

Lange Kleiweg 137
2288 GJ Rijswijk
Postbus 45
2280 AA Rijswijk

www.tno.nl

T +31 88 866 80 00
F +31 88 866 69 49

TNO-rapport

TNO 2018 R10767

Technisch onderzoek naar de oorzaak van de ontbranding van een DM25 rookhandgranaat

Datum	13 juli 2018
Auteur(s)	P.A. Hooijmeijer, E.J. Kroon, R.H.B. Bouma, W. Duvalois
Rubricering rapport	Ongerubriceerd
Vastgesteld door	D.M. de Wit
Vastgesteld d.d.	8 juli 2021
Aantal pagina's	37
Aantal bijlagen	0

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht van het ministerie van Defensie werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van de opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de 'Modelvoorwaarden voor Onderzoeks- en Ontwikkelingsopdrachten' (MVDT 1997) tussen de minister van Defensie en TNO indien deze op de opdracht van toepassing zijn verklaard dan wel de betreffende ter zake tussen partijen gesloten overeenkomst.

© 2021 TNO

Samenvatting

Tijdens een oefening in het Stroesche Zand (Gelderland) is een Nederlandse militair ernstig gewond geraakt door de ontbranding van een DM25 rookhandgranaat ter hoogte van zijn middel. Naar aanleiding van het ongeval is een Defensie Commissie van Onderzoek (CvO) ingesteld. De CvO heeft onder andere als doelstelling de mogelijke oorzaak van het tot ontbranden komen van de DM25 vast te stellen. TNO is gevraagd ondersteuning te leveren bij de uitvoering van dit onderzoek.

Uit resultaten van een mechanisch testprogramma wordt geconcludeerd dat voorafgaand aan het ongeval de ongevalsgranaat in gekraakte stand stond waarbij de veiligheidspen uit minimaal twee van de borggaten is geschoven. De exacte bron en aard van de externe belasting op het veiligheidsmechanisme van de rookgranaat die dit hebben veroorzaakt, zijn niet bekend.

Uit experimentele trektesten op de veiligheidspen blijkt dat de gemeten trekkracht om de pen te verwijderen beduidend lager is in gekraakte stand waarbij de pen verschoven is tot aan de ril op de veiligheidsbeugel, dan in ongekraakte (geborgde/veilige) stand en in gekraakte stand waarbij de pen niet is verschoven tot aan de ril.

De rookgranaat is tot ontbranding gekomen doordat de veiligheidspen onder externe belasting naar de uiterste positie is geschoven met de punt van de pen in slechts één borggat van de veiligheidshefboom, waarna deze voldoende is geroteerd voor inslag van de slagpin op het slaghoedje, waarna onder druk van het tasje de pen is teruggeschoven in de hefboom. Dit scenario is experimenteel geverifieerd en wordt onderbouwd door de volgende constatering uit de analyse:

- Initiatie van de rookgranaat is opgetreden door inslag van de slagpin en niet door een chemisch proces in de ontsteker en/of granaatlichaam, of door initiatie van het slaghoedje door andere objecten of materiaal van buitenaf;
- De aanwezigheid van residu op de veiligheidspen na het ongeval bewijst dat deze tijdens het branden van de rookgranaat deels aanwezig was in de veiligheidshefboom;
- De aanwezigheid van residu aan de binnenzijde van de veiligheidshefboom met uitzondering van een driehoekig vlak op de binnen zijwanden van de hefboom, bewijst dat deze tijdens het branden ongeveer vijf en veertig graden geroteerd stond ten opzichte van de uitgangspositie in geborgde (veilige) stand;
- De vervorming van de veiligheidshefboom van de ongevalsgranaat kan niet zijn opgetreden met de hefboom in de geborgde (veilige) stand, maar wel in geroteerde stand.

Inhoudsopgave

	Samenvatting.....	2
1	Inleiding	4
1.1	Algemeen	4
1.2	Doelstelling.....	5
1.3	Opbouw rapport.....	5
2	Beschrijving DM25 rookhandgranaat	6
2.1	Algemeen	6
2.2	Functioneren	6
3	Visuele inspectie restanten.....	8
3.1	Granaatlichaam	8
3.2	Veiligheidshefboom	9
3.3	Ops vest.....	10
3.4	Nadere inspectie restanten	11
4	Analyse energetische materialen	15
4.1	EM in ontsteker	15
4.2	EM in granaat lichaam.....	16
4.3	Samenstelling residu op de granaat.....	17
4.4	Mogelijke chemische reacties	18
5	Analyse metalen	19
5.1	Inleiding.....	19
5.2	Resultaten	19
6	Experimenteel programma.....	20
6.1	Initiatie van de ontsteker door de slagpin	20
6.2	Initiatie van de ontsteker door een pin en valgewicht in geborgde (veilige) stand...26	
6.3	Initiatie van de rooklading met een squib in geborgde (veilige) stand	29
6.4	Mechanische testen.....	31
7	Analyse	32
8	Conclusies.....	35
9	Referenties.....	36
10	Ondertekening.....	37

1 Inleiding

1.1 Algemeen

Tijdens een oefening in het Stroesche Zand (Gelderland) is een Nederlandse militair ernstig gewond geraakt door de ontbranding van een DM25 rookhandgranaat ter hoogte van zijn middel. Deze rookhandgranaat zat op het moment van ontbranding in een tasje iets links van het midden bevestigd aan het ops vest van de militair. Na het ongeval zijn de restanten van de ongevalsgranaat en het ops vest door de KMAR veilig gesteld en gefotografeerd.

Naar aanleiding van het ongeval is een Defensie Commissie van Onderzoek (CvO) ingesteld. De CvO heeft onder andere als doelstelling de mogelijke oorzaak van het tot ontbranden komen van de DM25 vast te stellen.

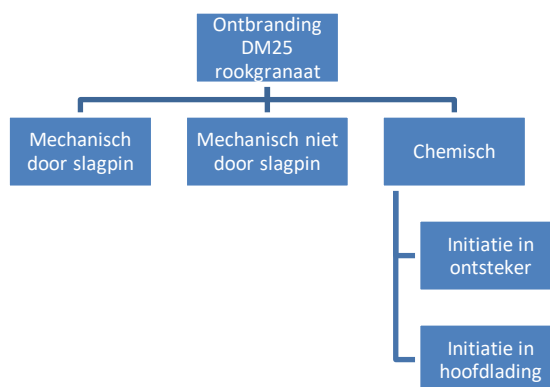
TNO is gevraagd ondersteuning te leveren bij de uitvoering van dit onderzoek vanwege de onafhankelijke positie van TNO, de domeinkennis op het gebied van munitieveilgheid en de onderzoeksfaciliteiten die TNO tot haar beschikking heeft.

De basis voor het onderzoek vormt een reeks onderzoeksvragen die door de CvO is opgesteld [1]. Aan de hand van deze onderzoeksvragen is een projectplan [2] opgesteld. Het huidige rapport beschrijft de resultaten van het onderzoek.

Voorafgaand aan de start van het onderzoek zijn de mogelijke oorzaken voor de ontbranding van de DM25 in kaart gebracht. Het onderzoek moet bewijs aanleveren voor een van deze oorzaken en moet de andere oorzaken uitsluiten.

Figuur 1 geeft de mogelijke oorzaken weer die hebben geleid tot de ontbranding:

- Mechanische belasting van de ontsteker door de slagpin (normaal functioneren);
- Mechanische belasting van de ontsteker door een ander object (foreign object);
- Initiatie van een van de energetische materialen in de ontsteker of in de hoofdlading door een chemisch proces.



Figuur 1 Flowchart met de mogelijke oorzaken voor de ontbranding van de DM25 rookgranaat.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van dit project is het beantwoorden van de onderzoeksvragen van de CvO om de mogelijke oorzaak van de ontbranding van de DM25 rookgranaat vast te stellen.

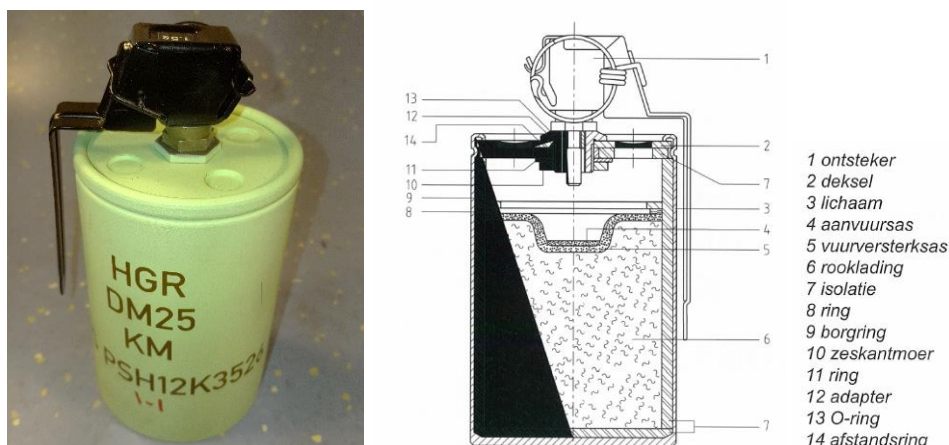
1.3 Opbouw rapport

Hoofdstuk 2 beschrijft de DM25 rookgranaat. De visuele inspectie van de restanten van het ongeval worden behandeld in Hoofdstuk 3. Hoofdstukken 4 en 5 geven resultaten van de analyses op de energetische materialen en metalen van de DM25. Hoofdstuk 6 beschrijft de resultaten van de experimentele testen, welke in Hoofdstuk 7 worden geanalyseerd. Hoofdstuk 8 levert de conclusies van dit onderzoek.

2 Beschrijving DM25 rookhandgranaat

2.1 Algemeen

De rookhandgranaat DM25 (Figuur 2) is een handgranaat waarvan het gebruik berust op zijn rookontwikkeling. De rookhandgranaat heeft het doel vijandig personeel het zicht te ontnemen en eigen personeel aan het zicht te onttrekken. Door de verbranding van de energetische hoofdvlading wordt gedurende 80 seconden een witte tot grijze rook geproduceerd.



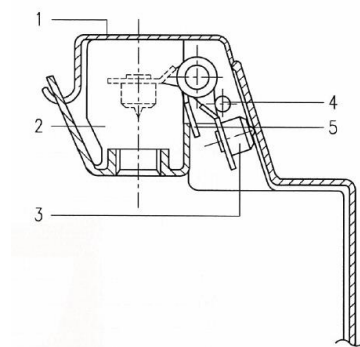
Figuur 2 DM25 rookhandgranaat [3].

