht van de thermische metingen met flitspoeder en verschillende hoeveelheden toegevoegd water. Deze figuur wordt in de Annex groter weergegeven. De metingen zijn op verschillende dagen gedaan vandaar dat de 'nullijnen' niet helemaal samenvallen. Op de horizontale as staat de tijd in minuten. Let op dat de verticale as ingezoomd is, kleine verschillen worden relatief groot weergegeven.



Figuur 1(b) Detail van figuur 1a, waarin alleen de eerste 30 minuten worden weergegeven. In deze weergave lijken de lijnen al na een paar minuten horizontaal te lopen. Niet bevochtigd en met 2% water zijn in duplo uitgevoerd, de andere metingen in enkelvoud.

In figuur 1(a) lijkt het dat vanaf circa 40 à 50 minuten een stabiele situatie is bereikt, lopen de lijnen is essentie recht en worden er geen significante thermische effecten waargenomen.

In figuur 1(b) lijkt het beeld anders te zijn: reeds na circa 3 minuten is de situatie redelijk stabiel.

Deze paradox wordt veroorzaakt door de schaal van de assen; een klein bereik op de verticale as en een groot bereik op de horizontale.

De initiële effecten kunnen worden toegeschreven aan het op 30 °C brengen van het monster en de lucht die door het openen en sluiten van het deksel in de meetcel is gekomen.

In theorie zouden de grootste thermische effecten direct na het toevoegen van water kunnen optreden waardoor ze niet zichtbaar zijn in de metingen. Indien dit het geval is, dan zijn de thermisch effecten van dusdanig korte aard dat

Datum
17 oktober 2019

Onze referentie
19EM/0626/Rev.1

Blad
3/13

opwarming van de inerte massa van het karton van de vuurwerkartikelen én de verpakking niet plaatsvindt.

Indien het grootste thermische effect direct ná het toevoegen van water plaatsvindt houdt dit in dat de reactie met water – en dus de mate van vorming van waterstofgas – dan ook het hevigst is. Tijdens de bepaling van de hoeveelheid waterstofgas (zie hoofdstuk 3) zal blijken dat dit niet het geval is. Ook is bij de meeste lijnen in figuur 1(b) te zien dat deze een neergaande trend vertonen. Dat houdt in dat er warmte wordt opgenomen door het monster (endotherm effect), bijvoorbeeld door het oplossen van kaliumperchloraat. Dit wijst niet op (de mogelijkheid tot) zelfopwarming.

Bij geen van de geteste monsters worden significante thermische effecten waargenomen, hetgeen wijst op een warmteproductie van minder dan 0,01 W/g. Op grond van deze resultaten wordt het zeer onwaarschijnlijk geacht dat toevoeging van water kan leiden tot opwarming van het vuurwerk als gevolg van de reactie met water.

Datum

17 oktober 2019

Onze referentie

19EM/0626/Rev.1

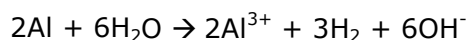
Blad

4/13

3 Chemische gevaren van nat gemaakt vuurwerk

Het chemische gevaar bestaat uit de vorming van het brandbare waterstofgas dat, binnen de grenzen van 4,1 en 74,8 vol-%, een explosief mengsel met lucht kan vormen.

De reactievergelijking is:



De (start van de) reactie wordt gehinderd door het, in principe altijd aanwezige, oxidelaagje op de aluminiumdeeltjes.

Een van de moeilijkheden bij het kwantitatief bepalen van waterstofgas is de geringe grootte van het molecuul. Hierdoor is het zeer lastig om een hermetische afdichting te verkrijgen en er dus vrijwel altijd waterstofgas zal weglekken.

Om de hoeveelheid waterstofgas die wordt gevormd kwantitatief in de tijd te kunnen volgen is gebruik gemaakt van een hermetisch afgesloten vaatje van Hastelloy-C met een volume van 100 ml, zie figuur 2. De afdichting vindt plaats door middel van met gas gevulde zilversringen.

Periodiek wordt uit het vaatje een gasmonster genomen waarvan de samenstelling wordt bepaald met een gaschromatograaf. Het vaatje wordt op een temperatuur van 30 °C gehouden.



Figuur 2 Het Hastelloy-C vaatje inclusief temperatuurregeling. De leidingen om gasmonsters te nemen ter bepaling van de samenstelling met een gaschromatograaf zijn gedeeltelijk zichtbaar.

