



ONDERZOEKRAAD
VOOR VEILIGHEID

Bijlagen

Mortierongeval Mali



Bijlagen

Mortierongeval Mali

Den Haag, september 2017

De rapporten van de Onderzoeksraad voor Veiligheid zijn openbaar.

Alle rapporten zijn bovendien beschikbaar via de website van de Onderzoeksraad www.onderzoeksraad.nl

Foto cover: Onderzoeksraad voor Veiligheid

De Onderzoeksraad voor Veiligheid

Als zich een ongeval of ramp voordoet, onderzoekt de Onderzoeksraad voor Veiligheid hoe dat heeft kunnen gebeuren, met als doel daar lessen uit te trekken. Op die manier draagt de Onderzoeksraad bij aan het verbeteren van de veiligheid in Nederland. De Raad is onafhankelijk en besluit zelf welke voorvallen hij onderzoekt. Daarbij richt de Raad zich in het bijzonder op situaties waarin mensen voor hun veiligheid afhankelijk zijn van derden, bijvoorbeeld van de overheid of bedrijven. In een aantal gevallen is de Raad verplicht onderzoek te doen. De onderzoeken gaan niet in op schuld of aansprakelijkheid.

Onderzoeksraad

Voorzitter: mr. T.H.J. Joustra
prof. mr. dr. E.R. Muller
prof. dr. ir. M.B.A. van Asselt

Secretaris-directeur: mr. C.A.J.F. Verheij

Bezoekadres: Lange Voorhout 9
2514 EA Den Haag

Postadres: Postbus 95404
2509 CK Den Haag

Telefoon: 070 333 7000

Internet: onderzoeksraad.nl

E-mail: info@onderzoeksraad.nl

Bijlage A. Onderzoeksverantwoording	7
Bijlage B. Inzagereacties.....	11
Bijlage C. Veiligheids- en Wapeningsmechanisme schokbuis	13
Bijlage D. Reconstructie verloop schietoefening 6 juli 2016	19
Bijlage E. Technisch onderzoek restanten mortier en mortiergranaat	29
Bijlage F. Analyse van benodigde snelheid om schokbuis te wapenen	69
Bijlage G. Microscopisch onderzoek afsluitplaat M6-N schokbuis	103
Bijlage H. Klimatologische omstandigheden en potentiële invloeden.....	115
Bijlage I. Doorslagtests M6-N schokbuis.....	151
Bijlage J. Additioneel onderzoek	189
Bijlage K. Alternatieve scenario's	235
Bijlage L. Antwoorden Arsenal.....	243
Bijlage M. Eerdere voorvallen met mortiergranaten	245
Bijlage N. Beoordelingen Togolese <i>role-2</i>.....	247

ONDERZOEKSVERANTWOORDING

Onderzoek door de Onderzoeksraad

De wettelijke taak van de Onderzoeksraad voor Veiligheid is het vaststellen van oorzaken van (bijna-)ongevallen, met als doel om herhaling van soortgelijke ongevallen in de toekomst te voorkomen. De Onderzoeksraad richt zich nadrukkelijk niet op schuld of aansprakelijkheid, maar vraagt zich af welke lessen te trekken zijn uit wat er is gebeurd. De Onderzoeksraad voor Veiligheid heeft wettelijk geregelde bevoegdheden die de Raad in staat stellen om de voor hem relevante informatie te verzamelen; zo is iedereen verplicht alle medewerking te verlenen aan het onderzoek.

Afbakening van het onderzoek

Het onderzoek beperkt zich ten aanzien van de te analyseren ongevalsfactoren, de verklarende mechanismen en te trekken lessen tot dit voorval. Om het voorval in perspectief te kunnen plaatsen bij de systeembeoordeling van munitieveligheid wordt gekeken naar het generieke kwaliteitssysteem, en niet uitsluitend naar het systeem dat betrekking heeft op dit specifieke wapen en deze munitie. Ook voor de beoordeling van het kwaliteitssysteem voor medische zorg wordt gekeken naar het systeem voor de planning van medische zorg in inzetgebieden in algemene zin.

Buiten de scope van het onderzoek vallen:

- De besluitvormingsprocedure over de inzet van Nederlandse troepen in het buitenland (al dan niet op basis van artikel 100 Grondwet);
- De veiligheidsaspecten in gevechtssituaties;
- De reguliere medische zorg van de Defensie Gezondheidsorganisatie in Nederland.

Andere onderzoeken

Naast de Onderzoeksraad hebben drie andere partijen onderzoek verricht naar het ongeval in Kidal. De Raad heeft kennis kunnen nemen van de bevindingen uit deze onderzoeken.

Commissie van Onderzoek (CvO)

Defensie heeft een eigen ongevalsonderzoek verricht om lering uit het ongeval te trekken. Daartoe is een ad hoc-onderzoekscommissie opgericht die volgens protocol onderzoek heeft gedaan. De commissie heeft zich gericht op de directe oorzaak van het ongeval, de achterliggende factoren en de medische zorg.

Koninklijke Marechaussee / Openbaar Ministerie

Het Openbaar Ministerie heeft een zogenaamd feitenonderzoek laten uitvoeren door de KMar.

UNPOL Joint Investigation Team

De VN heeft eveneens onderzoek gedaan naar het dodelijke ongeval. Dit is een standaard-onderzoek bij dergelijke voorvallen.

Informatieverzameling

De Onderzoeksraad heeft veel inspanningen verricht om toegang te krijgen tot alle voor het onderzoek relevante informatie. Niet alle opgevraagde informatie bleek beschikbaar. Zo heeft de Raad niet kunnen vaststellen waar en op welk niveau de uiteindelijke beslissing is genomen om voor de aankoop te tekenen zonder dat de gevraagde informatie over de werking en de veiligheid van de aangeschafte munitie bijgeleverd was. Ook is onduidelijk gebleven op welke wijze en op welk niveau de Nederlandse regering een akkoordverklaring heeft afgegeven waarin ze aangeeft zich bewust te zijn van de restricties van de munitie. De documenten waren niet beschikbaar en de betrokkenen hadden er geen herinnering aan.

In één geval was een door Defensie toegezegde geteste schokbuis bij afhaken niet meer beschikbaar. Dit leidde ertoe dat de Onderzoeksraad eigen onderzoek naar de schokbuis heeft moeten uitvoeren.

In een ander geval waren onderzoekers van de Raad naar Mali afgereisd om, op uitnodiging van het ministerie van Defensie, onderzoek te verrichten aan de resterende 41 mortiergranaten uit de ongevalspartij. Bij aankomst op de Nederlandse basis in Mali bleken de granaten onvindbaar. Na enkele dagen zijn de onderzoekers onverrichter zaken huiswaarts gekeerd. Naderhand heeft het ministerie van Defensie verklaard dat de partij granaten al maanden eerder was vernietigd.

Kwaliteitsbewaking

De Onderzoeksraad vindt het belangrijk dat zijn onderzoeken een betrouwbaar en representatief beeld geven van de onderzochte organisaties en processen en dat het oplossen van de geconstateerde veiligheidstekorten werkelijk leidt tot verbetering van de veiligheid. Hiertoe is op elk onderzoek kwaliteitsbewaking van toepassing.

Gedurende het onderzoek ontvangt het projectteam expertadvies over de opzet en te gebruiken methoden. Belangrijke deelproducten worden bovendien onderworpen aan intercollegiale toetsing. De door TNO uitgevoerde onderzoeken zijn onderworpen aan een interne TNO-kwaliteitsbeoordeling door niet bij het onderzoek betrokken onderzoekers. Daarnaast heeft de Raad de TNO-rapportages aan een tweetal (internationale) munitiedeskundigen voorgelegd voor contra-expertise. De uitkomsten van het technische ongevalsonderzoek zijn tevens ter beoordeling voorgelegd aan het *Munitions Safety Information Analysis Center* (MSIAC) van de NAVO in Brussel. De Raad heeft de medische informatie voorgelegd aan twee traumachirurgen en een anesthesist met uitgebreide militaire uitzendervaring. Deze specialisten hebben onafhankelijk van

elkaar de medische gegevens en de filmopnames beoordeeld. Tot slot heeft de Onderzoeksraad een begeleidingscommissie ingesteld voor dit onderzoek.

Inzage

Een conceptversie van dit rapport is, conform de Rijkswet Onderzoeksraad voor veiligheid, voorgelegd aan de Commandant der Strijdkrachten (CdS), de secretaris-generaal van het ministerie van Defensie, en de minister van Defensie, met het verzoek het rapport te controleren op feitelijke onjuistheden en onduidelijkheden.

Begeleidingscommissie

De Onderzoeksraad heeft voor dit onderzoek een begeleidingscommissie in het leven geroepen. Deze bestond uit externe leden met voor het onderzoek relevante deskundigheid onder voorzitterschap van de voorzitter van de Onderzoeksraad. De externe leden hadden op persoonlijke titel zitting in de begeleidingscommissie. Gedurende het onderzoek is de begeleidingscommissie drie keer bijeengekomen om met de Raad en het projectteam van gedachten te wisselen over de opzet en de resultaten van het onderzoek. De commissie vervulde een adviserende rol binnen het onderzoek. De eindverantwoordelijkheid voor het rapport en de aanbevelingen ligt bij de Onderzoeksraad.