Voor een uitgebreide beschrijving en de werking van de DM25 wordt verwezen naar [3]. Voor een goed begrip van het vervolg van dit rapport wordt in de volgende paragraaf kort ingegaan op het functioneren van de DM25.

2.2 Functioneren

De veiligheidshefboom is geborgd in het ontstekerlichaam door een veiligheidsspen (borgpen), zie Figuur 3. De veiligheidsspen kan worden verwijderd door deze eerst een kwartslag te draaien (te "kraken") met behulp van een ring (zichtbaar in rechterafbeelding in Figuur 2). Hierdoor komt een omgebogen arm van de veiligheidsspen buiten de hefboom, waarna de veiligheidsspen kan worden uitgetrokken. Zolang de gebruiker het granaatlichaam inclusief de veiligheidshefboom vasthoudt zal de slagpin geborgd blijven. Tijdens het werpen (de gebruiker laat het granaatlichaam en hefboom los) wordt de veiligheidshefboom, door de onder veerdruk staande slagpin, afgeworpen. De slagpin draait om zijn as en slaat met kracht in het slaghoedje, waardoor de ontsteking plaatsvindt. De vlam van het slaghoedje ontsteekt de explosieketen in de vertragsingsvlampijp, deze brandt ongeveer 1,5 seconden. Gedurende het verbranden van de vertraagsas wordt geen geluid of rook geproduceerd. Na het verlopen van de vertragingstijd ontsteekt de vuurversterksas van de vertragsingsvlampijp, de aanvuursas en de vuurversterksas in het granaatlichaam, die vervolgens de geperste rooklading van de handgranaat ontsteekt. Door de ontsteking en de daarop volgende drukverhoging wordt de afdichtingskit waarmee de vier uitstroomopeningen in het deksel van het granaatlichaam zijn afgesloten weggedrukt. Onder invloed van de inwendig opgebouwde gasdruk geeft dit een (harde) knal.

Door de verbranding van de rooklading wordt een witte tot grijze rook geproduceerd, die via de uitstroomopeningen in het deksel naar buiten komt.



aflb 3 detail ontstekingsmechanisme

- 1 veiligheidshefboom
- 2 ontstekerlichaam
- 3 slagpin
- 4 veiligheidspen
- 5 veer

Figuur 3 Detail ontstekingsmechanisme [3].

3 Visuele inspectie restanten

Op woensdag 9 mei 2018 heeft de CvO de restanten van het ongeval overgedragen aan TNO. Deze bestonden uit:

- Granaatlichaam ongevalsgranaat inclusief ontsteker en ontstekerlichaam;
- Veiligheidshefboom inclusief veiligheidspen;
- Ops vest van de militair.

3.1 Granaatlichaam

Het granaatlichaam vertoont sporen van blootstelling aan hoge temperaturen en verbranding (Figuur 4). De bodem en een groot deel van de wand van het granaatlichaam vertonen sporen van roetafzetting. De oorspronkelijke markering op de granaat is (deels) nog goed leesbaar: HGR DM25 KM LOS PSH11E3511.

Alle vier de uitstroomopeningen zijn door het functioneren van de granaat geopend. Duidelijk zichtbaar in de uitstroomopeningen, maar ook over het hele deksel van het lichaam en het ontstekerlichaam is een deels wit, deels zwart residu. Dit residu is veroorzaakt door de verbranding van de rooklading van de granaat. Tijdens de verbranding zijn hete en verbrande deeltjes van de rooklading naar buiten gestuwd die zich op de onderdelen van de granaat boven de uitstroomopeningen hebben afgezet. Waarschijnlijk is het zwarte residu veroorzaakt door het verbranden van het tasje waarin de granaat tot ontbranding kwam.

Visueel is vastgesteld dat de slagpin omgekapt was ten opzichte van de oorspronkelijke veilige stand naar de bedoelde eindpositie bij normaal functioneren van de granaat (zie Figuur 4, rechts). Het ontstekerlichaam en de ontsteker van het granaatlichaam zijn verwijderd voor nader onderzoek, zie paragraaf 3.4.



Figuur 4 Granaatlichaam met ontstekerlichaam en ontsteker van de ongevalsgranaat.

3.2 Veiligheidshefboom

De veiligheidshefboom vertoont ook sporen van blootstelling aan hoge temperaturen en verbranding (Figuur 5). Een vergelijkbaar residu als op het granaatlichaam is zichtbaar over een groot deel van de hefboom. Opvallend is de aanwezigheid van de veiligheidspin in één van de borggaten in de hefboom. Visuele inspectie van de pen toont aan dat op het deel van de veiligheidspen aan de binnenzijde van de hefboom hetzelfde residu aanwezig is als op het granaatlichaam en de hefboom, zie Figuur 6.



Figuur 5 Veiligheidshefboom en veiligheidspin van de ongevalsgranaat.

In een later stadium is de pen uit de hefboom verwijderd. De aanwezigheid van het residu op de veiligheidspen wordt behandeld in paragraaf 3.4.3.



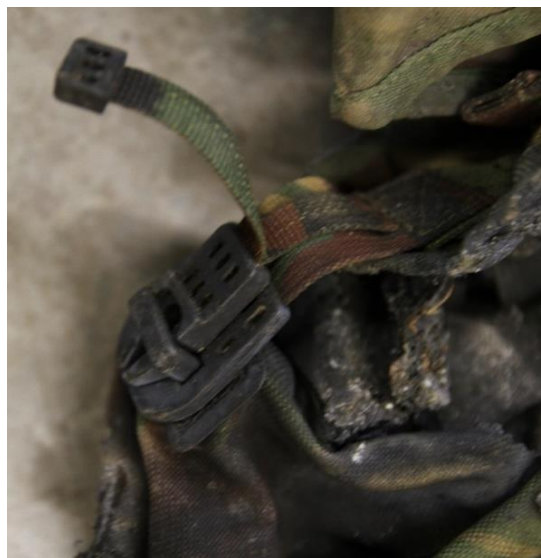
Figuur 6 Residu op de veiligheidspen aan de binnenzijde van de veiligheidshefboom.

3.3 Ops vest

Figuur 7 toont het ops vest van de gewonde militair. De voorzijde van het vest vertoont delen van gesmolten en verbrand materiaal over de volledige hoogte van het vest. Aan de onderzijde zijn vijf losse tasjes bevestigd waarvan het tasje iets links van het midden voor het grootste deel is gesmolten en verbrand. Dit is het tasje waarin de granaat tot ontbranding is gekomen. Ondanks de schade is zichtbaar dat de binnenzijde van dit tasje onderverdeeld is in 2 vakjes, beide gescheiden door een rekbaar stuk stof. Figuur 8 toont het plastic clipje waar mee het kapje van het tasje kan worden vastgezet om het tasje af te sluiten. Het is duidelijk te zien dat het kapje van het tasje vast zat en het tasje dus was afgesloten toen het ongeval plaatsvond.



Figuur 7 Ops vest van de gewonde militair.



Figuur 8 Clip van het tasje waarin de DM25 rookgranaat tot ontbranding is gekomen.

3.4 Nadere inspectie restanten

Het ontstekerlichaam, de ontsteker, de veiligheidshefboom met veiligheidsspen zijn aan een nadere inspectie onderworpen. Het ontstekerlichaam en de ontsteker zijn gezamenlijk van het granaatlichaam afgeschroefd waarna de ontsteker uit het ontstekerlichaam is gedraaid. De veiligheidsspen is uit de hefboom verwijderd.

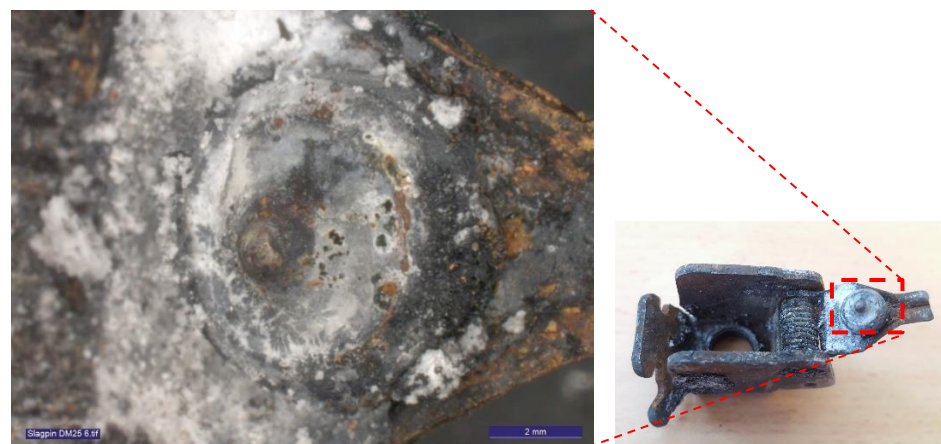
3.4.1 Ontstekerlichaam

Het ontstekerlichaam is aangetroffen na het ongeval met de slagpin omgeklapt naar de eindpositie; de slagpin is dus ingeslagen in het slaghoedje zoals ook gebeurd bij normaal functioneren, zie Figuur 9 links. De veer die de slagpin laat bewegen functioneert niet meer. Door het residu van de rooklading op het ontstekerlichaam en blootstelling aan hoge temperaturen is de slagpin in de getoonde positie vast komen te zitten. Met behulp van een tang kan de slagpin terug worden gedraaid, zie Figuur 9 rechts. Ook in deze positie levert de veer geen spanning meer.



Figuur 9 Ontstekerlichaam van de ongevalsgranaat: links in de positie zoals aangetroffen na het ongeval, en rechts na terugbuigen van de slagpin met behulp van een tang.

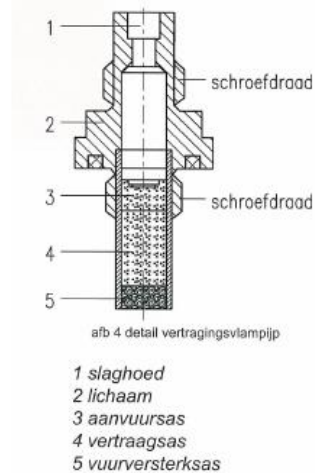
Het terugdraaien van de slagpin biedt de mogelijkheid de tip van de slagpin te inspecteren. Afgezien van kleine verbrandingsdeeltjes die zijn afgezet op de tip van de slagpin en de verkleuring van het materiaal door de hoge temperaturen zijn er geen bijzonderheden op te merken. De slagpin heeft een diameter van ongeveer 1,6 mm.