Datum

17 oktober 2019

Onze referentie

19EM/0626/Rev.1

Blad

5/13

Voor de bepaling zijn twee vaatjes gebruikt. Door de monsternamen uit de vaatjes neemt de inwendige druk af, hiervoor wordt gecorrigeerd. Door middel van verificatieberekeningen is vastgesteld dat het gasmengsel zich als een ideaal gas gedraagt.

$$n = \frac{P.V}{R.T}$$

(1)

$$M_{comp} = \frac{n.MM.a}{100}$$

(2)

$$\frac{M_{comp}}{P.V.MM.a}$$

(1) en (2) geeft:

n=	aantal molen
P=	begindruk gas in Pa
V=	totaal volume gas in de container in m ³
R=	8,314 J/K
T=	temperatuur in K
MM=	molmassa in g/mol
a=	gehalte component in vol. %
Mcomp=	massa component in g

De benodigde hoeveelheid flijspoeder is in de Hastelloy vaatjes geplaatst en de benodigde hoeveelheid water in een plastic cupje dat tussen het flijspoeder werd geplaatst. Nadat het vaatje hermetisch is gesloten, wordt door middel van een

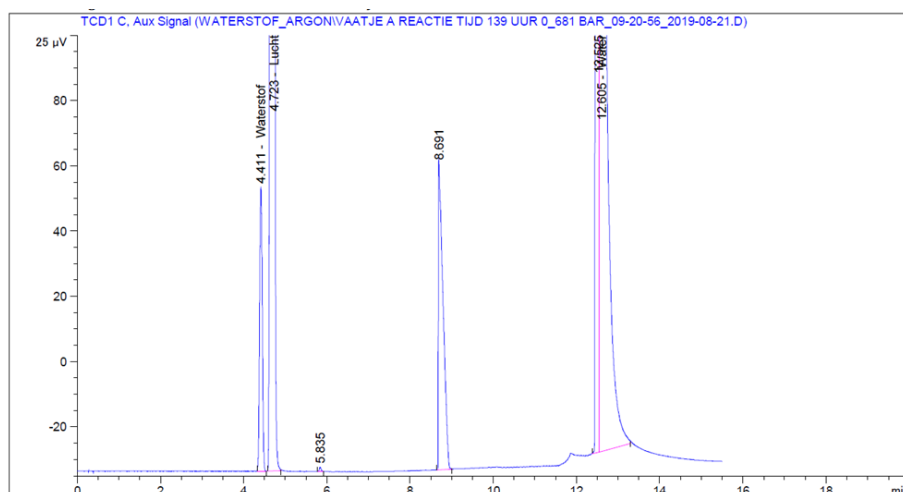
'roervlo' het cupje omgegooid waardoor het water in contact komt met het flitspoeder. Waterstofgas dat eventueel direct na het contact met water gevormd wordt, wordt op deze manier ook bepaald.

De resultaten van de metingen aan 5 gram flitspoeder met 10 massa-% water over een totale tijd van 139 uur staan gegeven in tabel 1 een chromatogram van een bepaling wordt gegeven in figuur 3.

Datum
17 oktober 2019

Onze referentie
19EM/0626/Rev.1

Blad
6/13



Figuur 3 Chromatogram van waterstof in lucht (piek 8.691 = CO₂). Het draaggas door de kolom is argon.

Behalve lucht en CO₂ (dat in de lucht aanwezig is) wordt alleen waterstof aangetoond, hetgeen in overeenstemming is met bovenstaande reactievergelijking.

Tabel 1 Resultaten van de kwantitatieve metingen aan waterstofgas m.b.v. gaschromatografie

Vaasje A			Vaasje B		
Tijd (uur)	H ₂ (ml)	ml/uur	Tijd (uur)	H ₂ (ml)	ml/uur
1,25	0,0014	0,0011	1,7	0,0112	0,0066
24	0,0958	0,0040	24	0,1460	0,0061
93	0,3065	0,0033	93	0,5639	0,0060
139	0,4083	0,0029	139	1,1053	0,0080

De vormingssnelheid van waterstofgas wordt gegeven als gemiddelde waarden over de betreffende tijd.

Opvallend is dat er ongeveer een factor 2 verschil in vormingssnelheid is tussen de twee bepalingen (die aan flitspoeder afkomstig uit één Cobra zijn uitgevoerd). Aangenomen mag worden dat het flitspoeder redelijk homogeen is. Voor de grote verschillen in gevormd gas is geen sluitende verklaring gevonden.