De begeleidingscommissie bestond uit de volgende personen:

Mr. T.H.J. Joustra (voorzitter)	Onderzoeksraad voor Veiligheid
Schout-bij-nacht (bd) P.J.Bindt	Buitengewoon raadslid Onderzoeksraad voor Veiligheid
Prof. mr. J.G. de Hoop Scheffer	Hoogleraar International Relations and Diplomatic Practice Universiteit Leiden
Kolonel arts T. van Egmond	Trauma- en longchirurg in het St.Elisabeth ziekenhuis in Tilburg, reservist militair chirurg
Ir. J.P.M. Piereij	Voormalig officier Defensie en onderzoeker Explosive Ballistics and Protection TNO, nu sales director Rheinmetall
Prof. dr. ir. M.C. Pirlot	Hoogleraar Wapensystemen en ballistiek Royal Military Academy Brussels

Projectteam

Het projectteam bestond uit de volgende personen:

Dr. E.K. Verolme	Onderzoeksmanager
Drs. C.J. van der Schors MWO	Projectleider
A.K. Roskam	Onderzoeker
Dr. P.J.J.M. Verhallen	Onderzoeker
Mr. L. van Krimpen	Adviseur

De volgende personen zijn toegevoegd aan het projectteam onder de supervisie en verantwoordelijkheid van de Onderzoeksraad voor Veiligheid:

Commandeur-arts (bd) dr. A.P.C.C. Hopperus Buma	Arts Buma Health Care Services
A.J. Timmers MSc	Senior Adviseur Twynstra Gudde
E. Kroon MSc	Onderzoeker TNO Defence

Technisch onderzoek werd in opdracht van de Onderzoeksraad voor Veiligheid uitgevoerd door het Nederlands Forensisch Instituut (NFI) en de Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek (TNO).

INZAGEREACTIES

Een conceptversie van dit rapport is, conform de Rijkswet Onderzoeksraad voor veiligheid, voorgelegd aan Defensie met het verzoek het rapport te controleren op fouten, omissies en onduidelijkheden en het eventueel te voorzien van commentaar.

Het conceptrapport is voorgelegd aan:

- De minister van Defensie;
- De Commandant der Strijdkrachten;
- De secretaris-generaal van het Ministerie van Defensie.

De ontvangen reacties zijn in de volgende twee categorieën te verdelen:

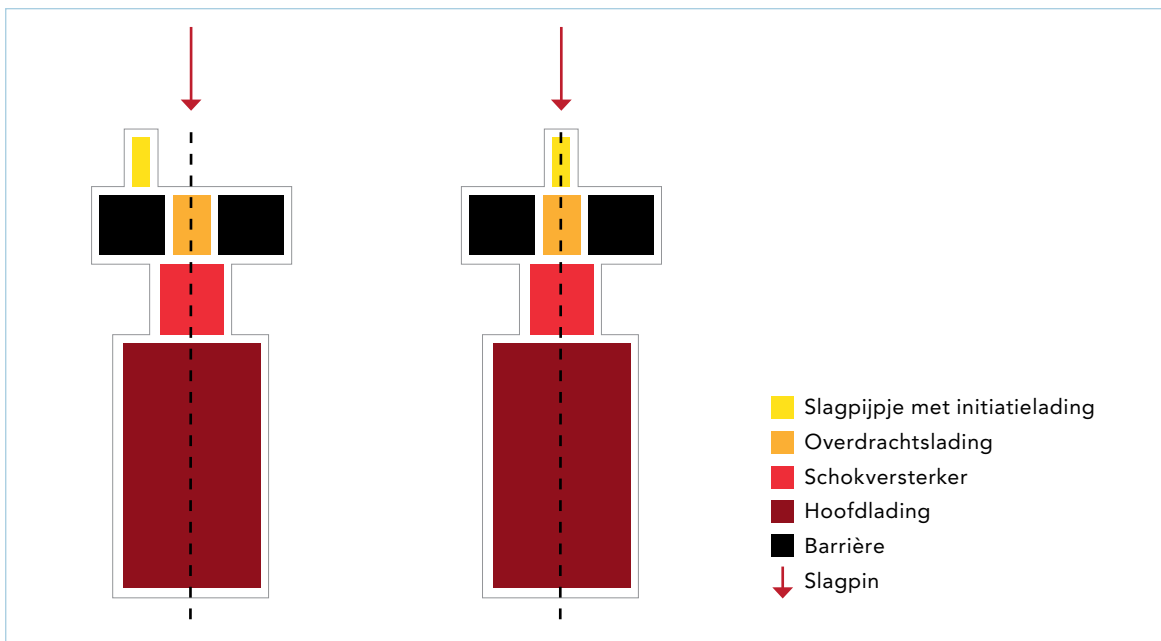
- Correcties van feitelijke onjuistheden, aanvullingen op detailniveau, en redactioneel commentaar, heeft de Onderzoeksraad (voor zover juist en relevant) overgenomen. De betreffende tekstdelen zijn in het eindrapport aangepast. Deze reacties zijn niet afzonderlijk vermeld.
- De reacties die niet zijn overgenomen, zijn voorzien van een motivering van de Onderzoeksraad waarom deze niet zijn overgenomen. Deze reacties zijn opgenomen in een tabel die te vinden is op de website van de Onderzoeksraad voor Veiligheid (www.onderzoeksraad.nl).

VEILIGHEIDS- EN WAPENINGSMECHANISME SCHOKBUIS

De schokbuis van de granaat bevat een veiligheids- en wapeningsmechanisme ('*safety and arming*'). Het veiligheidsmechanisme voorkomt onbedoelde (voortijdige) detonatie van de hoofdloading tijdens opslag, transport of gebruik. Het wapeningsmechanisme zorgt voor het scherpstellen van de granaat tijdens zijn vlucht naar het doel.

Veiligheid

Het basisprincipe voor veiligheid ligt in de fysieke scheiding tussen de relatief grote explosieve hoofdloading en de relatief kleine initiatielading ('het slagpijpje') in de schokbuis. De hoofdloading bestaat uit het relatief ongevoelig 'secundair' explosief TNT. De initiatielading in het slagpijpje bestaat uit een zeer gevoelig 'primair' explosief.¹ De omvang van de initiatielading is uit veiligheidsoverwegingen klein en niet krachtig genoeg om de hoofdloading te initiëren door middel van een schok. Daarom bevinden zich tussen de initiatielading en de hoofdloading nog een overdrachtslading² ('*transfer lead*'), en een schokversterker³ ('*booster*').



Figuur C1: Explosieketen in veilige stand (links) en in gewapende stand (rechts). (Bron: TNO)

- 1 Het slagpijpje heeft een primerlading die bestaat uit drie delen: het bovenste deel bestaat uit een impact en wrijvingsgevoelig mengsel van loodstyfnaat, tetrazeen, bariumnitraat en antimoonsulfide. Het middelste deel bestaat uit loodzide en het onderste deel (tegen de afsluitplaat aan) bestaat uit pentriet.
- 2 Overdrachtslading bestaat uit pentriet.
- 3 Booster bestaat uit cyclotrimethyleentrinitroamine (RDX).

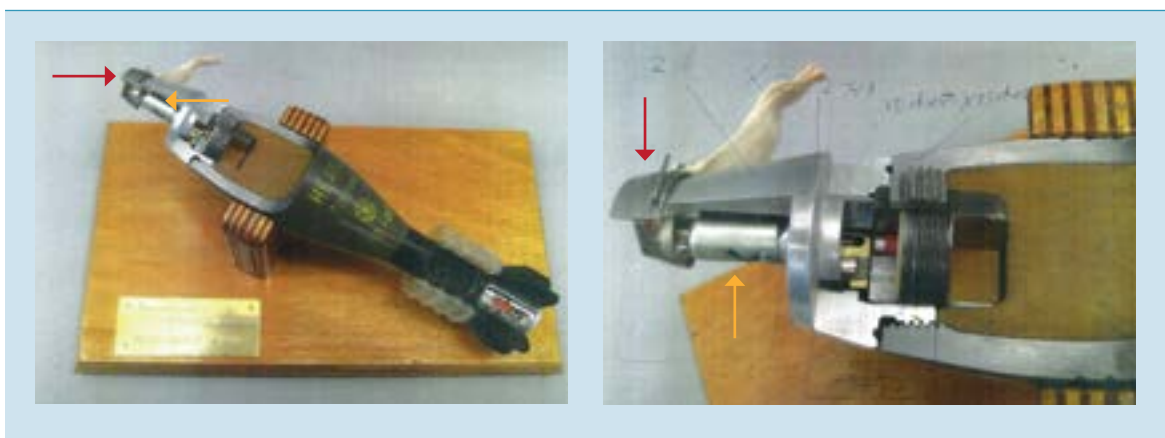
Deze opbouw wordt aangeduid met explosieketen of 'explosive train' en is schematisch weergegeven in figuur C1; links in de veilige stand ('uit lijn'), en rechts in de gewapende stand. In de gewapende stand staan de slagpin (↓), de initiatielading, de overdrachtslading, de booster en de hoofdlading met elkaar in één lijn, zodat de explosieketen in werking kan treden wanneer de slagpin het slagpijpje met de initiatielading raakt. In de veilige stand staat de initiatielading buiten de lijn, zodat deze niet door de slagpin geraakt kan worden en bovendien door een barrière van de overdrachtslading gescheiden is. De barrière bestaat uit een metalen afsluitplaat die initiatie van de overdrachtslading-booster-hoofdlading voorkomt wanneer de initiatielading door een of andere oorzaak voortijdig functioneert.