Figuur 10 Slagpin van de ongevalsgranaat.

3.4.2 Ontsteker

De ontsteker bestaat uit een stalen cilindrisch deel met in het midden een zeskant en schroefdraad. Hiermee kan de ontsteker in het deksel van het granaatlichaam en in het ontstekerlichaam worden geschroefd. In de bovenzijde van de ontsteker zit een slaghoedje geperst. Het vlampijpje aan de onderkant van de ontsteker is aan de onderzijde open.



Figuur 11 Doorsnedetekening van de ontsteker [3].

De bovenzijde van het slaghoedje is met een lichtmicroscop in detail bekeken (Figuur 12). Het slaghoedje vertoont tekenen van verbranding en een kleine hoeveelheid residu. Duidelijk zichtbaar is een indrukking iets links uit het midden. Deze indrukking is veroorzaakt door inslag van de tip van de slagpin. De diameter van de indrukking is ongeveer 1,6 mm, wat overeenkomt met de diameter van de tip van de slagpin. De slagpin is dus met kracht ingeslagen op het slaghoedje.



Figuur 12 Details van de ontsteker uit de ongevalsgranaat (links: bovenzijde slaghoedje; rechts: vlampijpje).

Het vlampijpje kan uit het bovenste deel van de ontsteker worden geschroefd. Het oppervlak van het buisje is aangetast door het verbranden van de rooklading en de blootstelling aan hoge temperaturen. Het onderste deel van het vlampijpje vertoont aan de buitenzijde een wit residu, dit wordt ook aan de binnenzijde van het vlampijpje aangetroffen. De sassen in het vlampijpje zijn opgebrand.

3.4.3 Veiligheidspen

De veiligheidshefboom is na het ongeval gevonden met de veiligheidspen door één van de borggaten in de hefboom. Er is vastgesteld dat er zich op de pen materiaal heeft afgezet als gevolg van het branden van de rooklading (zie Figuur 6). Tijdens het verwijderen van de pen uit het borggat van de hefboom wordt het grootste deel van dit residu van de pen afgeschraapt. Dit is vastgelegd op video waarvan vier snapshots worden weergegeven in Figuur 13. Het is dus onmogelijk dat dit residu op de pen is gekomen en dat de pen daarna in de veiligheidshefboom is (terug)geplaatst. Dit komt overeen met de foto documentatie van de KMAR [4,5] waarop zichtbaar is dat op de vindplaats van de veiligheidshefboom de pin nog in de hefboom zit. Uit deze observaties blijkt dat de veiligheidspen tijdens het branden van de rookgranaat in tenminste één borggat van de veiligheidshefboom zat.



Figuur 13 Verwijderen van de veiligheidspen; uitgangspositie (linksboven), enkele millimeters losgetrokken (rechtsboven), enkele millimeters resterend (rechtsonder) en geheel verwijderd (rechtsonder).

Tevens is vastgesteld dat de veiligheidspen uit het ongeval enigszins krom was, zie Figuur 14. De lengte van de pen van de ongevalsgranaat is niet afwijkend van de lengte van pennen uit andere granaten.



Figuur 14 De enigszins kromme veiligheidspen van de ongevalsgranaat (rechts) en een rechte pen (links) die is verwijderd uit de veiligheidshefboom bij normaal functioneren.

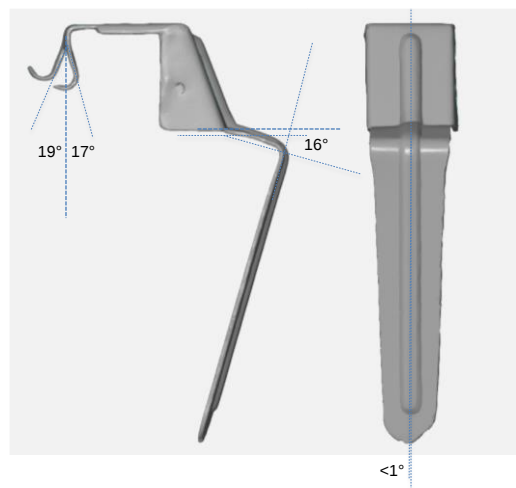
3.4.4 Veiligheidshefboom

Na verwijderen van de pen kan de veiligheidshefboom in detail worden geïnspecteerd. De binnenzijde van de hefboom is vrijwel volledig bedekt met residu door het branden van de rooklading, zie Figuur 15. Dit betekent dat de veiligheidshefboom zich tijdens het branden van de rookgranaat in de directe omgeving van de uitstromende gassen bevond. Opvallend is dat er zich geen residu heeft afgezet op een driehoekig vlak naast het borggat aan beide binnen zijwanden van de hefboom (deze locatie is met een pijl aangegeven in Figuur 15).



Figuur 15 Residu aan de binnenzijde van de veiligheidshefboom. Een driehoekig vlak naast het borggat aan beide binnen zijwanden van de hefboom is niet bedekt met residu.

Het handvat en de twee gekromde uiteinden van de hefboom, waarmee deze in het ontstekerlichaam haakt, zijn vervormd ten opzichte van hun oorspronkelijke positie. Om de vervorming goed in kaart te brengen is een 3D scan¹ gemaakt van de hefboom nadat deze ultrasoon is gereinigd. De 3D scanner levert een nauwkeurigheid van 0.04 mm, zie Figuur 16.



Figuur 16 Twee aanzichten van een 3D scan van de veiligheidshefboom van de ongevalsgranaat.

De 3D scan maakt duidelijk dat de twee gekromde uiteinden van de hefboom tegengesteld aan elkaar zijn verbogen met ongeveer 17° en 19° graden. Ook is het handvat verdraaid over een hoek van 16° graden, alsook licht zijwaarts (< 1°). Deze vervormingen zijn het gevolg van externe belastingen.

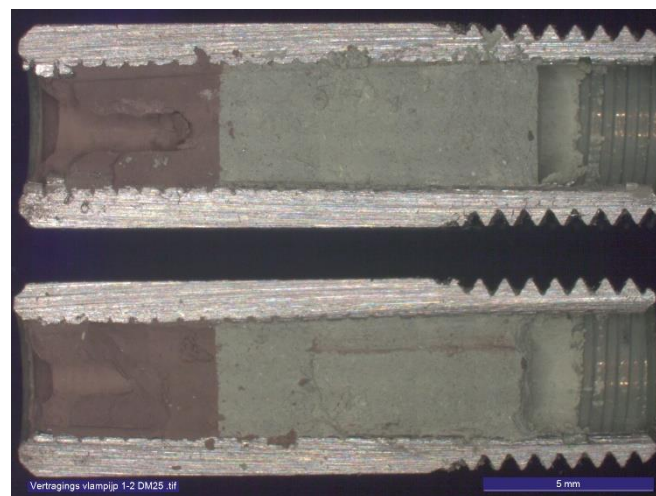
¹ Gegevens 3D scanner: ATOS compact scan 5M (blue light scanner) firma GOM.

4 Analyse energetische materialen

Onderzoek is uitgevoerd naar de chemische samenstelling van de Energetische Materialen (EM) aanwezig in de rookgranaat DM25 en van het residu op de granaat na functioneren. Röntgen Diffractie Analyse (XRD) en Scanning Electron Microscopy (SEM) met Energy Dispersive analysis of X-radiation (EDX) zijn ingezet om de samenstelling van de EM vast te stellen. Een uitgebreide beschrijving van de analyse is te vinden in [6].

4.1 EM in ontsteker

Voor het onderzoek naar de EM in de ontsteker van de DM25 zijn drie ontstekers gebruikt uit drie verschillende lots DM25 rookgranaten. Een extra ontsteker is gebruikt die afkomstig is uit de vijf resterende granaten die voor de oefening waren uitgereikt op de dag van het ongeval. Van deze vier ontstekers is het vlampijpje uit het bovendeeel van de ontsteker geschroefd. Vervolgens is het vlampijpje in de lengte doorgezaagd met behulp van een diamantzaag, zie Figuur 17. Er zijn twee composities zichtbaar in tegenstelling tot de drie composities zoals beschreven in het Munitievoorschrift [3]: namelijk een aanvuursas, vertraagsas en een vuurversterksas (zie Figuur 11). De groene compositie in Figuur 17 is de vertraagsas, de bruine compositie de vuurversterksas.



Figuur 17 Lichtmicroscopieopname van een in de lengte doorgezaagd vlampijpje.

Het slaghoedje in het bovenste deel van de ontsteker is uit het huis gedrukt met speciaal gereedschap. Het slaghoedje bestaat uit een metalen omhulsel, in het omhulsel zit een mix van EM en een metalen aambeeld.

Van alle drie de EM uit de vier ontstekers is een klein sample genomen voor de analyse van de compositie.

De samenstelling van de EM in de ontsteker is weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1 Samenstelling van de EM in de ontsteker van de rookgranaat DM25.

Component	Lot nr.	Chemische samenstelling
Primer slaghoed 1-2	PSH12K3526	$C_6H_3N_3O_9Pb$ (Loodstyfnaat), PbO_2 , $Ba(NO_3)_2$, Sb_2S_3
Primer slaghoed 2-2	PSH12-010	$C_6H_3N_3O_9Pb$ (Loodstyfnaat), PbO_2 , $Ba(NO_3)_2$, Sb_2S_3
Primer slaghoed 3-2	PSH11E3511	$C_6H_3N_3O_9Pb$ (Loodstyfnaat), PbO_2 , $Ba(NO_3)_2$, Sb_2S_3
Primer slaghoed Oef-1	PSH11E3511	$C_6H_3N_3O_9Pb$ (Loodstyfnaat), PbO_2 , $Ba(NO_3)_2$, Sb_2S_3
Vertraagsas 1-2	PSH12K3526	$Ba(CrO)_4$, $KClO_4$, W, Zr
Vertraagsas 2-2	PSH12-010	$Ba(CrO)_4$, $KClO_4$, W, Zr
Vertraagsas 3-2	PSH11E3511	$Ba(CrO)_4$, $KClO_4$, W, Zr
Vertraagsas Oef-1	PSH11E3511	$Ba(CrO)_4$, $KClO_4$, W, Zr
Vuurversterksas 1-2	PSH12K3526	$Ba(CrO)_4$, PbO_2 , Zr
Vuurversterksas 2-2	PSH12-010	$Ba(CrO)_4$, PbO_2 , Zr
Vuurversterksas 3-2	PSH11E3511	$Ba(CrO)_4$, PbO_2 , Zr
Vuurversterksas Oef-1	PSH11E3511	$Ba(CrO)_4$, PbO_2 , Zr

De samenstelling van de composities is identiek voor de geteste lots.