De snelheid waarmee het gas wordt gevormd is per vaasje redelijk constant. De resultaten duiden erop dat de reactie net zo lang doorgaat tot één van de twee reactanten op is.

De genoemde hoeveelheden gevormd waterstofgas hebben betrekking op 5 g flitspoeder. Aangenomen mag worden dat de hoeveelheid gevormd gas recht

evenredig is met de hoeveelheid reactanten (aluminium en water) . Omdat de exacte samenstelling van het flitspoeder niet bekend is wordt het gerelateerd aan de hoeveelheid flitspoeder. Uitgerekend per gram flitspoeder is, voor het geval van vaatje B de snelheid waarmee het waterstofgas wordt gevormd en de snelheid gemeten na 139 uur: circa 0,0015 ml per uur per gram flitspoeder.

Datum

17 oktober 2019

Onze referentie

19EM/0626/Rev.1

Blad

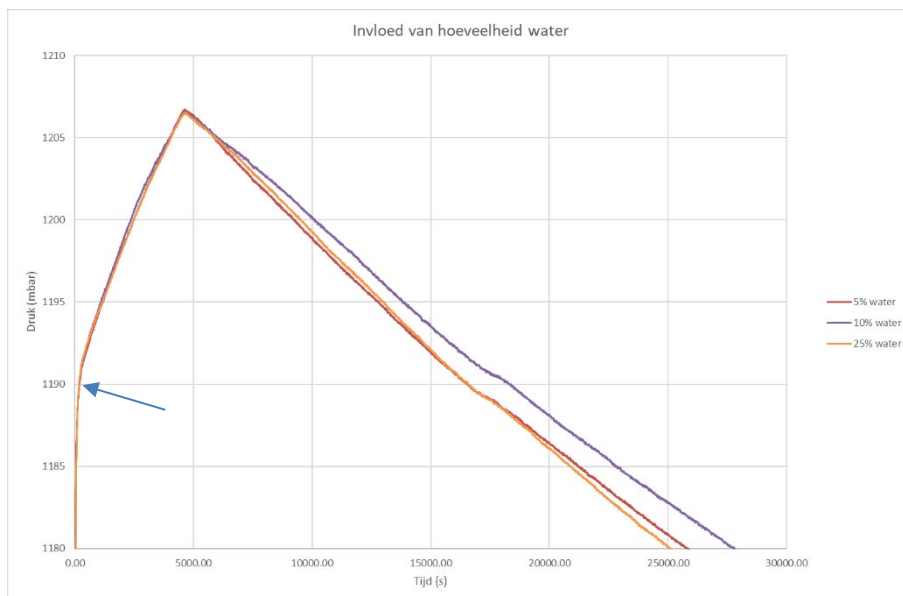
7/13

Parameter studie

De invloed van de aanwezigheid van kaliumnitraat, zwavel (in poedervorm) en kaliumnitraat/zwavel mengsel is kwalitatief bepaald.

Een hoeveelheid flitspoeder van 5 gram wordt, met toevoeging van water en eventuele additieven, in een afsluitbare glazen buis geplaatst die is voorzien van een drukopnemer. De druk in het gesloten vaatje wordt continu gemeten. De druktoename kan worden omgerekend naar een hoeveelheid gevormd gas. Uit de helling van de druktoename in de tijd kan de snelheid waarmee het gas wordt gevormd afgeleid.

De invloed van de hoeveelheid water is als eerste bepaald. Toegevoegde hoeveelheden van 5, 10 en 25 massa-% water zijn gemeten, zie figuur 4. In deze figuur is te zien dat de druk hoger is dan de atmosferische druk, circa 1,2 bar. Dit wordt veroorzaakt doordat de glazen houder van de drukopnemer in de glazen buis worden geschoven waardoor compressie van de aanwezige lucht optreedt. Hoewel dit in principe enige invloed kan hebben op de vorming van waterstofgas, blijkt deze druktoename in de praktijk redelijk constant tussen verschillende experimenten, waardoor de fout in redelijke mate constant is. Ook dit is een reden om deze metingen als kwalitatief te beschouwen, dus om de onderlinge invloed van factoren te bepalen.