Wapening

Tijdens het verschieten wordt de munitie gewapend, waarbij de initiatielading mechanisch in lijn komt te staan met de slagpin en de overige componenten van de explosieketen (zoals rechts weergegeven in figuur C1). Wapening vindt bij de schokbuis M6-N plaats door een mechanisme dat in werking treedt door de versnelling bij het afvuren. Wanneer de munitie inslaat op of naast het doel wordt de initiatielading geactiveerd door de slagpin.

Veiligheid en wapening van de schokbuis M6-N

Het ontwerp van de schokbuis is voorzien van twee veiligheden; een interne terugslagkap die zorgt voor maskerveiligheid en een externe beschermkap.



Figuur C2: Deels opengewerkte 60mm HE80 mortiergranaat (links) en schokbuis (rechts)⁴; de terugslagkap en beschermkap zijn aangeduid met respectievelijk een oranje en een rode pijl. (Foto's: Defensie)

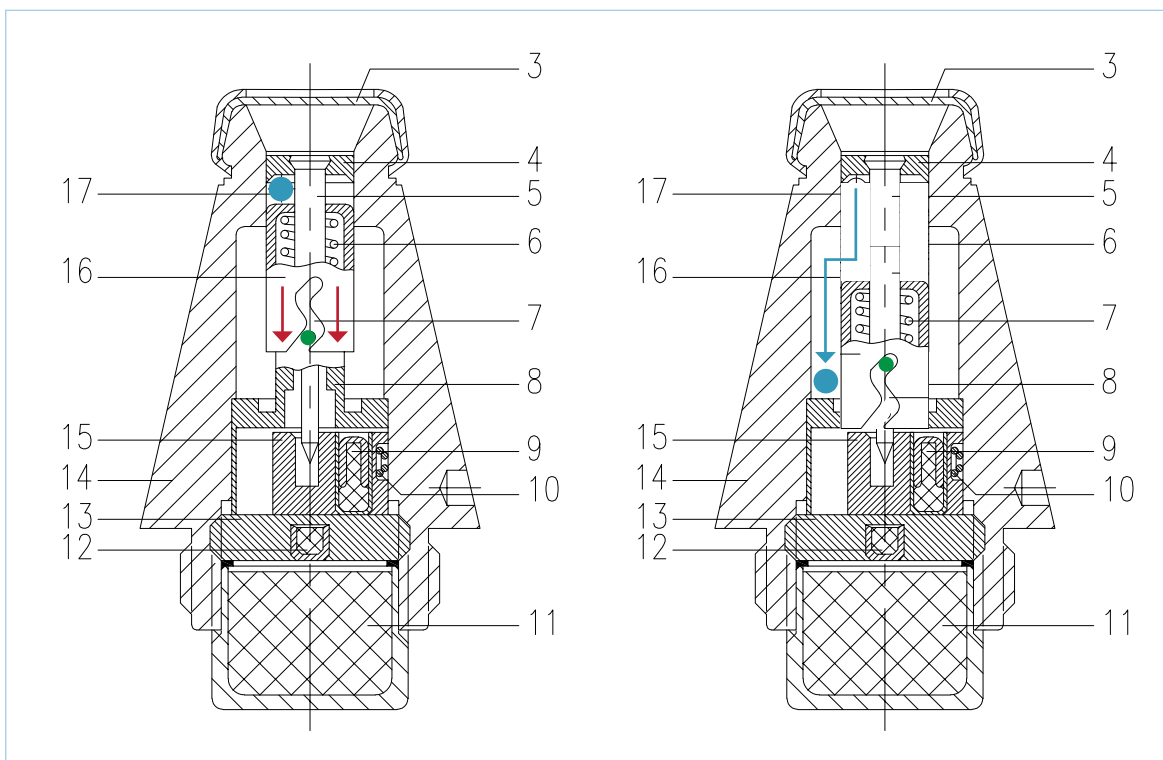
Figuur C2 toont links een deels opengewerkte mortiergranaat en rechts een opengewerkte schokbuis, waarin beide veiligheden zijn aangeduid.

⁴ Foto's beschikbaar gesteld door Kennis Centrum Wapens en Munitie. De foto links toont vier aanvullingskardoezen aan het staartstuk (kunststof hoefijzervormige zakjes kruit); in de praktijk werd maximaal één aanvullingskardoes gebruikt.

Maskerveiligheid

De maskerveiligheid of wapeningsafstand is de afstand die de mortiergranaat na het verlaten van de schietbuis aflegt voordat de schokbuis is gewapend. Als de schokbuis bijvoorbeeld veertig meter na het verlaten van de buis op scherp komt te staan is de maskerveiligheid veertig meter; voorbij deze afstand kan de mortiergranaat na het raken van een voorwerp afgaan. Het doel van maskerveiligheid is het creëren van een veilige afstand tussen de schutters en de eigen afgevuurde granaat. Bij voldoende maskerveiligheid volgt er geen detonatie indien de granaat op (te) korte afstand een doel raakt, zodat de schutters niet worden blootgesteld aan een drukgolf en rondspattende scherven.

De maskerveiligheid wordt uitgelegd aan de hand van een beschrijving van het functioneren van de schokbuis (zie figuur C3).



Figuur C3: Stand van het veiligheidsmechaniek in de schokbuis aan het begin van de versnelling (links) en aan het eind van de versnelling bij het verlaten van de vuurbuis (rechts). (Bron: Defensie/TNO)

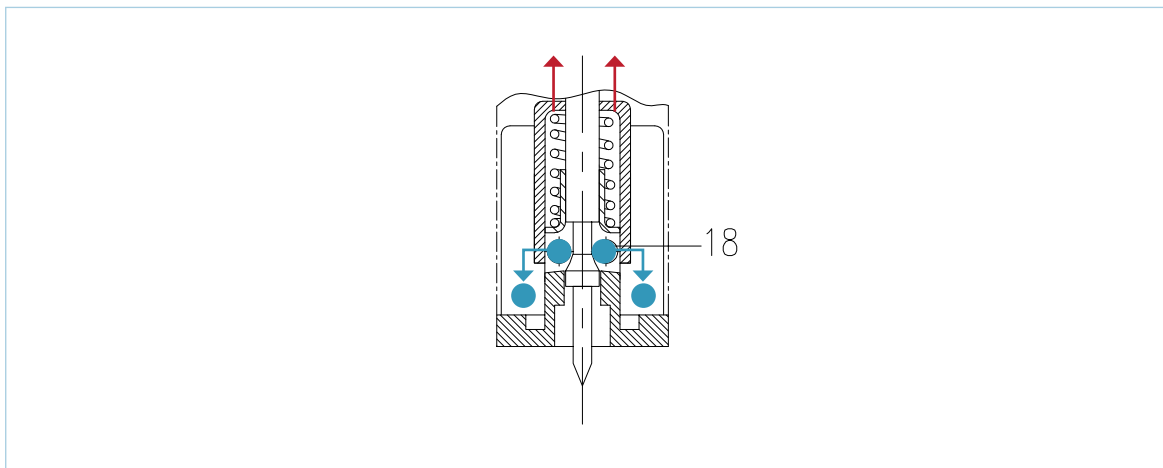
Een terugslagkap (nr 16) wordt door een veer tegen een kogel (nr 17, blauw) gedrukt die ingeklemd zit tussen de kap en een begrenzer (nr 4). De begrenzer is gelijk aan de vaste bovenzijde van de slagpin (nr 5). De terugslagkap beweegt tegen de druk van een veer in (rode pijlen) als gevolg van de traagheidskracht⁵ ('setback') die optreedt wanneer de mortiergranaat bij het afvuren in de schietbuis versnelt.⁶ De stand van het

⁵ De traagheidswet of Eerste wet van Newton schrijft voor dat een object waarop geen uitwendige krachten werken in rust blijft of een eenparige beweging uitvoert. Omdat in dit geval de terugslagkap niet direct, maar via een veer met de schokbuis verbonden is, zal de kap achterblijven bij de versnelling van de granaat en daardoor naar beneden bewegen.

⁶ Dit massa-veersysteem wordt gekarakteriseerd door de massa van de terugslagkap en veerconstante van de veer (massa mortiergranaat >> massa terugslagkap).

veiligheidsmechaniek op het moment voordat de versnelling begint is links afgebeeld in figuur C3. Nadat de versnelling is ingezet valt de kogel bij voldoende verplaatsing van de terugslagkap vrij en verplaatst zich vanwege massa-traagheid naar de loze ruimte buiten de kap.