4.2 EM in granaat lichaam

Het granaatlichaam is geopend door deze met behulp van een op afstand bestuurbare draaibank net onder het deksel, maar boven de rooklading, af te draaien. Na verwijdering van het deksel is een ring zichtbaar met direct daaronder een folie met een aanvuursas, zie Figuur 18. Onder het folie met de aanvuursas bevindt zich de rooklading (geel) met daarop een laag van het vuurversterksas (wit). De rooklading heeft een centrale holte, met daarin een rasterpatroon.



Figuur 18 Boven aanzicht na openen granaatlichaam; een afsluitring is zichtbaar met daaronder een folie met een aanvuursas (links). Hieronder bevindt zich de rooklading met daarop een vuurversterksas en een centrale holte (rechts).

De samenstelling van de EM in het granaatlichaam is weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2 Samenstelling van de EM in het granaatlichaam van de rookgranaat DM25.

Component	Chemische samenstelling	
Aanvuursas lichaam 1-3	PSH12K3526	KNO ₃ , Mg
Aanvuursas lichaam 2-3	PSH12-010	KNO ₃ , Mg
Aanvuursas lichaam 3-3	PSH11E3511	KNO ₃ , Mg
Aanvuursas lichaam Oef-5	PSH11E3511	KNO ₃ , Mg
Vuurversterk lichaam 1-3	PSH12K3526	KNO ₃ , Mg, CaCO ₃
Vuurversterk lichaam 2-3	PSH12-010	KNO ₃ , Mg, CaCO ₃
Vuurversterk lichaam 3-3	PSH11E3511	KNO ₃ , Mg, CaCO ₃
Vuurversterk lichaam Oef-5	PSH11E3511	KNO ₃ , Mg, CaCO ₃
Rooklading 1-3	PSH12K3526	KNO ₃ , KCl, Mg, KClO ₄ , C ₂ H ₄ N ₄ O ₂ (Azodicarbonamide), C ₆ H ₁₀ O ₄ (Adipinezuur)
Rooklading 2-3	PSH12-010	KNO ₃ , KCl, Mg, KClO ₄ , C ₂ H ₄ N ₄ O ₂ (Azodicarbonamide), C ₆ H ₁₀ O ₄ (Adipinezuur)
Rooklading 3-3	PSH11E3511	KNO ₃ , KCl, Mg, KClO ₄ , C ₂ H ₄ N ₄ O ₂ (Azodicarbonamide), C ₆ H ₁₀ O ₄ (Adipinezuur)
Rooklading Oef-5	PSH11E3511	KNO ₃ , KCl, Mg, KClO ₄ , C ₂ H ₄ N ₄ O ₂ (Azodicarbonamide), C ₆ H ₁₀ O ₄ (Adipinezuur)

De samenstelling van de composities is identiek voor de geteste lots.

4.3 Samenstelling residu op de granaat

De samenstelling van het residu op de ongevalsgranaat is vergeleken met het residu van een granaat die in een tasje door TNO is afgevuurd. Voor de vergelijking is het residu gebruikt in/nabij de uitstroomopeningen en op/nabij de slagpin en het slaghoedje. Omdat in paragraaf 4.1 en 4.2 is aangetoond dat de samenstelling van de EM in de bestudeerde lots identiek is, is er voor gekozen dit vergelijk te maken voor de ongevalsrookgranaat en een rookgranaat uit één ander lot. De analyse is uitgevoerd door middel van Röntgen Diffractie Analyse (XRD).

De samenstelling van het residu is weergegeven in Tabel 3.

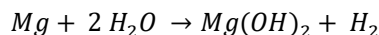
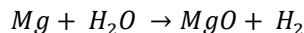
Tabel 3 Samenstelling van het residu op de granaat.

Component	Chemische samenstelling	
Body 1-1 residu	PSH12K3526	KCl, MgO, K ₂ CO ₃ , K ₂ CO ₃ .1.5H ₂ O
Pin 1-1 residu	PSH12K3526	KCl, MgO
Body Ong. granaat residu	PSH11E3511	KCl, MgO, K ₂ CO ₃ , K ₂ CO ₃ .1.5H ₂ O
Pin Ong. Granaat residu	PSH11E3511	KCl, MgO

De samenstelling van het residu is identiek voor de beide granaten. Het verschil tussen de samenstelling van het residu in/nabij de uitstroomopening en op/nabij de slagpin heeft te maken met een verschil in omgevingscondities; de temperatuur, menging met zuurstof en interactie met metalen componenten is anders voor de uitstroomopening dan voor de slagpin. Dit verschil wordt niet veroorzaakt door de aanwezigheid van materialen die van buitenaf op deze locaties terecht zijn gekomen. Er zijn dus geen afwijkende materialen aangetroffen op de ongevalsgranaat die mogelijk hebben bijgedragen aan de ontbranding.

4.4 Mogelijke chemische reacties

Wanneer magnesium in aanraking komt met vocht dan leidt dit tot de vorming van magnesium oxide dan wel magnesium hydroxide onder afsplitsing van waterstof in gasvorm, respectievelijk volgens:



Het waterstof kan vervolgens reageren met het kaliumnitraat in de rooklading tot ammoniak, volgens:



Er zijn ook andere reacties mogelijk die leiden tot de vorming van ammoniak. In de literatuur (zie [6] voor details) wordt de afsplitsing van stikstof uit azodicarbonamide genoemd. Deze stof wordt in de plastics industrie gebruikt als blaasgas voor de vorming van schuimen. In de aanwezigheid van vocht zal azodicarbonamide bij temperatuurverhoging ontleden in onder meer stikstof, kooldioxide en ammoniak. Zowel waterstof als ammoniak zijn ongewenste gassen vanwege brandbaarheid, toxische en/of reactieve eigenschappen.

In de literatuur wordt geclaimd dat de toevoeging van een dicarbonzuur of een mengsel van dicarbonzuren in de rooklading, bijdraagt aan de chemische stabiliteit doordat vaste ammoniumzouten worden gevormd. De toevoeging van adipinezuur aan de rooklading is kwalitatief vastgesteld. De toevoeging van dit dicarbonzuur onderdrukt (in enige mate) de vorming van gasvorming ammoniak. De kwantitatieve samenstelling van de rooklading is niet vastgesteld, en daarmee is de theoretische capaciteit om ammoniak te binden als vast ammoniumzout niet bekend. De vorming van een ammoniumzout is in het onderzoek niet in het XRD diagram waargenomen².

² De aanduiding ammoniumzout is een ruim begrip en vele zouten zijn denkbaar op basis van de elementen aanwezig in de rooklading.

5 Analyse metalen

5.1 Inleiding

De metalen componenten van de ontsteker zijn onderzocht met behulp van Scanning Electron Microscopy (SEM) met Energy Dispersive analysis of X-radiation (EDX)³. De SEM is gebruikt bij een versnellingsspanning van 5 tot 15 kV in hoog vacuüm modus. Er is een BackScatter Elektronen (BSE) detector toegepast voor beeldvorming met "materiaal contrast". De SEM is voorzien van een Noran micro-analysesysteem voor het analyseren van de chemische samenstelling.

Voor het onderzoek is een ontsteker gedemonteerd en zijn de energetische materialen uit het slaghoedje en het vlampijpje verwijderd. Vier losse componenten zijn geanalyseerd:

1. Slaghoedje;
2. Aambeeld uit het slaghoedje;
3. Ontstekerlichaam;
4. Vlampijp.



Figuur 19 Metalen onderdelen van de ontsteker.

5.2 Resultaten

Het slaghoedje en het aambeeld uit het slaghoedje bestaan uit een combinatie van Zink en Koper. De verhouding gewichtspercentage Koper – Zink geeft aan dat beide componenten uit Messing bestaan. Het ontstekerlichaam en de vlampijp zijn gemaakt van staal met een Zink – Fosfor coating als bescherm laag tegen corrosie.

De metalen zijn vergeleken met de EM in de ontsteker en de vlampijp. Er zijn bij TNO geen compatibiliteitsproblemen bekend voor de combinatie van deze metalen met deze EM.

³ De SEM die bij TNO Rijswijk is gebruikt is een FEI NovaNanoSEM 650.

6 Experimenteel programma

In een experimenteel programma zijn granaten vergeleken die zijn afgevuurd door:

- initiatie van de ontsteker met de slagpin;
- initiatie van de ontsteker met behulp van een pin en valgewicht in geborgde (veilige) stand van de veiligheidshefboom en slagpin;
- initiatie van de rooklading met een vlam genererende squib in geborgde (veilige) stand van de veiligheidshefboom en slagpin.

Bij alle experimenten is de veiligheidshefboom zodanig boven één van de uitstroomopeningen geplaatst dat de positie overeenkomt met die van de hefboom tijdens het ongeval.

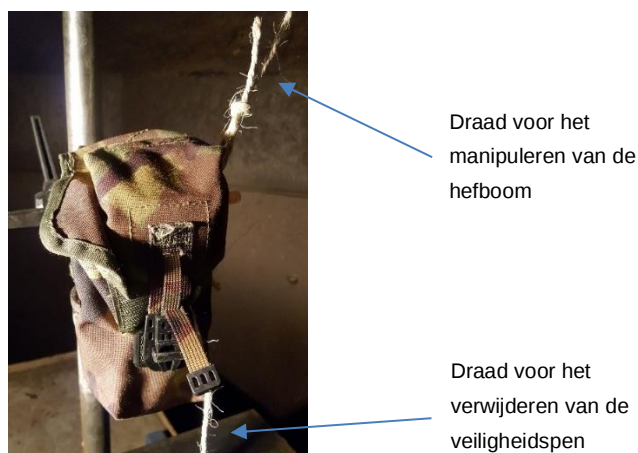
Een serie mechanische testen is uitgevoerd door het Kennis Centrum Wapensystemen en Munitie (KCWM) van het Ministerie van Defensie [7,8,9,10,11].