Figuur 4 Detail van de grafieken om de invloed van de hoeveelheid water te bepalen. De totale meettijd bedroeg circa 80000 seconden. De curves zijn verticaal verschoven zodat de meetpunten bij de blauwe pijl samenvallen om de vergelijking eenvoudiger te maken.

Datum

17 oktober 2019

Onze referentie

19EM/0626/Rev.1

Blad

8/13

In het deel van de curve vóór circa 5000 seconden is voor alle drie hoeveelheden water een nagenoeg gelijke drukstijging (corresponderend met een nagenoeg gelijke hoeveelheid gevormd gas) en een nagenoeg gelijke drukstijgtijd te zien. De experimenten zijn in triplo uitgevoerd, voor de duidelijkheid is voor elke hoeveelheid water één curve weergegeven.

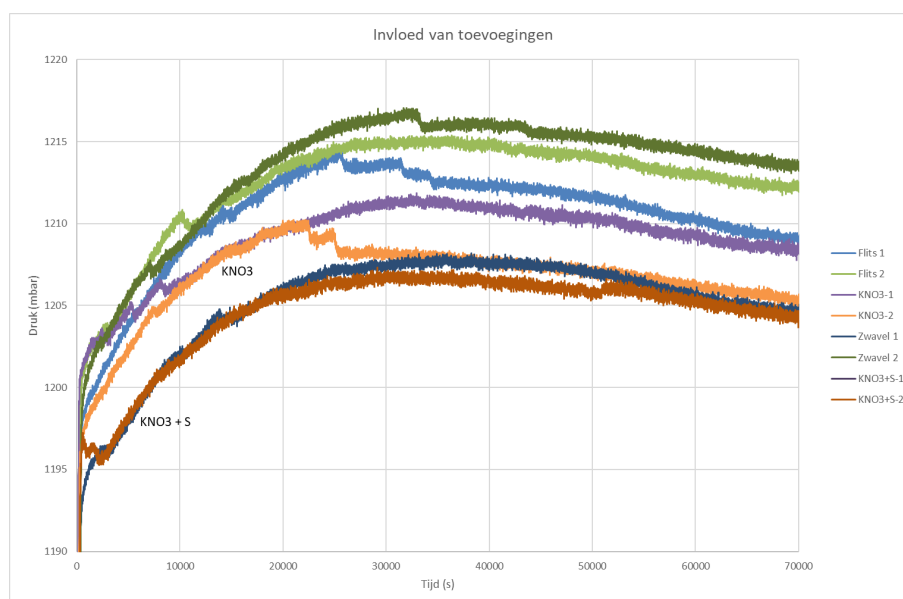
Ná circa 5000 s, wordt de lekkage van waterstofgas (ten gevolge van de hogere druk) groter dan de productie van waterstofgas waardoor de curven naar beneden gaan.

Op grond van deze metingen kan worden geconcludeerd dat er nauwelijks tot geen invloed van de hoeveelheid water op de hoeveelheid gevormd waterstofgas of de snelheid waarmee het gas vrijkomt is.

Bij kleinere hoeveelheden dan 5% water zou dit wellicht wel het geval kunnen zijn, maar boven deze hoeveelheid wordt de reactie bepaald door de hoeveelheid aluminium. Verwacht wordt dat kleinere hoeveelheden water, als dit al invloed heeft, leiden tot een lagere productie van waterstofgas. Hierom is dit verder niet onderzocht.

In de Cobra's zit ook een kleine hoeveelheid zwart buskruit om de ontsteekbaarheid betrouwbaarder te maken. In de literatuur wordt melding gemaakt dat nitraatzouten kunnen leiden tot een verhoging van de reactiesnelheid van water met aluminium. Om de invloed van de componenten van zwart buskruit op de reactie van het flitspoeder van de Cobra's te bepalen, zijn experimenten uitgevoerd met 5 g flitspoeder waaraan respectievelijk 5 massa-% kaliumnitraat, 5 massa-% zwavelpoeder en 5 massa-% kaliumnitraat plus 5 massa-% zwavel is toegevoegd. De hoeveelheid toegevoegd water is 10 massa-%.

De verzamelde metingen staan weergegeven in figuur 5.



Figuur 5 Verzamel grafieken om de invloed van toevoegingen te bepalen.