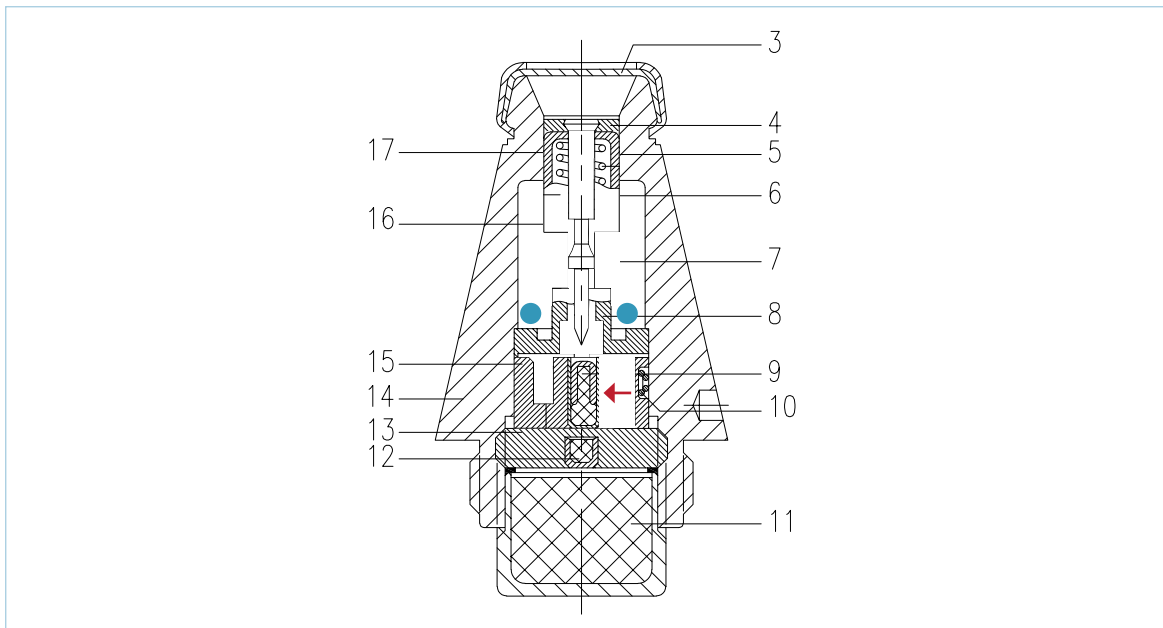
Enige vertraging wordt verkregen door de zigzag gleuf in de kap die langs een pin (groen) beweegt die vast zit aan het huis (nr 8). De afbeelding rechts in figuur C3 geeft de uiteindelijke stand van de terugslagkap en kogel weer tot het moment waarop de versnelling, en dus de massa-traagheidskracht, eindigt. Dit treedt op zodra de gasdruk onder de mortiergranaat wegvalt bij het verlaten van de mortier of net daarbuiten. De tegendruk van de veer (nr 6) samen met de benodigde tijdsduur voor de terugslagkap om de zigzag weg af te leggen, bepalen samen de versnelling en de tijdsduur van de versnelling die nodig zijn om de kogel vrij te laten vallen. De afstand die de kap aflegt als gevolg van een versnelling tijdens een trilling of schok (bijvoorbeeld door een val, of tijdens vervoer) is kleiner, omdat deze versnelling lager is en/of de tijdsduur van de versnelling korter is dan tijdens het afvuren van de mortiergranaat.



Figuur C4. Twee setback kogels voorkomen vrije beweging van de slagpin, deze doorsnede staat loodrecht op de doorsnede zoals getoond in figuur C5. (Bron: Defensie/TNO)

Twee setback kogels (zie figuur C4, nr 18), met dezelfde diameter als de blauwe kogel nr 17 in figuur C3, bevinden zich onder de terugslagkap en voorkomen beweging van de slagpin omdat zij zich in een uitsparing van de slagpin bevinden. Op het moment dat de versnelling wegvalt (bij het verlaten van de mortier of net daarbuiten) duwt de veer de terugslagklep terug omhoog. Wanneer de terugslagkap een voldoende afstand omhoog heeft afgelegd (aangegeven met rode pijlen), vallen de twee setback kogels vrij naar de loze ruimte buiten de afsluitkap.

Net als bij de neergaande beweging wordt enige vertraging verkregen door de zigzag gleuf in de kap die langs een pin (groen in figuur C3) beweegt die vastzit aan het huis (nr 8 in figuur C3). Zodra de setback kogels zijn weggevallen, is de slagpin vrij om over de lengteas te bewegen. De terugslagklep beweegt onder veerdruk omhoog tot aan de begrenzer (nr 4 in figuur C3), dat wil zeggen een kogeldiameter hoger dan in de uitgangspositie (links in figuur C3).



Figuur C5: De schokbuis in gewapende stand. (Bron: Defensie/TNO)

De begrenzer is vast verbonden aan de slagpin (zie figuur C5), daarom neemt de terugslagkap de slagpin mee omhoog tot aan het membraan (nr 3 in figuur C5). Zodra de punt van de slagpin de holte van de sluiters (nr 15 in figuur C5) heeft verlaten, kan deze vrij bewegen en wordt deze door de voorgespannen sluiterveer (nr 10 in figuur C5) verplaatst (aangegeven met de rode pijl) zodanig dat het slagpijpje met initiëelading in lijn komt met de slagpin en de overdrachtslading. Vanaf dit moment is de schokbuis gewapend en staat deze 'op scherp'. De veer drukt nu de terugslagkap met de slagpin in de bovenste stand en voorkomt dat de slagpin de detonator kan raken tijdens de vlucht.

Figuur C6 toont de onderdelen die deel uitmaken van het wapeningsmechaniek.⁷ Omdat de terugslagkap met de slagpin door de traagheidskracht tegen het sluitershuis wordt gedruwd tijdens het versnellen is het onmogelijk dat de schokbuis zich scherp stelt in de mortier. De punt van de slagpin steekt in deze stand namelijk in een opening van de sluiters, zodat de sluiters in de veilige stand is gefixeerd. Pas bij het wegvallen van de versnelling, dus na het verlaten van de mortier, wordt de schokbuis scherp gesteld. De tijd die de veer nodig heeft om de slagpin uit de opening in de sluiters te duwen plus de tijd die de sluiterveer vervolgens nodig heeft om de sluiters "in lijn" te duwen bepalen samen de tijdsduur die nodig is om de schokbuis op scherp te zetten. Deze wapeningstijd maal de snelheid waarmee de mortiergranaat de mortier verlaat (mondingsnelheid), bepaalt de weg die de granaat heeft afgelegd op het moment dat de schokbuis is scherpgesteld. Deze afgelegde weg of wapeningsafstand wordt aangeduid met 'maskerveiligheid' of 'wapeningsafstand'. Volgens documentatie van het ministerie van Defensie ligt de maskerveiligheid van de schokbuis M6-N tussen 0,75 en 10 m gemeten vanaf de vuurmond van de mortier.⁸ In vergelijking met andere mortiergranaten is deze maskerveiligheid gering.

⁷ Niet op schaal.

⁸ VS 9-847 Voorschrift geschut- en mortiermunitie 20 mm – 84 mm (B), B27.03 cartridge, 60 mm: HE, 80, F/MR, HB, 15-1-2015.



Figuur C6: Links een huis met deels zichtbare sluiters en setback-kogel, de terugslagkap met daaronder een (niet zichtbare) veer en de setback-kogel tussen de terugslagklep en slagpinbegrenzer; het geheel is gepositioneerd op de afsluitplaat, met links de sluitveer. Rechtsboven: slagpin, rechtsmidden: sluiters met initiatielading aan de rechterbovenkant en uitsparingen voor de slagpinblokkering aan de linkerbovenkant en voor de sluitersveer aan de rechterzijkant. Foto rechtsonder: onderkant van een afsluitplaat met overdrachtslading in het midden en twee openingen die dienen voor assemblage. (Bron: Defensie).

Beschermkap

De beschermkap (figuur C2) is op de bovenzijde van de schokbuis geplaatst. De kap wordt geblokkeerd door een veiligheidspin met lint, de kap dient volgens de bedieningsrichtlijn zo laat mogelijk voor het afvuren te worden verwijderd. De kap beschermt een onderliggend membraan. Bij het raken van de grond of een object duwt het membraan de slagpin (tegen de veerdruk in) in het slagpijpje met de initiatielading waardoor deze detoneert en de explosieketen in gang zet; het slagpijpje initieert de overdrachtslading welke de schokversterker initieert. De schokversterker draagt de detonatie over aan de hoofdlading waardoor de stalen mantel van de mortiergranaat verscherft. Het membraan voorkomt dat de slagpin tijdens de vlucht door de veer uit de granaat wordt gedrukt wanneer de schokbuis op scherp wordt gesteld na het verlaten van de mortier.

De beschermkap, aangeduid met 'transportveiligheid'⁹ en de veiligheidspin voorkomen beschadiging van het kwetsbare membraan bij transport en/of hantering van de mortiergranaat. De beschermkap en veiligheidspin blokkeren niet de bewegende delen van het wapeningsmechanisme en dragen dus niet bij aan de veiligheid van de mortiergranaat voor de gebruiker.

⁹ VS 9-847 Voorschrift geschut- en mortiermunitie 20 mm – 84 mm (B), B27.03 cartridge, 60 mm: HE, 80, F/MR, HB, 15-1-2015.

RECONSTRUCTIE VERLOOP SCHIETOEFENING 6 JULI 2016

Noot vooraf: de foto's en videobeelden waaraan deze bijlage refereert zijn om reden van piëteit niet in dit rapport opgenomen. Het beeldmateriaal blijft bewaard in het archief van de Onderzoeksraad.

Op 19 juli 2016 bezocht de Commissie van Onderzoek van Defensie (CvO) samen met een onderzoeker van de Onderzoeksraad de munitieopslag in Kamp Nassau te Kidal. De commissie trof daar een hoeveelheid mortiergranaten aan van 60 mm-kaliber, waarvan een deel restant is van de veertig granaten (vier kisten à tien granaten) die zijn meegenomen naar de schietoefening op 6 juli 2016.