6.1 Initiatie van de ontsteker door de slagpin

6.1.1 Testopstelling

De experimenten zijn uitgevoerd in een van de bunkers op het TNO terrein. De meeste experimenten zijn uitgevoerd in hetzelfde tasje waarin het ongeval heeft plaatsgevonden. De manier waarop de veiligheidshefboom van de DM25 rookgranaat in of buiten het tasje is geplaatst is gevarieerd. De granaat en het tasje zijn in de bunker aan een stalen paal met een laboratoriumklem vastgezet. Een draad is verbonden aan de ring van de veiligheidspen. Deze draad is door een gat in de bunkermuur naar buiten geleid, zodat op afstand de pen uit de hefboom kan worden getrokken. Een tweede draad is verbonden aan de hefboom. Mocht na verwijderen van de pen de hefboom onvoldoende kunnen roteren door de aanwezigheid van het klepje van het tasje, dan kan van buiten de bunker via de tweede draad de hefboom worden gemanipuleerd, zodat alsnog inslag van de slagpin wordt gerealiseerd.

Nadat het klepje van het tasje is gesloten en de clip bevestigd, is de veiligheidspen een kwartslag gedraaid (gekraakt), zodat de pen van buiten de bunker in één beweging uit de hefboom kan worden getrokken. Figuur 20 toont de testopstelling vlak voor het verwijderen van de pen.



Figuur 20 Testopstelling in de bunker.

6.1.2 Resultaat

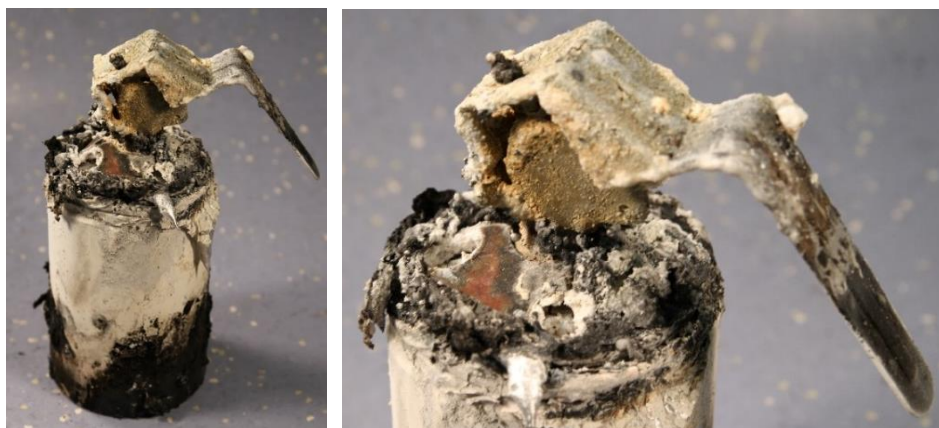
Experiment 1-1 (lot nr. PSH12K3526)

Bij het eerste experiment is de veiligheidshefboom buiten het tasje geplaatst met het klepje vastgemaakt aan het tasje, zie Figuur 21. Na het verwijderen van de veiligheidsspen uit de borging was enige manipulatie van de hefboom nodig om deze in het tasje zoveel te laten roteren dat de slagpin voldoende ruimte kreeg om in te slaan op het slaghoedje.

Na afloop van het experiment worden enkel kleine (deels verbrande) delen van het tasje teruggevonden. In Figuur 22 is de granaat afgebeeld zoals deze na het experiment uit de bunker is verwijderd. De veiligheidshefboom is getordeerd, staat onder ongeveer vijf-en-veertig graden ten opzichte van de (veilige) geborgde stand en haakt nog met de twee gekromde uiteinden in het ontstekerlichaam. Het klepje van het tasje heeft voorkomen dat de hefboom van de granaat is weggesprongen. Door de verbranding van de rooklading zijn de hefboom en de hele bovenzijde van de granaat met residu bedekt. Dit residu zorgt er voor dat de hefboom vast zit aan het ontstekerlichaam. Door het uitoefenen van (lichte) handkracht kan deze van het ontstekerlichaam worden verwijderd.

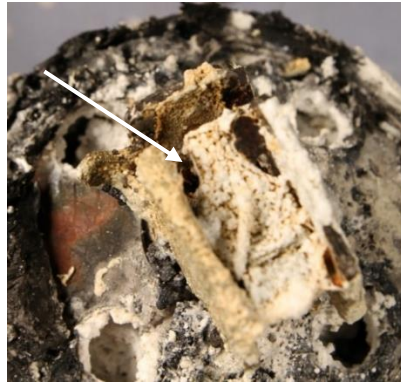


Figuur 21 Experiment 1-1; de hefboom is buiten het tasje geplaatst en het tasje is afgesloten met het kapje.



Figuur 22 Resultaat van experiment 1-1: de veiligheidshefboom is getordeerd, staat onder ongeveer vijf en veertig graden ten opzichte van de veilige stand en zit door het residu vast aan het ontstekerlichaam.

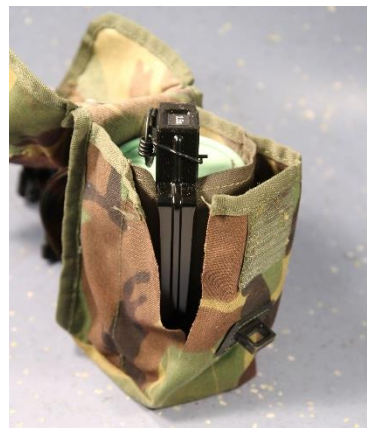
De binnenzijde van de veiligheidshefboom is volledig met residu bedekt. De slagpin zit vast in de eindpositie, ingeslagen op het slaghoedje, zie Figuur 23. De slagpinveer functioneert niet meer en enkel met behulp van een tang is de slagpin te roteren.



Figuur 23 Resultaat van experiment 1-1: de slagpin is ingeslagen en door het residu zit het vast aan het slaghoedje.

Experiment 2-1 (lot nr. PSH12-010)

Bij het tweede experiment is de veiligheidshefboom in het voorste van de twee binnenvakjes in het tasje geplaatst. Er is een inkeping gemaakt in het voorste vakje omdat voorafgaand aan de test de veiligheidshefboom van een inerte rookgranaat moeilijk te roteren bleek met de hefboom in het dit vakje, zie Figuur 24. Op deze manier krijgt de hefboom meer ruimte om te roteren en kan de slagpin inslaan op het slaghoedje en de granaat initiëren.



Figuur 24 Experiment 2-1: de hefboom is in het voorste van de twee binnenvakjes geplaatst. Het tasje wordt deels ingeknipt om de hefboom ruimte te geven voor rotatie.

Ook nu worden na afloop van het experiment slechts enkele kleine (deels verbrande) delen van het tasje teruggevonden. In Figuur 25 is de granaat afgebeeld zoals deze na het experiment uit de bunker is verwijderd. De veiligheidshefboom staat vrijwel in de uitgangspositie (de veilige stand) en zit nog in het ontstekerlichaam gehaakt. Het klepje van het tasje heeft voorkomen dat de hefboom van de granaat is weggesprongen. Omdat deze granaat is geïnitieerd door de slagpin moet de hefboom na inslag door druk van het klepje zijn teruggeduwd. De hefboom is net als de hele bovenzijde van de granaat met residu bedekt en is vast komen te zitten. Door het uitoefenen van (lichte) handkracht kan deze van het ontstekerlichaam worden verwijderd.



Figuur 25 Resultaat van experiment 2-1; de veiligheidshefboom staat vrijwel in de uitgangspositie (veilige stand) en zit nog vast aan het ontstekerlichaam.

De binnenzijde van de veiligheidshefboom is volledig bedekt met residu. De slagpin in het ontstekerlichaam zit vast in de eindpositie, ingeslagen op het slaghoedje, zie Figuur 26. De slagpinveer functioneert niet meer en is enkel met behulp van een tang te roteren.



Figuur 26 Resultaat van experiment 2-1: de slagpin is ingeslagen en door het residu zit het vast aan het slaghoedje.

Experiment 3-1 (lot nr. PSH11E3511)

Bij het derde experiment wordt de veiligheidshefboom in het achterste van de twee binnenvakjes geplaatst, zie Figuur 27. Ook nu wordt het tasje ingeknipt om de hefboom ruimte te geven voor rotatie. Door deze aanpassing komt de testopstelling ongeveer overeen met die van experiment 1-1.



Figuur 27 Experiment 3-1: de hefboom is in het achterste van de twee binnenvakjes geplaatst. Het tasje wordt deels ingeknipt om de hefboom ruimte te geven voor rotatie.

In Figuur 28 is de granaat afgebeeld zoals deze na het experiment uit de bunker is verwijderd. Zowel de hefboom als het ontstekerlichaam zijn losgekomen van het granaat lichaam. Het tasje is verbrand en het deksel van het granaatlichaam is sterk vervormd en omhoog gedrukt onder invloed van de inwendige druk en de hoge temperatuur.

De slagpin in het ontstekerlichaam zit vast in de eindpositie, ingeslagen op het slaghoedje. De slagpinveer functioneert niet meer en enkel met behulp van een tang is de slagpin te roteren, zie Figuur 29.