Figuur 5 geeft nagenoeg de totale meettijd weer die circa 21 uur bedroeg. Wanneer wordt ingezoomd op het eerste gedeelte van de curven zijn enige verschillen in de curven te zien, maar deze verschillen zijn niet consistent tussen de toevoegingen. Geconcludeerd wordt dat de invloed van zwart buskruit op de reactie van flitspoeder uit Cobra's verwaarloosbaar / marginaal is en in ieder geval niet leidt tot een hogere gasproductie. De waarden die voor 'puur' flitspoeder zijn bepaald geven dus de meest realistische en conservatieve waarden.

Datum
17 oktober 2019
Onze referentie
19EM/0626/Rev.1
Blad
9/13

4 Mechanische gevaren

De gevoeligheid voor stoot en wrijving is bepaald van het droge flitspoeder en van flitspoeder dat is bevochtigd met 15 massa-% water en na ca. 5 uur inwerktijd weer is gedroogd in een vacuümstoom bij 40 °C. Hiervoor zijn de BAM valhamer test en de BAM wrijvingstest gebruikt, zoals onder andere beschreven in de VN Manual of Tests and Criteria. De resultaten staan in tabel 2 weergegeven.

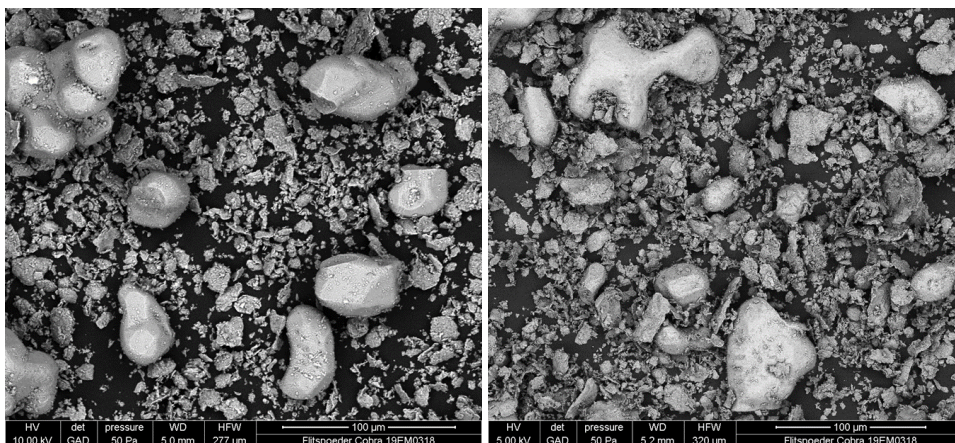
Tabel 2 Resultaten van de stoot- en wrijvingstesten aan flitspoeder dat al dan niet nat is geweest.

toestand	wrijvingsgevoeligheid	stootgevoeligheid
uitgangspuut	360 N	5 J
bevochtigd/gedroogd	> 360 N	20 J

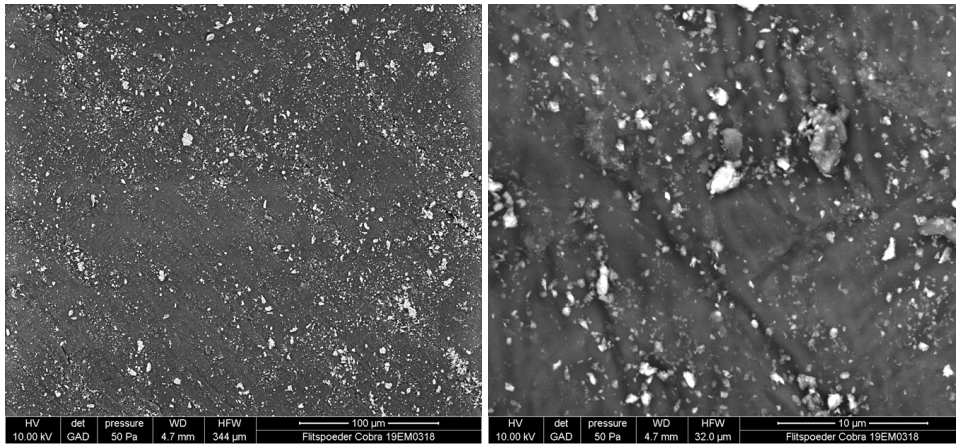
Uit tabel 2 wordt duidelijk dat de gevoeligheid afneemt voor bevochtigd en weer gedroogd flitspoeder. De gevoeligheid voor wrijving is voor het uitgangsmateriaal al relatief laag maar neemt nog verder af na bevochtiging en drogen. Voor de stootgevoeligheid is de afname in gevoeligheid groot (factor 4). Dit betekent dat het flitspoeder moeilijker tot reactie is te brengen en de gevaarszetting (onbedoelde initiatie) afneemt.