Uit getuigenverklaringen en uit beeldmateriaal valt op te maken dat er tijdens de oefening ten minste 22 granaten zijn verschoten (inclusief de fatale granaat) en dat er vijf granaten na afloop van het ongeval ter plaatse zijn vernietigd. Hieruit volgt dat er maximaal dertien granaten mee terug zijn genomen naar Kamp Nassau in Kidal.

De CvO heeft in Kamp Nassau het volgende aangetroffen (rapport CvO).¹⁰

1. Drie losse granaten, verpakt in kartonnen kokers.
2. Een verzegelde kist met tien granaten in kokers.
3. Een onverzegelde kist met tien granaten in kokers, twee verschillende lotnummers.
4. Een onverzegelde kist met acht granaten, niet in kokers verpakt.

Het is evident dat de acht granaten van item 4 op de oefenlocatie zijn uitgepakt. Het is namelijk voorschrift om de verpakking niet eerder te openen dan direct voor gebruik. Omdat er maximaal dertien granaten van de oefening zijn teruggekomen, kan item 4 alleen gecombineerd zijn geweest met item 1. Combinatie van item 4 met item 2 of met item 3 is onmogelijk.

Er doen zich dus twee mogelijkheden voor:

Optie A: Er zijn acht granaten zonder verpakking mee teruggenomen naar Kamp Nassau in Kidal (alleen item 4);

¹⁰ De CvO heeft totaal 31 granaten aangetroffen. Twee dagen later heeft het munitiebedrijf, dat opdracht had de schokbuizen met een röntgentoestel te inspecteren, vijf kisten met in totaal 41 granaten aangetroffen. In de tussentijd zijn dus de drie losse granaten (item 1) in een munitiekist gelegd en is één volle kist met 10 granaten aan de voorraad toegevoegd.

Optie B: Er zijn acht granaten zonder verpakking en drie granaten in verpakking mee teruggenomen naar Kamp Nassau. Totaal elf (item 4 + item 1).

In beide opties zijn er geen volle kisten met granaten mee teruggenomen, waaruit volgt dat alle vier de kisten op de oefenlocatie zijn aangesproken.

De twee opties zijn hieronder uitgewerkt.

OPTIE A: Acht granaten zonder verpakking teruggebracht naar Kidal

Wat weten we?

- Acht granaten zijn zonder verpakking mee teruggenomen naar Kidal (aannee).
- Er zijn vier munitiekisten meegenomen naar de schietbaan, elk met tien granaten.
- Vijf granaten zijn op de plaats van het ongeval achtergebleven (foto's DSCN2063 e.v.). Deze zijn op verzoek van de ploegcommandant door Franse militairen vernietigd.
- Uit het bovenstaande volgt dat in deze optie $40 - 5 - 8 = 27$ **granaten** zijn verschoten.

Er is in vier series geschoten, met bedieners van het wapen (schutter en helper) in wisselende samenstelling. Tussen serie twee en drie was een pauze van ongeveer een uur en drie kwartier.

Om 07.30 uur is begonnen met de eerste serie, door mortierist 1 (schutter) en mortierist 2 (helper). Zij hebben ongeveer tien schoten gelost.

In de *tweede serie*, aansluitend op de eerste, hebben mortierist 2 (schutter) en mortierist 3 (helper) acht schoten gelost.

In de *eerste plus de tweede serie* zijn samen vijftien tot twintig schoten gelost, dan wel ongeveer achttien.

In de *derde serie* hebben de ploegcommandant (schutter) en mortierist 3 (helper) vier schoten gelost. De schoten zijn alle vier op video vastgelegd (GOPRO229 t/m GOPRO232).

Vervolgens hebben in de *vierde serie* mortierist 3 (schutter) en mortierist 4 (helper) *ten minste drie* schoten gelost (GOOIO233 t/m GOOIO252), inclusief het fatale schot (GOPRO253).

In de *derde plus vierde serie* zijn dus ten minste zeven schoten gelost. Dit strookt met de eerdere conclusie dat in de eerste plus tweede serie minimaal vijftien en maximaal twintig granaten zijn gebruikt, waarschijnlijk tien in de eerste serie en minimaal vijf, maximaal tien in de tweede.

Tussenconclusie optie A

- In de eerste plus tweede serie zijn vijftien tot twintig granaten verschoten;
- In de derde serie zijn vier granaten verschoten;
- In de vierde serie zijn drie tot acht granaten verschoten.

Beschouwing van de munitiekisten

In het voorgaande is geconcludeerd dat alle vier de munitiekisten zijn aangesproken. De vraag is hoe de verschoten 27 granaten (optie A) over de vier kisten zijn verdeeld. Er zijn twee mogelijkheden denkbaar:

Optie A1: na elke serie werden de overgebleven granaten bij de tien granaten van de volgende kist gevoegd.

Optie A2: na elke serie werden de overgebleven granaten teruggelegd in het voertuig. Voor elke serie werd een nieuwe kist geopend.

Uitwerking Optie A1 (doorgeschoven granaten).

In de series 1 en 2 zijn twee kisten gebruikt, waarbij van de tweede kist nul tot vijf granaten overbleven. Gevoegd bij de tien granaten van de derde kist waren er voor de derde serie dus tien tot vijftien granaten beschikbaar.

In de derde serie zijn vier granaten verschoten, dus na afloop waren er zes tot elf granaten over.

Indien in de vierde serie een nieuwe kist was geopend, zouden er 16 tot 21 granaten beschikbaar zijn geweest. Omdat er na afloop van de vierde serie nog vijf granaten in de kist lagen, zouden er elf tot zestien in die serie moeten zijn verschoten. Het totale aantal verschoten granaten zou dan minimaal $15 + 4 + 11 = 30$ zijn geweest. Dat is meer dan het werkelijke aantal van 27, waaruit volgt dat er voor de vierde serie géén nieuwe kist geopend kan zijn.

Dit laatste is strijdig met de eerdere conclusie dat alle vier de kisten zijn aangesproken.

Optie A1 valt op deze grond te verwerpen.

Uitwerking Optie A2 (steeds een nieuwe kist)

De acht granaten die (in deze optie) zijn teruggebracht naar Kidal, zijn overgebleven van de eerste drie series (eerste drie kisten). De vijf overgebleven granaten van de vierde serie (vierde kist) zijn immers op de plaats van het ongeval achtergebleven en door de Fransen vernietigd.

In de eerste drie series (eerste drie kisten) zijn dus $30 - 8 = 22$ granaten verschoten.

Daarvan zijn $22 - 4 = 18$ granaten verschoten tijdens de eerste twee series (eerste twee kisten).

Eindconclusie optie A2

Er zijn tijdens de oefening 27 schoten gelost. Daarvan zijn er achttien gelost in de eerste en tweede serie samen, vier in de derde serie en vijf in de vierde.

Argumenten VOOR optie A2:

- De videobeelden van de derde serie. In deze optie liggen er na de achtereenvolgende schoten nog 9, 8, 7 en 6 granaten in de kist. Deze aantallen corresponderen goed met wat er op de videobeelden zichtbaar is.
- Het feit dat er vier kisten zijn geopend stemt overeen met het optreden in vier series.

Argumenten TEGEN optie A2:

- Het ontbreekt aan logica om steeds een nieuwe kist te openen zonder eerst de oude op te maken. Geen van de getuigen heeft bevestigd dat dit inderdaad de werkwijze was.
- Het lijkt minder aannemelijk dat in de vierde serie vijf schoten zijn gelost. Twee getuigen meldden dat het eerste schot in de vierde serie meteen het fatale schot was. Dit is aantoonbaar onjuist - op de fotoserie GOOIO233 – GOOIO252 zijn namelijk twee eerdere schoten zichtbaar. De getuigenverklaringen maken het echter wel aannemelijker dat er twee schoten aan het fatale schot vooraf gingen, dan vier.

Samenvattend optie A2: niet onmogelijk, wel onlogisch en niet conform getuigenverklaringen. Derhalve niet waarschijnlijk.

Omdat optie A1 onmogelijk is en optie A2 onwaarschijnlijk, blijft optie B als de meest waarschijnlijke mogelijkheid over.

OPTIE B: Elf granaten teruggebracht naar Kamp Nassau in Kidal, waarvan drie in verpakking en acht zonder verpakking

Wat weten we?

- Er zijn vier munitiekisten meegenomen naar de schietbaan, elk met tien granaten. Alle vier de kisten zijn aangesproken.
- Vijf granaten zijn, zonder verpakking, op de plaats van het ongeval achtergebleven (foto's DSCN2063 e.v.). Deze zijn op verzoek van de ploegcommandant door Franse militairen vernietigd.
- De CvO heeft drie granaten aangetroffen in kokers verpakt, niet in een kist, en acht granaten zonder verpakking, wel in een kist. [aanname: $8 + 3 = 11$ granaten zijn na afloop van de oefening/ongeval mee teruggenomen naar Kidal]
- Uit het bovenstaande volgt dat tijdens de oefening $40 - 5 - 11 = 24$ granaten zijn verschoten.

Er is in vier series geschoten, met bedieners van het wapen (schutter en helper) in wisselende samenstelling. Tussen serie twee en drie was een pauze van ongeveer een uur en drie kwartier.