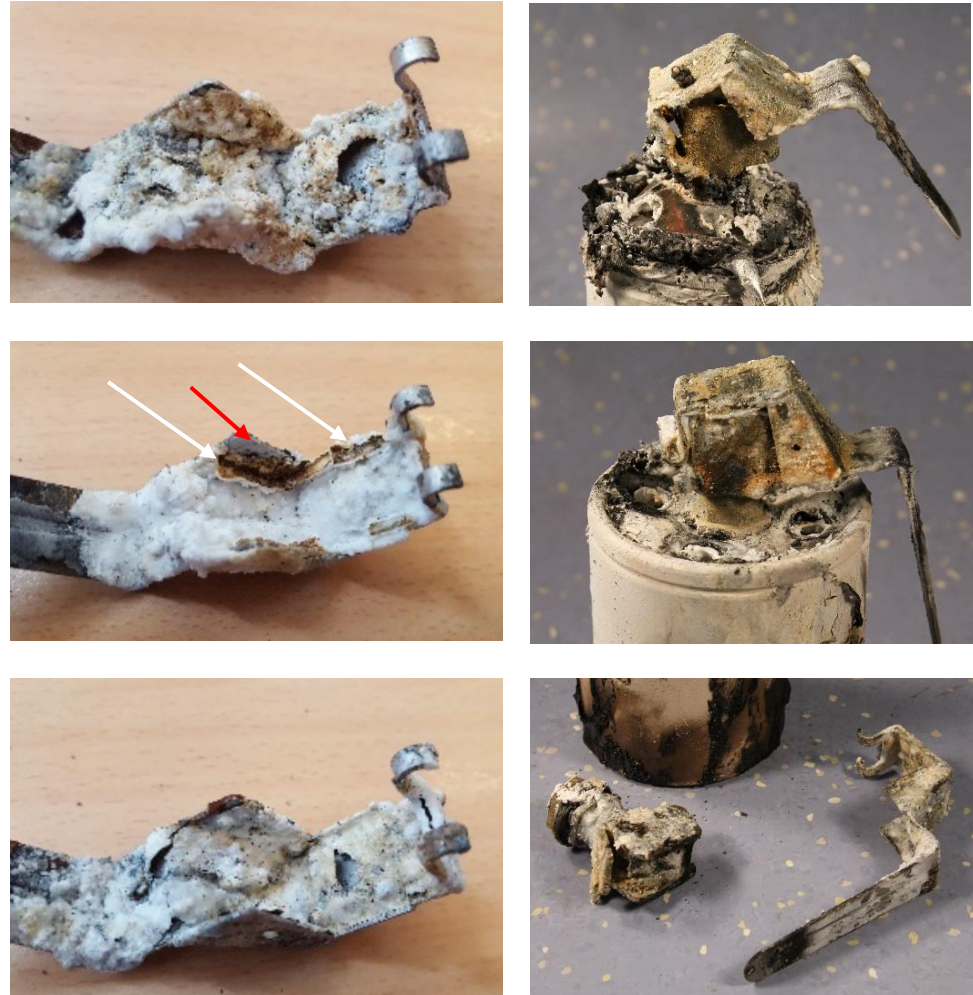
Figuur 28 Resultaat van experiment 3-1: de veiligheidshefboom en ontstekerlichaam zijn beide van de granaat losgekomen. Het deksel is sterk vervormd en omhoog gedrukt.



Figuur 29 Slagpin van de DM25 na afloop van experiment 3-1.

6.1.3 *Vergelijk residu veiligheidshefboom*

Het residu aan de binnenzijde van de hefboom van de drie hierboven beschreven experimenten is met elkaar vergeleken. In Figuur 30 is het residu gerelateerd aan de positie waarop de hefboom tijdens het experiment op de granaat heeft gezeten.



Figuur 30 Binnenzijde en positie van de hefboom uit experiment 1-1 (boven), 2-1 (midden) en 3-1 (onder).

Bij de hefboom van experiment 1-1 (Figuur 30, boven) is de binnenzijde volledig bedekt met residu. Tijdens het experiment is de hefboom geroteerd en getordeerd maar in het ontstekerlichaam blijven haken. Het deksel van het tasje heeft de hefboom tijdens het branden van de granaat in deze positie gehouden. Er is geen afdruk van het ontstekerlichaam in het residu te ontdekken; de verbrandingsproducten konden tussen de wanden van de hefboom en het ontstekerlichaam doorstromen omdat de hefboom is getordeerd.

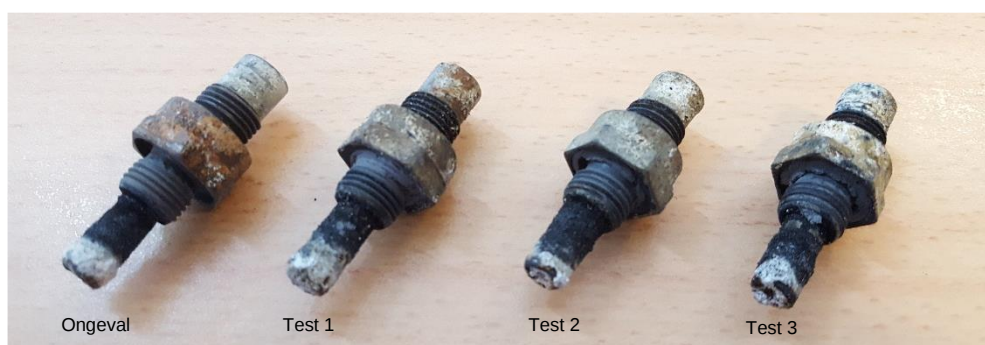
Aan de binnenzijde van de hefboom van experiment 2-1 (Figuur 30, midden) is wel een afdruk zichtbaar. Hier bevond zich de bovenrand van het ontstekerlichaam tijdens het branden van de granaat (aangeduid met witte pijlen). Op de binnen zijwanden van de hefboom zit ook geen residu (aangeduid met rode pijl). Deze afdrucken komen overeen met de positie waarin na het experiment de hefboom op de granaat is aangetroffen.

Dit betekent dat de hefboom na het verwijderen van de veiligheidspen en inslag van de slagpin terug is geroteerd onder druk van het kapje van het tasje. Tijdens het branden van de granaat kon residu aan de binnenzijde van de hefboom ontstaan, maar niet op die plaats waar het ontstekerlichaam aanwezig was.

De binnenzijde van de hefboom van experiment 3-1 is weer volledig bedekt met het residu. Het is onduidelijk waar de hefboom zich tijdens het experiment bevond, maar deze heeft in ieder geval lang genoeg boven op het ontstekerlichaam gestaan zodat de verbrandingsproducten zich aan de binnenzijde van de hefboom konden afzetten. Aangezien er geen afdruk van het ontstekerlichaam wordt ontdekt in het residu is het aannemelijk dat de hefboom op zijn minst geroteerd (zoals bij experiment 1-1) op het ontstekerlichaam heeft gezeten.

6.1.4 *Vergelijk vlampijpjes*

Na visuele inspectie van de restanten uit de experimenten zijn de ontstekerlichamen van de ontstekers geschroefd en zijn de ontstekers verwijderd uit het deksel van de granaten. De vlampijpjes van de drie ontstekers en die van het ongeval staan afgebeeld in Figuur 31. Roet heeft zich afgezet op de vlampijpjes en de onderzijde en binnenzijde van de vlampijpjes zijn bedekt met een witte substantie. Deze is niet nader onderzocht, maar bestaat waarschijnlijk uit verbrandingsproducten afkomstig van de sassen in het vlampijpje. Er zijn geen verschillen aangetroffen tussen de vlampijpjes onderling.



Figuur 31 Ontstekers uit de ongevalsgranaat en uit de granaten die door het verwijderen van de veiligheidspen en inslag van de slagpin zijn geïnitieerd.

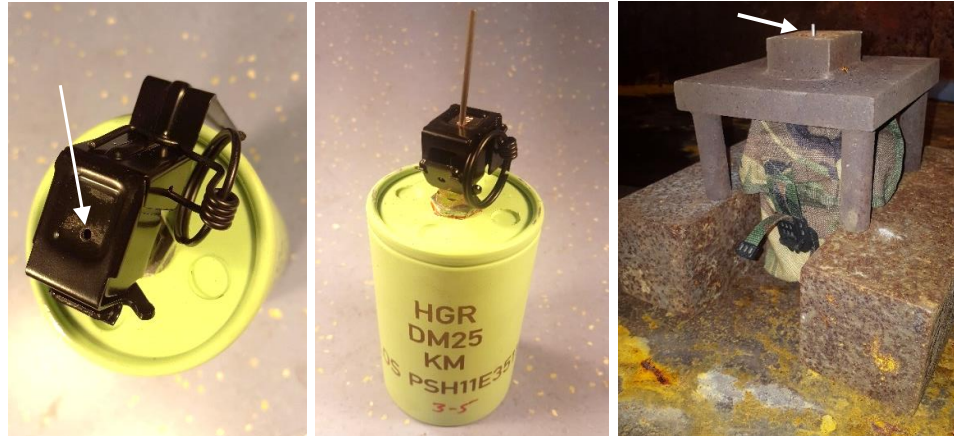
6.2 **Initiatie van de ontsteker door een pin en valgewicht in geborgde (veilige) stand**

6.2.1 *Testopstelling*

Om de granaat te initiëren zonder dat de slagpin op de gebruikelijke manier inslaat, is een pin gebruikt die met behulp van een valgewicht inslaat op het slaghoedje. Voor deze test zijn twee rookgranaten gebruikt uit lot nr. PSH11E3511.

Direct boven het slaghoedje is een gat geboord in de veiligheidshefboom. Een stalen pin is door dit gat op het slaghoedje geplaatst, zie Figuur 32. De granaat is in een bunker in een tasje onder een valbuis geplaatst. De pin steekt hierbij door het deksel van het tasje. Van buiten de bunker is een valgewicht van ongeveer 1330 gram losgelaten vanaf een hoogte van ongeveer 1 meter. De pin slaat hierdoor in op het slaghoedje waardoor de granaat initieert. Om te voorkomen dat de pin door het slaghoedje heen slaat in de vlampijp, wordt het valgewicht door een stalen frame afgevangen nadat de pin enkele millimeters heeft afgelegd.

Er zijn twee experimenten uitgevoerd: één experiment zonder kraken van de veiligheidspen en één nadat deze gekraakt is, waarbij de borgpen om de veiligheidshefboom heen blijft zitten.



Figuur 32 Initiatie door middel van een valgewicht en pin: een klein gat is hiervoor aangebracht in de veiligheidshefboom (links); een stalen pin is op de ontsteker geplaatst (midden); in de bunker wordt de granaat afgeschermd door een stalen frame dat het valgewicht afvangt nadat de pin enkele millimeters heeft afgelegd.

6.2.2 Resultaat

Nadat het valgewicht op de pin valt, initieert de hoofdlading na de vertraging van 1,5 seconden. Na afkoelen van de granaat wordt deze uit de bunker verwijderd en visueel geïnspecteerd.

Figuur 33 toont zijn de restanten van de granaten. De pin waarmee de ontsteker is geïnitieerd zit vast in de bovenzijde van de ontsteker. Vastgesteld wordt dat de veiligheidspen en -hefboom beide niet zijn vervormd of van plaats zijn veranderd onder invloed van de hete rookgassen die met kracht uit de uitstroomopeningen worden gestuwd. De bovenzijde van het granaatlichaam, het ontstekerlichaam en de veiligheidshefboom en -pen zijn volledig bedekt met residu. De zwarte verkleuring aan de bovenzijde en onderzijde van de rookgranaat is veroorzaakt door het verbranden van het tasje.