5 Karakterisering van het flitspoeder

In de figuren 6 en 7 staan foto's die met een Scanning Electron Microscope (SEM) zijn gemaakt van het pyrotechnische materiaal uit de Cobra 6.



Figuur 6 Algemeen overzicht van deeltjes in het flitspoeder.



Figuur 7 Beeld van de vlokvormige componenten in het flitspoeder.

Datum

17 oktober 2019

Onze referentie

19EM/0626/Rev.1

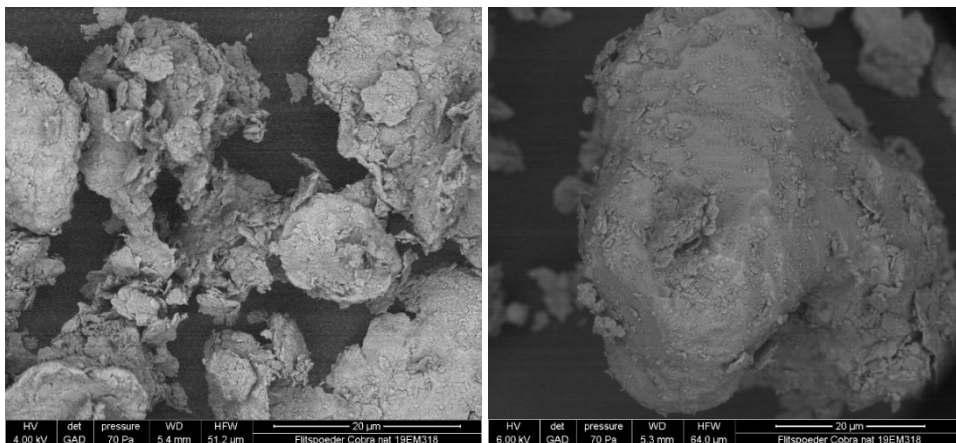
Blad

10/13

Enige kengetallen:

- Het flitspoeder bestaat voornamelijk uit poeders en een klein deel vlokken
- de grotere deeltjes (27 – 78 µm) zijn voornamelijk kaliumperchloraat en kleinere deeltjes (3 – 32 µm) aluminium
- de vlokken bestaan uit organisch materiaal met eraan gehecht wat aluminium (*de aard of bron van het organische materiaal is onbekend*)

In figuur 8 staan SEM foto's van het flitspoeder dat is bevochtigd met 15 massa-% water en na ca. 5 uur inwerktijd weer is gedroogd in een vacuümstoof bij 40 °C.



Figuur 8 SEM opnamen van flitspoeder dat bevochtigd is geweest en daarna weer is gedroogd.

De bevochtiging van het flitspoeder heeft geen grote veranderingen in het mengsel teweeggebracht.

De aluminium flakes plakken wat meer tegen de kaliumperchloraat kristallen dan in het originele monster en er lijkt enige verandering in de morfologie van het oppervlak van kaliumperchloraat kristallen.

Er is duidelijk een oxide laag aanwezig op de Al flakes, echter een toename van de oxide huid in vergelijking met de oorspronkelijke resultaten is aan de hand van deze opnamen niet te bepalen.