Om 07.30 uur is begonnen met de eerste serie, door mortierist 1 (schutter) en mortierist 2 (helper). Zij hebben ongeveer tien schoten gelost.

In de tweede serie, aansluitend op de eerste, hebben mortierist 2 (schutter) en mortierist 3 (helper) acht schoten gelost.

In de eerste plus de tweede serie zijn samen vijftien tot twintig schoten gelost (verklaring ploegcommandant), dan wel ongeveer achttien.

Omdat in de derde en vierde series de granaten vooraf uit de verpakking zijn gehaald, kunnen de drie granaten die de CvO in verpakking heeft aangetroffen, onmogelijk restanten zijn van de derde en vierde serie. Zij moeten dus afkomstig zijn van de eerste plus tweede serie.

Hieruit volgt dat in de eerste en tweede serie samen zeventien granaten verschoten zijn. Dit aantal valt binnen de range van vijftien tot twintig schoten, en ligt dichtbij de schatting van mortierist 2 (ongeveer achttien).

Omdat de drie niet-verschoten granaten in de verpakking teruggebracht zijn naar Kidal, waren voor de derde en vierde serie samen twintig granaten beschikbaar. Deze zijn alle vooraf uit de verpakking gehaald.

In de derde serie hebben de ploegcommandant (schutter) en mortierist 3 (helper) vier schoten gelost. De schoten zijn alle vier op video vastgelegd (GOPRO229 t/m GOPRO232).

Voor de vierde serie waren nog $20 - 4 = 16$ granaten beschikbaar. Hiervan zijn er acht teruggebracht naar Kidal, en vijf zijn er na afloop door de Fransen vernietigd. Hieruit volgt dat in de vierde serie mortierist 3 (schutter) en mortierist 4 (helper) drie schoten hebben gelost. Deze zijn alle op beeld vastgelegd (GOOIO233 t/m GOOIO252), inclusief het fatale schot (GOPRO253).

Tussenconclusie Optie B

- In de eerste plus tweede serie zijn zeventien granaten verschoten; drie granaten zijn in cilinderverpakking teruggebracht naar Kidal;
- In de derde serie zijn vier granaten verschoten;
- In de vierde serie zijn drie granaten verschoten;
- Vijf granaten zijn door de Fransen vernietigd;
- Acht granaten zijn zonder cilinderverpakking teruggebracht naar Kidal.

Ter controle: $17 + 3 + 4 + 3 + 5 + 8 = 40^{11}$.

Beschouwing van de munitiekisten

De zeventien afgeschoten granaten van de eerste en tweede serie waren uit twee kisten afkomstig. De drie overgebleven granaten zijn teruggebracht naar Kidal. De eerste serie verhoudt zich tot de tweede als $10 : 7$, of als $9 : 8$, of als $8 : 9$, of als $7 : 10$. De eerste mogelijkheid is zeker de meest logische. Dat betekent dat voor de tweede serie een nieuwe kist is aangesproken, waarvan er drie overbleven (namelijk omdat het zevende schot een blindganger was).

Hieruit volgt dat ook voor de derde serie een nieuwe kist is aangesproken.

In de derde serie zijn vier granaten verschoten. Er bleven er dus zes over.

In de vierde serie zijn drie granaten verschoten, inclusief het fatale schot. Er bleven er vijf over, die door de Fransen zijn vernietigd. Bij aanvang van de vierde serie waren er dus acht granaten in de kist.

Hieruit volgt dat de vierde serie geen gebruik heeft gemaakt van de kist met zes overgebleven granaten van de derde serie. Indien mortierist 3 en mortierist 4 de kist van de derde serie hadden overgenomen, zouden er immers drie granaten zijn overgebleven en geen vijf.

Hieruit volgt dat ook voor de vierde serie een nieuwe kist is geopend. Omdat mortierist 3 en mortierist 4 met acht granaten zijn begonnen, en niet met tien, moeten zij tevoren twee granaten uit de kist hebben genomen en in de kist met zes overgebleven granaten van de derde serie hebben gelegd.

Deze handeling lijkt op het eerste gezicht onlogisch, maar is verklaarbaar vanuit de veronderstelling dat de mortiergroep na de vierde nog een vijfde serie schoten had willen lossen. Deze vijfde serie is er uiteraard nooit gekomen, omdat het ongeval de vierde serie heeft onderbroken.

¹¹ In totaal zijn $3 + 8 = 11$ granaten teruggebracht naar Kidal. Daags na het ongeval heeft het munitiebedrijf, dat opdracht had de schokbuizen met een röntgentoestel te inspecteren, 41 granaten aangetroffen. Daarvan zijn er dus 30 niet op de plaats van de oefening geweest. Omdat ten behoeve van de oefening op 6 juli 40 granaten uit het depot zijn gehaald, waren er oorspronkelijk dus $30 + 40 = 70$ exemplaren aanwezig. Dit aantal wijkt af van de vermelding op het registratieformulier van het munitiebeheer in Kidal (3 juli: 67 exemplaren).

Om zowel de vierde als de vijfde serie met acht granaten uit te kunnen voeren hebben mortierist 3 en mortierist 4 twee granaten uit hun kist bij de zes overgebleven granaten van de derde serie gevoegd. Op een beeldopname na het ongeval is de derde kist zichtbaar in de deuropening van het voertuig (figuur D1).



Figuur D1: Beeld uit video-opname Defensie van de achterzijde van het voertuig, gemaakt na het ongeval. Rechts in de deuropening is de derde munitiekist geplaatst, zonder het deksel. Twee granaten zijn zichtbaar doordat zij schuin tegen de rechter binnenwand van de kist zijn geplaatst. (Bron: Defensie)

De twee toegevoegde granaten steken met hun punt boven de kist uit doordat zij schuin tegen de binnenwand van de kist zijn geplaatst. Deze kist, met acht uitgepakte granaten, is na het ongeval mee teruggebracht naar Kidal.

Figuur D2 laat de kist zien zoals deze twee weken na het ongeval door de CvO in Kidal is aangetroffen. De twee toegevoegde granaten liggen ten opzichte van de andere zes andersom georiënteerd.



Figuur D2: De kist met acht onverpakte granaten in de munitieopslag van Kamp Nassau te Kidal, zoals aangetroffen door de Commissie van Onderzoek van Defensie. Twee granaten liggen met de punt (schokbuis) naar rechts georiënteerd; dit zijn waarschijnlijk de twee granaten die, voorafgaand aan de vierde serie, uit de vierde kist zijn gehaald en bij de zes granaten in de derde kist zijn gevoegd. (Bron: CvO Defensie)

Bij het voornemen om een vijfde serie uit te voeren kan mede een rol hebben gespeeld dat één van de vier leden van de mortiergroep (namelijk mortierist 4) zonder die vijfde serie niet aan de beurt zou zijn geweest om als schutter op te treden. Merk op dat alle zeven schoten na de pauze (derde plus vierde serie) met de GOPRO-camera zijn vastgelegd.

Eindconclusie

Het meest waarschijnlijke verloop van de schietoefening is als volgt:

- Eerste serie (*mortierist 1 / mortierist 2*): tien schoten, alle uit de eerste kist. De granaten werden tijdens het schieten een voor een uit hun cilinderverpakking gehaald.
- Tweede serie (*mortierist 2 / mortierist 3*): zeven schoten, alle uit de tweede kist. De granaten werden tijdens het schieten een voor een uit hun cilinderverpakking gehaald. Deze serie werd onderbroken doordat het zevende schot een blindganger was. De drie overgebleven granaten werden, in hun cilinderverpakking, teruggelegd in het voertuig. Zij gingen na het ongeval mee terug naar Kamp Nassau in Kidal.
- Door de blindganger, en vervolgens door het ongeval met de quad, volgde nu een pauze van een uur en drie kwartier. De mannen gebruikten die tijd om de granaten in de derde en vierde kist alvast uit hun cilinderverpakking te halen.

- Derde serie (*ploegcommandant / mortierist 3*): vier schoten, alle uit de derde kist.
- Voorafgaand aan de vierde serie verplaatsten de mannen twee (onverpakte) granaten van de vierde naar de derde kist. In beide kisten bevonden zich nu acht granaten.
- Vierde serie (*mortierist 3 / mortierist 4*): drie schoten uit de vierde kist. Het derde is het fatale schot. Er blijven vijf onverpakte granaten achter in de vierde kist, die later door de Fransen worden vernietigd.
- De vijfde serie: acht schoten voor *mortierist 4/ mortierist 1*, is nooit uitgevoerd. De kist met acht granaten zonder verpakking is teruggebracht naar Kamp Nassau in Kidal.

TECHNISCH ONDERZOEK RESTANTEN MORTIER EN MORTIERGRANAAT

Na het ongeval op 6 juli 2016 zijn door defensiemedewerkers ter plaatse diverse onderdelen en fragmenten verzameld van de mortier en de mortiergranaat. Twee weken later heeft ook de Commissie van Onderzoek van Defensie (CvO) op de plaats van het ongeval nog een aantal restanten van het wapensysteem teruggevonden.

In opdracht van de Onderzoeksraad heeft TNO deze onderdelen en fragmenten visueel onderzocht. Doel van dit onderzoek was de fragmenten en onderdelen te identificeren en aan de hand van schade patronen de eerste aanwijzingen te vinden omtrent de directe oorzaken van het ongeval.