Figuur 33 Resultaat na initiatie door middel van pin en valgewicht in ongekraakte stand (links) en gekraakte stand (rechts).

Alle onderdelen van de granaat, alsook de pin die gebruikt is voor initiatie zitten door de aanwezigheid van het residu aan elkaar vast. Met enige kracht kan met de hand de pin worden verwijderd, de veiligheidspen uit de borggaten worden getrokken en de veiligheidshefboom van het ontstekerlichaam af worden gehaald.

De inspectie van het ontstekerlichaam toont aan dat de slagpin zodanig is beïnvloed door de uitstromende hete rookgassen dat de veer die de slagpin laat omklappen niet meer functioneert; de slagpin zit vast in de positie waarin deze is geborgd onder de veiligheidshefboom, zie Figuur 34. Enkel met behulp van een tang kan de slagpin worden omgeklapt.



Figuur 34 Ontstekerlichamen van de twee rookgranaten die zijn geïnitieerd door middel van een pin en valgewicht in ongekraakte stand (links) en gekraakte stand (rechts). De slagpin zit vast in de uitgangspositie en de veer functioneert niet meer.

Visuele inspectie van de veiligheidshefboom toont aan dat de vervorming zoals bij de ongevalsgranaat (zie Figuur 16) niet is opgetreden bij de twee beproefde granaten. Ook zijn de binnen zijwanden van beide veiligheidshefbomen relatief schoon, zoals getoond in Figuur 35. Op deze plaats kon zich geen residu afzetten doordat het ontstekerlichaam op de originele (geborgde) plaats tegen deze binnen zijwanden aanzat tijdens het branden van de rookgranaat.



Figuur 35 Veiligheidshefbomen van de twee rookgranaten die zijn geïnitieerd door middel van een pin en valgewicht in ongekraakte stand (links) en gekraakte stand (rechts). De binnen zijwanden (aangeduid met een rode pijl) van beide hefbomen zijn relatief schoon.

6.3 Initiatie van de rooklading met een squib in geborgde (veilige) stand

Omdat de voor initiatie gebruikte pin in de voorgaande test eventuele rotatie van de veiligheidshefboom tegengaat is een alternatieve testmethode gebruikt waarbij de rooklading wordt geïnitieerd met een squib⁴. Voor deze test is een rookgranaat gebruikt uit lot nr. PSH12-010. De squib is direct op de rooklading aangebracht door een van de uitstroomopeningen open te maken en de squib door de opening naar binnen te leiden, zie Figuur 36. Deze wijze van initiatie simuleert een ontbranding van de rooklading als gevolg van een potentieel chemisch proces (zie paragraaf 4.4).



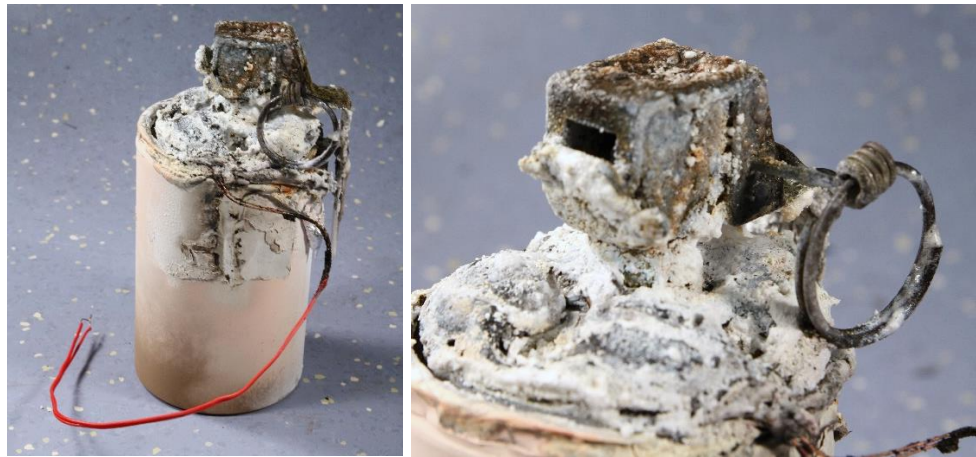
Figuur 36 Initiatie van de rooklading door middel van een squib.

De rookgranaat is in de buitenlucht op een betonnen ondergrond geplaatst. De granaat is gekraakt en de borgpen is uit twee van de vier gaten getrokken, met het omgebogen uiteinde van de pen (zichtbaar in Figuur 14) tegen de ril in het midden van de veiligheidshefboom (zichtbaar in Figuur 16). Op deze manier is de veiligheidshefboom zo licht mogelijk geborgd. De rookgranaat is niet in een tasje geplaatst om eventuele verandering van rotatie van de hefboom door het tasje te voorkomen.

De squib is op afstand door middel van een elektrische ontsteking tot ontbranding gebracht. De rooklading wordt direct geïnitieerd en de rookgranaat functioneert zoals bedoeld; door het branden van de lading worden de drie nog gesloten uitstroomopeningen met een knal geopend als gevolg van inwendige drukopbouw en de uitstoot van rook is normaal.

Na afkoelen van de granaat wordt deze onderworpen aan een visuele inspectie, zie Figuur 37. Omdat de rookgranaat niet in een tasje is geplaatst zit er minder residu aan de buitenzijde van het veiligheidsmechanisme dan in de testen met een tasje. De borgpen is tijdens de ontbranding niet verplaatst en zit nog steeds in twee van de vier borggaten.

⁴ Type: Davey Bickford squib.



Figuur 37 Resultaat na initiatie van de hoofdlading met een squib.

Nadere inspectie van de onderdelen van de granaat is uitgevoerd door het verwijderen van de veiligheidspen en de veiligheidshefboom. Ook nu zitten deze door het residu aan elkaar vast. Met enige kracht kunnen de pen en hefboom met de hand worden verwijderd. De inspectie toont aan dat de veer die de slagpin laat omklappen niet meer functioneert; de slagpin zit vast op de positie waarin deze is geborgd onder de veiligheidshefboom, zie Figuur 38. Enkel met behulp van een tang kan de slagpin worden geroteerd.



Figuur 38 Ontstekerlichaam van de granaat geïnitieerd door middel van een squib. De slagpin (aangeduid met een witte pijl) zit vast in de uitgangspositie en de veer functioneert niet meer.

De vervorming van de veiligheidshefboom van de ongevalsgranaat (zie Figuur 16) is niet opgetreden bij de beproefde granaat. De binnen zijwanden van de hefboom zijn ook nu weer relatief schoon, zie Figuur 39. Op deze plaats kon zich geen residu afzetten doordat het ontstekerlichaam op de originele (geborgde) plaats tegen deze binnen zijwanden aanzat tijdens het branden van de rookgranaat.



Figuur 39 Veiligheidshefboom van de rookgranaat die is geïnitieerd door middel van een squib. De binnen zijwanden van de hefboom (aangeduid met een rode pijl) zijn relatief schoon.

6.3.1 *Vergelijk vlampijpjes*

De vlampijpjes van alle granaten die zijn geïnitieerd in geborgde stand zijn vergeleken met die van het ongeval, zie Figuur 40. Er zijn geen eenduidige verschillen zichtbaar tussen de vlampijpjes van deze vier ontstekers. Dit geldt ook wanneer deze vlampijpjes worden vergeleken met die uit de test met initiatie door de slagpin (zie Figuur 31). De wijze van initiatie beïnvloedt de aantasting van het vlampijpje blijkbaar niet.



Figuur 40 Ontstekers uit de ongevalsgranaat en de granaten die in geborgde (veilige) stand zijn geïnitieerd door een pin en valgewicht en door een squib.

6.4 Mechanische testen

Een experimenteel testprogramma is opgesteld waarbij de DM25 rookgranaat wordt blootgesteld aan een aantal mechanische belastingen. Dit testprogramma is uitgevoerd door KCWM onder toezicht van TNO. De volgende experimenten zijn uitgevoerd:

- Triltesten (3-assen);
- Loose cargo testen;
- Slaghoedje gevoeligheidstest;
- Borgpen trektest;
- Hefboom trektest.

Voor details van de testopstellingen, uitvoering, resultaten wordt verwezen naar [7,8,9,10,11].

7 Analyse

Om de oorzaak van het ongeval te achterhalen worden de positie van de slagpin en het residu aan de binnenzijde van de veiligheidshefboom vergeleken met die van het ongeval. Daarnaast wordt de uitkomst van de mechanische testen en de positie van de veiligheidsspen van de ongevalsgranaat geanalyseerd.

Omdat er geen eenduidige verschillen zijn geconstateerd tussen de vlampijpjes van de ontstekers uit het experimentele programma en die uit het ongeval, dragen de vlampijpjes niet bij aan het vaststellen van de oorzaak van de ontbranding van de ongevalsgranaat.

7.1.1 *Positie slagpin*

De experimenten met de DM25 rookgranaten tonen aan dat de slagpin wordt gefixeerd op de positie waar deze zich bevond tijdens het branden van de rooklading, ongeacht of de slagpin is ingeslagen op het slaghoedje of in de (veilige) geborgde stand stond. In alle gevallen functioneert de veer van de slagpin niet meer na het branden van de rookgranaat en kan de slagpin enkel door het uitoefenen van enige kracht worden gedraaid.

De slagpin van de ongevalsgranaat bevond zich in de eindpositie, op de ontsteker. Initiatie van de ongevalsgranaat is daarom veroorzaakt door inslag van de slagpin en niet door een chemisch proces in de ontsteker en/of granaatlichaam.

7.1.2 *Residu aan de binnenzijde van de veiligheidshefboom*

De wijze waarop zich residu heeft kunnen afzetten aan de binnenzijde van de veiligheidshefboom is indicatief voor de stand van de veiligheidshefboom op het ontstekerlichaam tijdens het branden van de rookgranaat. In de (veilige) geborgde stand kan er geen residu afgezet worden op de binnen zijwanden van de veiligheidshefboom. Bij rotatie van de hefboom wordt de binnenzijde van de hefboom wel bedekt met residu.