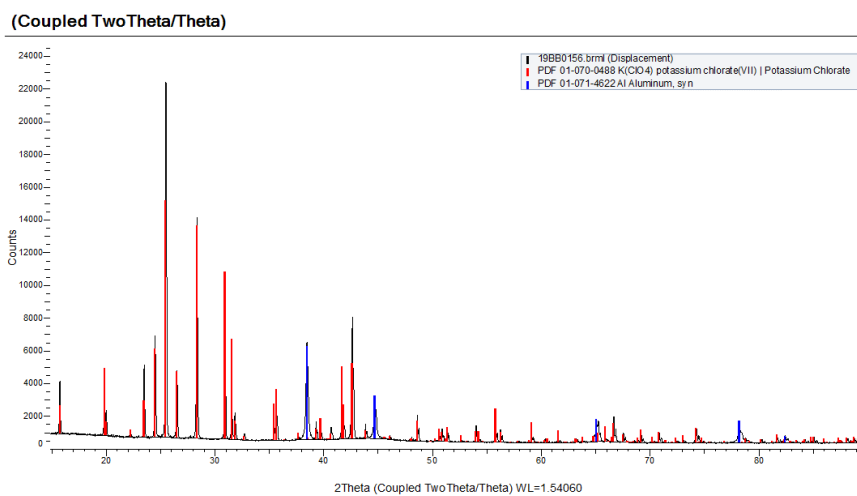
Datum
17 oktober 2019

Onze referentie
19EM/0626/Rev.1

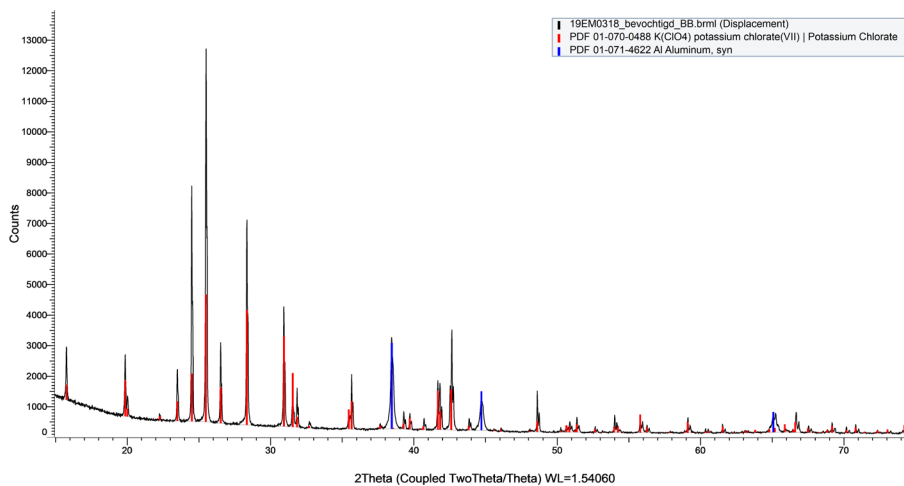
De invloed van water op het flitspoeder is ook met röntgendiffractie (XRD) bekeken.

Blad
11/13

In figuur 9 wordt het diffractogram van het flitspoeder (*zoals ontvangen*) weergegeven, in figuur 10 van flitspoeder dat is bevochtigd met 15 massa-% water en na ca. 5 uur inwerktijd weer is gedroogd in een vacuümstoom bij 40 °C.



Figuur 9 XRD diffractogram van flitspoeder (*zoals ontvangen*)



Figuur 10 XRD diffractogram van flitspoeder dat bevochtigd is geweest en daarna weer is gedroogd. (*N.B. de x-as heeft een kleiner bereik dan in figuur 8(a)*)

Met XRD kunnen alleen kristallijne stoffen worden aangetoond. In beide metingen worden uitsluitend kaliumperchloraat (*in de figuur aangeduid als "potassium chlorate (VII)"*) en aluminium waargenomen.

6 Conclusie

Op grond van de in deze rapportage beschreven metingen kan worden geconcludeerd dat de inwerking van water op flitspoeder niet leidt tot een verhoging van de gevaarszetting vanuit thermisch of mechanisch oogpunt. Het potentiële gevaar van het contact met water is, door de vorming van waterstofgas, wel aangetoond. De metingen wijzen uit dat de hoeveelheid water weinig tot geen invloed heeft op de hoeveelheid gevormd waterstof of op de vormingssnelheid. Ook de aanwezigheid van een aantal componenten van zwart buskruit (te weten kaliumnitraat en zwavel) heeft hier weinig tot geen invloed op. Het waterstof wordt gevormd met een snelheid van circa 0,0015 ml per uur per gram flitspoeder.

De getallen uit tabel 1, gemeten in vaatje B kunnen als uitgangspunt dienen om de diverse scenario's door te rekenen.

Variabelen in deze scenario's zijn onder andere de totale massa flitspoeder, het (vrije) volume van de opslagfaciliteit, het ventilatievoud van de opslagfaciliteit en eventueel de doordringbaarheid van karton voor water.

De invulling en het doorrekenen van deze scenario's maakt geen deel uit van dit onderzoek.

Zowel met SEM technieken als met XRD metingen zijn geen grote veranderingen in het flitspoeder waar te nemen.

Datum

17 oktober 2019

Onze referentie

19EM/0626/Rev.1

Blad

12/13

Datum
17 oktober 2019

Onze referentie
19EM/0626/Rev.1

Blad
13/13