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 2016 R11512 | Final

**Ongeval mortieroefening Mali: Algemene
technische onderzoeksvragen met betrekking
tot de restanten**

Datum	14 december 2016
Auteur(s)	Ir. E.J. Kroon, Dr. Ir. R.H.B. Bouma, Ir. P.A. Hooijmeijer
Aantal pagina's	38 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	2
Opdrachtgever	Onderzoeksraad Voor Veiligheid
Projectnaam	Ongeval mortieroefening Mali: Algemene technische onderzoeksvragen met betrekking tot de restanten
Projectnummer	060.25340

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2017 TNO

Samenvatting

Naar aanleiding van het dodelijk ongeval tijdens een mortiergranaatoefening in Mali op 6 juli 2016, heeft de Onderzoeksraad Voor Veiligheid (OVV) een aantal technische vragen geformuleerd en voorgelegd aan TNO. Ter facilitering van het beantwoorden van deze vragen heeft de OVV de teruggevonden restanten van de mortier en de schietbuis, de filmbeelden van het ongeval en een intact wapensysteem overhandigd aan TNO.

TNO concludeert, op basis van de beschikbare informatie en restanten, dat het ongeval is veroorzaakt door het prematuur functioneren van de bij het ongeval geladen 60 mm High Explosive (HE 80) mortiergranaat.

Deze conclusie is gebaseerd op analyse van de door de OVV beschikbaar gestelde informatie, die uitwijst dat:

- er geen tweede mortiergranaat is geladen (double loading) voordat de voorgaande mortiergranaat is afgevuurd;
- er geen onregelmatigheden zijn aan de schietbuis;
- er geen afwijkingen zijn aan de slagpin in de voetplaat van de schietbuis;
- het schadebeeld aan de schietbuis overeenkomt met de positie van de reactie van de hoofdclading, op of vlak na het moment dat de mortiergranaat de bodem van de schietbuis heeft bereikt;
- de hoofdclading van de mortiergranaat is gedetoneerd.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	4
1.1	Algemeen	4
1.2	Doelstelling	4
1.3	Opbouw rapport.....	4
2	Analyse	5
2.1	Identificatie restanten	5
2.2	Reconstructie	6
2.3	Inmeten voetplaat en slagpin	7
2.4	Inmeten staartstuk.....	9
2.5	Metallurgisch onderzoek breukvlakken van de granaatwerper	10
2.6	Metallurgisch onderzoek veroudering van de granaatwerper	10
2.7	Inslag slagpin op slaghoedje	10
2.8	Profiel van de slagpin	11
2.9	Positie kern van de explosie.....	11
2.10	Explosie van één of twee granaten	13
2.11	Schade door hoofdlading of grondkardoes, plus type reactie	19
2.12	Binnenzijde schietbuis.....	26
2.13	Granaatresten van één of twee granaten.....	27
2.14	Componenten van schokbuis	27
2.15	Verklaring schadebeeld staartstuk	29
3	Conclusies	32
4	Referenties	33
5	Ondertekening	34
	Bijlage(n)	
	A Inventarisatie gevonden restanten	
	B Reactie typen	

1 Inleiding

1.1 Algemeen

Op 6 juli 2016 heeft een dodelijk ongeval plaatsgevonden in Mali tijdens een mortiergranaatoefening. De Onderzoeksraad Voor Veiligheid (OVV) heeft op basis van een verkennend onderzoek besloten een onderzoek te starten naar:

- De oorzaak van het voorval;
- De achterliggende factoren;
- De (medische) hulpverlening aan de betrokken militairen.

Ten behoeve van het onderzoek naar de oorzaak van het voorval heeft de OVV een eerste set technische onderzoeksvragen met betrekking tot de restanten van het wapensysteem en de mortiergranaat geformuleerd (OVV-document, d.d. 13 september 2016). Daarnaast heeft de OVV een set aanvullende technische vragen geformuleerd om de oorzaak van het voorval te achterhalen (OVV-document, d.d. 13 september 2016). De OVV heeft TNO verzocht beide sets vragen te beantwoorden.

Ter facilitering van het onderzoek heeft de OVV op 8 november 2016 de gevonden restanten van het wapensysteem en granaat aan TNO overgedragen, inclusief een intact wapensysteem.

In dit rapport worden de door de OVV opgestelde eerste set onderzoeksvragen en aanvullende technische vragen beantwoord.

1.2 Doelstelling

Doelstelling van het huidige project is om aan de hand van de gevonden restanten vast te stellen of de mogelijke oorzaak van het ongeval gezocht moet worden in de mortiergranaat (inclusief schokbuis) en/of het wapensysteem (de schietbuis).

1.3 Opbouw rapport

Hoofdstuk 2 beantwoordt de door de OVV opgestelde onderzoeksvragen. Hoofdstuk 3 beschrijft de conclusies.

2 Analyse

In dit hoofdstuk wordt per paragraaf een onderzoeksvraag beantwoord zoals geformuleerd door de OVV. Paragrafen verwijzen naar elkaar in het geval van overlap of samenhang tussen verschillende onderzoeksvragen.

2.1 Identificatie restanten

Technische onderzoeksvraag V1.1

Zijn de gevonden delen te identificeren?

Antwoord

Van de gevonden restanten is een inventarisatie gemaakt (zie Appendix A). Van elk van de delen is een beschrijving gegeven van waar het deel afkomstig is. De kleine fragmenten en onderdelen die bij de tweede zoeking in het gebied rond de rampplek enkele dagen na het ongeval zijn gevonden, zijn niet in de inventarisatie opgenomen, omdat ze geen bijdrage leveren aan het beantwoorden van de onderzoeksvragen binnen deze opdracht.

Op basis van de inventarisatie zijn de volgende delen geïdentificeerd:

Schietbuis

- Bovenzijde schietbuis (No. 513), met langwerpig gevormde repen metaal aan de onderzijde;
- Voetplaat mortiersysteem, met losgetrokken schroefdraad, en inclusief de slagpin;
- Onderzijde schietbuis, inclusief schroefdraad welke in de voetplaat wordt gedraaid; met langwerpig gevormde repen metaal aan de bovenzijde;
- Drie langwerpig gevormde repen met schroefdraad, behorend bij de onderzijde van de schietbuis (omtrek is niet compleet);
- Twee langwerpig gevormde repen, behorend bij de bovenzijde van de schietbuis;
- Flens met bevestigingsbout voor draagriem, behorend bij de onderzijde van de schietbuis.

Commandovizier

- Deel draaiwiel ter bevestiging van het commandovizier op de schietbuis;
- Verbindingspin behorend bij het bevestigingsdeel van het commandovizier aan de schietbuis;
- Stelwiel behorend bij het instellingsmechanisme van het commandovizier,
- Vier delen van het huis van het commandovizier;
- Stelwiel met losse waterpas behorend bij het instellingsmechanisme van het commandovizier.

Granaat

- Aluminium staartstuk;
- Diverse aluminium delen van de schokbuisbehuizing;
- Schroefdraad verbinding hoofdclading met staartstuk;
- Transportveiligheidslintje.

Overig

- Canvas handbeschermer;
- Restanten van de draagriem.

Niet geïdentificeerd

- Langwerpig deel met schroefdraad;
- Vervormd dik cilindrisch metalen deel (mogelijk de afsluitplaat van de schokbuis);
- Vervormd dun cilindrisch metalen plaatje (mogelijk afdekplaatje van de schokversterker);
- Stalen ring (behoort niet bij binnenwerk commandovizier);
- Diverse kleinere delen die uit de lichamen van de slachtoffers zijn verwijderd.

Niet onderzocht

- Scherfvesten en schoenen slachtoffers.

2.2 Reconstructie*Technische onderzoeksvraag V2.1*

De verschillende weggeworpen delen van de granaatwerper in samenhang met de gevonden bovenzijde en onderzijde te reconstrueren, in te meten om zo de positie van de hoofdclading vast te stellen, gerekend vanaf de voet.

Antwoord

Op basis van een analyse van de gevonden restanten is een reconstructie gemaakt van de beschadigde schietbuis. Deze reconstructie is in Figuur 1 gepositioneerd naast een intacte schietbuis. De reconstructie toont een vergelijkbaar schadepatroon aan de bovenzijde en onderzijde van de schietbuis ten opzichte van de positie van het commandovizier. Ter hoogte van de oorspronkelijke positie van het commandovizier ontbreekt het grootste gedeelte van de schietbuis. Het ontbreken van deze delen is een indicatie voor de mate van verscherping van dit deel van de schietbuis. De kleinere fragmenten van de schietbuis als gevolg van fragmentatie zijn moeilijker te vinden en zijn dus vermoedelijk niet teruggevonden bij het nazoeken van de locatie van het ongeval. Het is tevens mogelijk dat kleinere delen van de schietbuis zich tussen de resterende kleine fragmenten bevinden welke uit de lichamen van de slachtoffers zijn verwijderd of nog in de scherfvesten zitten. Ook van het commandovizier ontbreken grote delen. Figuur 1 geeft een reconstructie van de gevonden onderdelen van de schietbuis. Ter referentie wordt tevens een intacte schietbuis getoond.

De feitelijke positionering van de mortiergranaat wordt beschreven in paragraaf 2.9, die antwoord geeft op de aanvullende onderzoeksvraag AV1.1.



Figuur 1 Reconstructie gevonden delen schietbuis No. 513 (onder) en een intacte schietbuis No. 500 (boven).