De hefboom van de ongevalsgranaat is aan de binnenzijde bedekt met residu, met uitzondering van een driehoekig vlak naast het borggat aan beide binnen zijwanden van de hefboom. Dit betekent dat hefboom van de ongevalsgranaat tijdens het branden ongeveer vijf-en-veertig graden geroteerd was ten opzichte van de uitgangspositie in (veilige) geborgde stand.

7.1.3 *Mechanische testen (KCWM)*

Het experimenteel uitoefenen van externe mechanische belasting op de rookgranaat leidt in ongekraakte stand van de veiligheidsspen in geen enkel geval tot initiatie van de granaat. Loose cargo testen in de gekraakte stand, waarbij de veiligheidsspen uit twee van de vier borggaten is getrokken, kan leiden tot initiatie; dit is niet het geval in ongekraakte stand. De mechanische belastingen op rookgranaten in ongekraakte stand leiden in geen geval tot kraken van de veiligheidsspen.

Uit experimentele trektesten op de veiligheidsspen [9] blijkt dat de gemeten trekkracht om de pen te verwijderen beduidend:

- minder varieert in ongekraakte (geborgde) stand dan in gekraakte stand;
- lager is in gekraakte stand waarbij de pen verschoven is tot aan de ril op de veiligheidsbeugel, dan in ongekraakte (geborgde) stand en in gekraakte stand waarbij de pen niet is verschoven tot aan de ril.

7.1.4 Positie veiligheidshefboom en -pen

Na het ongeval is de veiligheidspen aangetroffen in de hefboom. De aanwezigheid van residu op de pen toont aan dat deze ten tijde van het branden van de rookgranaat deels in de hefboom aanwezig was, en dat terugplaatsing na het ongeval is uitgesloten. Analyse van het veiligheidsmechanisme toont aan dat de veiligheidshefboom slechts kan roteren als de veiligheidspen uit ten minste drie van de vier gaten is losgekomen. In deze uiterste positie steekt de borgpen met alleen nog de punt (ongeveer één millimeter) in het gat van de hefboom aan de zijde van de borgring (deze zijde is zichtbaar in de linker en midden afbeelding van Figuur 32). Initiatie van de ongevalsgranaat veroorzaakt door inslag van de slagpin op het slaghoedje *en* de aanwezigheid van de veiligheidspen in de hefboom na het ongeval kan maar op één manier plaatsvinden; de veiligheidspen heeft de uiterste positie bereikt, *waarna* de veiligheidshefboom voldoende is geroteerd voor inslag van de slagpin, *waarna* de veiligheidspen onder druk van het tasje terug in de hefboom is geduwd. Het terugduwen van de veiligheidspen is pas weer mogelijk als het borggat van de roterende hefboom boven het ontstekerlichaam uitkomt, zie Figuur 41; dat de rookgranaat van het ongeval inderdaad in deze stand heeft gebrand wordt aangetoond door het ontbreken van residu op een deel van de binnen zijwanden van de hefboom. De hefboom wordt namelijk in deze geroteerde positie door het kapje van het tasje naar beneden gedrukt; de teruggeschoven veiligheidspen voorkomt dat de hefboom terug roteert naar de uitgangspositie (de oorspronkelijke veilige stand).



Figuur 41 Positie van de veiligheidshefboom tijdens het branden van de ongevalsgranaat; de vorm van het gearceerde vlak (links) komt overeen met het ontbreken van residu op een deel van de binnen zijwanden van de hefboom (aangeduid met witte pijl rechts).

Dat bovenstaand scenario kan optreden is experimenteel aangetoond met een inerte DM25 rookgranaat en vastgelegd op video waarvan vier snapshots worden weergegeven in Figuur 42:

- Linksboven: Uitgangspositie met veiligheidspen verschoven tot de ril op de veiligheidshefboom;
- Rechtsboven: Door herhaaldelijk de hefboom handmatig te belasten schuift de pen verder uit de borggaten in de richting van de witte pijl;
- Linksonder: De pen zit nog in één borggat van de hefboom die nu vrij is te roteren, zodat de slagpin kan inslaan;
- Rechtsonder: De veiligheidspen wordt dieper terug het borggat ingeduwd door druk van het tasje op de ring/pen.



Figuur 42 Scenario waarbij de veiligheidspen de uiterste positie bereikt waarna de hefboom voldoende roteert voor inslag van de slagpin en de pen door het tasje terug in de hefboom wordt geduwd.

7.1.5 Vervorming veiligheidshefboom

Er is geen vervorming waargenomen van de veiligheidshefboom onder invloed van de belastingen uitgeoefend tijdens de tril- en loose cargo testen.

De vervorming van de hefboom van de ongevalsgranaat kan niet zijn opgetreden met de veiligheidshefboom in de geborgde (veilige) positie. Met de hefboom in geroteerde positie kan externe belasting de vastgestelde vervorming veroorzaken. Het is waarschijnlijk dat de vervorming is opgetreden bij de poging de brandende rookgranaat bij de militair weg te krijgen op het moment van het ongeval. Voor vervorming bij hoge temperatuur door de hete gassen is minder externe belasting nodig doordat de stijfheid van het metaal afneemt.

8 Conclusies

De mechanische testen tonen aan dat een ongekraakte (geborgde) veiligheidspen niet tot initiatie van de DM25 rookgranaat leidt onder de aangebrachte externe belasting. Dit geldt ook voor een gekraakte veiligheidspen die nog in alle vier de borggaten aanwezig is. De loose cargo testen laten zien dat een gekraakte veiligheidspen die slechts in twee van de vier borggaten aanwezig wel kan leiden tot initiatie. Hieruit wordt geconcludeerd dat voorafgaand aan het ongeval de ongevalsgranaat in gekraakte stand stond waarbij de veiligheidspen uit minimaal twee van de borggaten is geschoven. De exacte bron en aard van de externe belasting op het veiligheidsmechanisme van de rookgranaat die dit hebben veroorzaakt, zijn niet bekend.

Uit experimentele trektesten op de veiligheidspen blijkt dat de gemeten trekkracht om de pen te verwijderen beduidend:

- Minder varieert in ongekraakte (geborgde) stand dan in gekraakte stand;
- Lager is in gekraakte stand waarbij de pen verschoven is tot aan de ril op de veiligheidsbeugel, dan in ongekraakte (geborgde) stand en in gekraakte stand waarbij de pen niet is verschoven tot aan de ril.

De rookgranaat is tot ontbranding gekomen doordat de veiligheidspen onder externe belasting naar de uiterste positie is geschoven met de punt van de pen in slechts één borggat van de veiligheidshefboom, waarna deze voldoende is geroteerd voor inslag van de slagpin op het slaghoedje, waarna onder druk van het tasje de pen is teruggeschoven in de hefboom. Dit scenario is experimenteel geverifieerd en wordt onderbouwd door de volgende constatering uit de analyse:

- De veer die de slagpin laat inslaan zit door residu na het branden van een rookgranaat vast. De slagpin van de ongevalsgranaat bevond zich in de eindpositie op de ontsteker. Dit bewijst dat initiatie van de rookgranaat is opgetreden door inslag van de slagpin en niet door een chemisch proces in de ontsteker en/of granaatlichaam, of door initiatie van het slaghoedje door andere objecten of materiaal van buitenaf;
- De aanwezigheid van residu op de veiligheidspen na het ongeval bewijst dat deze tijdens het branden van de rookgranaat deels aanwezig was in de veiligheidshefboom en niet is teruggeplaatst na het ongeval;
- De aanwezigheid van residu aan de binnenzijde van de veiligheidshefboom met uitzondering van een driehoekig vlak op de binnen zijwanden van de hefboom, bewijst dat deze tijdens het branden ongeveer vijf en veertig graden geroteerd stond ten opzichte van de uitgangspositie in geborgde (veilige) stand;
- De vervorming van de veiligheidshefboom van de ongevalsgranaat kan niet zijn opgetreden met de hefboom in de geborgde (veilige) stand, maar wel in geroteerde stand.

9 Referenties

- 1 Commissie van Onderzoek, 180406 Onderzoeksvragen TNO DM25.docx; Ontvangen per email d.d. 10-4-2018
- 2 J. Koole, Vraagbaak 18_06 Technisch onderzoek accidentele ontbranding DM25 rookhandgranaat; 18-5-2018
- 3 Ministerie van Defensie, Voorschrift Hand- & Geweergranaten (C); VS 9-850 C40.48; 7-10-2016;
- 4 Koninklijke Marechaussee, Bijlage fotomap; BPS zaaknummer 18-020782; Onderwerp: brand/ontploffing met letsel met rookgranaat, Stukken Van Overtuiging (SVO);
- 5 Koninklijke Marechaussee, Bijlage fotomap; BPS zaaknummer 18-020782; Onderwerp: brand/ontploffing met letsel met rookgranaat;
- 6 R.H.B. Bouma, W. Duvalois; Chemische analyse Rookgranaat DM25; 18EM/0441; 3 juli 2018
- 7 K.E. Bakker; TB MUN-005 Incidentmelding Rookhandgranaat DM25 (G188): Loose cargo test; Documentnummer: 28104; KCWM; 11-7-2018
- 8 K.E. Bakker; TB MUN-005 Incidentmelding Rookhandgranaat DM25 (G188): Triltest; Documentnummer: 28105; KCWM; 11-7-2018
- 9 K.E. Bakker; TB MUN-005 Incidentmelding Rookhandgranaat DM25 (G188): Veiligheidspen trektest; Documentnummer: 28106; KCWM; 10-7-2018
- 10 K.E. Bakker; TB MUN-005 Incidentmelding Rookhandgranaat DM25 (G188): Veiligheidsbeugel trektest; Documentnummer: 28107; KCWM; 11-7-2018
- 11 K.E. Bakker; TB MUN-005 Incidentmelding Rookhandgranaat DM25 (G188): Slaghoedje gevoeligheidstest; Documentnummer: 28109; KCWM; 16-7-2018

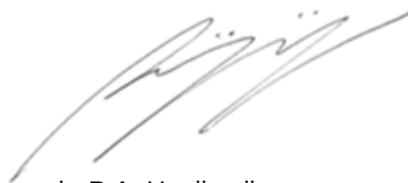
10 Ondertekening

Rijswijk, 13-7-2018

A handwritten signature in blue ink, enclosed within a blue oval. The signature appears to be 'P. Hendriksen'.

P. Hendriksen
Afdelingshoofd

TNO

A handwritten signature in blue ink, consisting of several fluid, connected strokes.

ir. P.A. Hooijmeijer
Projectleider