2.3 Inmeten voetplaat en slagpin

Technische onderzoeksvraag V2.2

Meet het profiel in van de binnenkant van de voetplaat van de werper, in samenhang met het profiel van de slagpin.

Antwoord

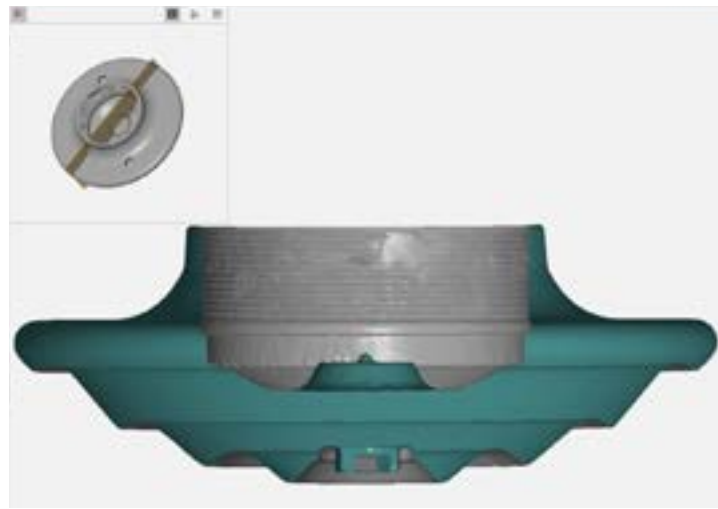
De voetplaat is ingemeten met een digitale 3D scanner¹. Deze scanner levert een nauwkeurigheid van 0.04 mm. Aan de hand van het gegenereerde 3D model is het mogelijk metingen te verrichten aan de voetplaat. Enkele beelden van deze scan zijn weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 Screenshots 3D model van de voetplaat.

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

Aan de hand van de 3D scan van de voetplaat is een doorsnede gemaakt precies door het midden van de voetplaat en de slagpin. De slagpin is in de voetplaat geschroefd; de doorsnede in Figuur 3 geeft aan in hoeverre de slagpin uitsteekt boven het centrale plateau, namelijk 1.73 mm. De slagpin moet 1,5 - 1,8 mm boven het centrale plateau uitsteken [ref. 1].



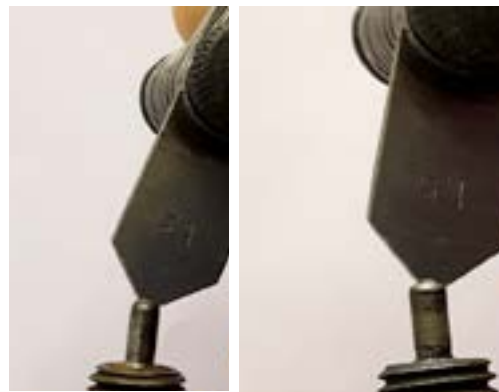
Figuur 3 Doorsnede van de voetplaat door het centrum van de slagpin.

Om het profiel van de voetplaat vast te leggen is deze losgeschroefd uit de voetplaat. De slagpin is gefotografeerd samen met een slagpin uit de intacte schietbuis, zie Figuur 4.



Figuur 4 Vergelijk beide slagpinnen (links: referentie, rechts: ongeval).

De slagpinnen zijn beide recht in vergelijking met de schroefdraad, maar er wordt een verschil geconstateerd tussen de vorm van de tip van beide slagpinnen; de slagpin uit het referentie wapen is afgevlakt ten opzichte van de punt van de slagpin uit de beschadigde schietbuis, zie Figuur 4 en Figuur 5. Aangenomen wordt dat de tip van de slagpin afvlakt met het aantal afgevuurde mortiergranaten. Het is dus waarschijnlijk dat er meer mortiergranaten zijn afgevuurd met de slagpin uit de referentie schietbuis dan met de slagpin uit de schietbuis van het ongeval. De dimensies van beide slagpinnen zijn ingemeten en meetwaarden staan vermeld in Tabel 1.



Figuur 5 Inmeten dimensies slagpin uit de schietbuis van het ongeval (links) en uit de referentie schietbuis (rechts).

Tabel 1 Dimensies slagpin uit de schietbuis van het ongeval en de referentie schietbuis.

Dimensies slagpin	Ongeval schietbuis No. 513	Referentie schietbuis No. 500
Diameter boven [mm]	2.98	2.99 - 3.00
Diameter midden [mm]	2.97	2.98 - 3.00
Diameter onder [mm]	2.96 - 2.97	2.83 - 2.87
Kromtestraal [mm]	1.5	> 1.5
Lengte slagpin [mm]	7.94	7.55
Lengte slagpin + schroefdraad [mm]	19.56 - 19.60	19.27 - 19.28

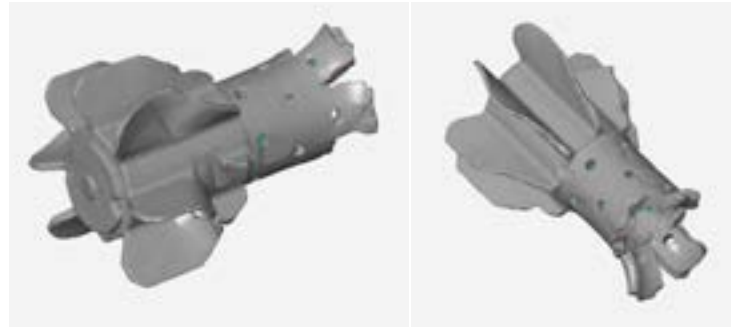
2.4 Inmeten staartstuk

Technische onderzoeksvraag V2.3

Breng de deformatie van het staartstuk van de granaat in kaart.

Antwoord

Ook het staartstuk is ingemeten met behulp van de eerder genoemde 3D scanner. Figuur 6 geeft twee screenshots van het 3D model.



Figuur 6 Screenshots 3D model staartstuk mortiergranaat.

2.5 Metallurgisch onderzoek breukvlakken van de granaatwerper

Technische onderzoeksvraag V3.1

Stel van de delen van de granaatwerper metallurgisch vast of de breuken reeds bestonden of door de explosie zijn ontstaan (bepaal de soort van de breuk).

Antwoord

Deze vraag is in deze fase van het onderzoek komen te vervallen in overleg met de OVV.

2.6 Metallurgisch onderzoek veroudering van de granaatwerper

Technische onderzoeksvraag V3.2

Stel van de delen van de granaatwerper metallurgisch vast of deze delen onderhevig zijn geweest aan veroudering.

Antwoord

Deze vraag is in deze fase van het onderzoek komen te vervallen in overleg met de OVV.

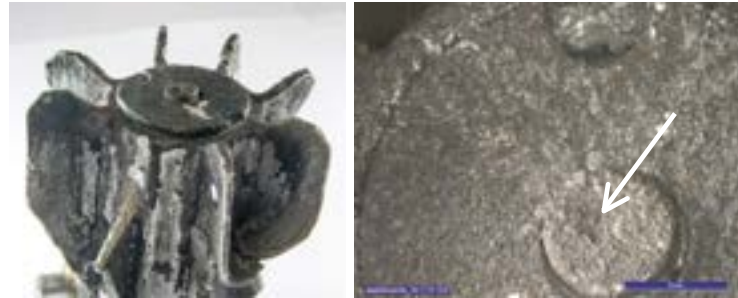
2.7 Inslag slagpin op slaghoedje

Technische onderzoeksvraag V3.3

Stel door destructief onderzoek (afpellen) vast of er sprake is geweest van een inslag van de slagpin.

Antwoord

Er is een visuele en microscopische inspectie van het staartstuk uitgevoerd. Het staartstuk vertoont substantiële schade ten gevolge van het ongeval. De reactie van de hoofdloading heeft geleid tot vervormingen van het staartstuk, beschadigingen ten gevolge van inslag van fragmenten en het oppervlak is aangetast door hoge temperaturen en verbrandingsgassen. Er is bij de visuele en microscopische inspectie een indeuking vastgesteld van het slaghoedje in de grondkardoes, zie Figuur 7.



Figuur 7 Indeuking van het slaghoedje van de grondkardoes in het staartstuk van de mortiergranaat (links), met een microscopische uitvergroting van het slaghoedje (rechts).

De slagpin heeft het slaghoedje iets uit het centrum geraakt. Duidelijk is te zien dat het slaghoedje scheef staat ten opzichte van het oppervlak van de grondkardoes. Op basis van deze indeuking wordt geconcludeerd dat de mortiergranaat de bodem van de schietbuis daadwerkelijk heeft bereikt.

Bij onderzoeksvraag AV1.2 in paragraaf 2.10 wordt vastgesteld dat de valtijd van de mortiergranaat in de schietbuis overeenkomt met de tijd die nodig is om de bodem van de schietbuis te bereiken. Deze indeuking zal bij correct functioneren initiatie van de grondkardoes veroorzaken. In paragraaf 2.11 wordt ingegaan op het verbrandingsproces van de grondkardoes en aanvullingslading.

2.8 Profiel van de slagpin

Technische onderzoeksvraag V4.1

Stel het profiel vast van de aanwezige slagpin door het maken van een doorsnede foto.

Antwoord

Zie paragraaf 2.3.

2.9 Positie kern van de explosie

Aanvullende onderzoeksvraag AV1.1

Is aan de hand van de fragmenten van de schietbuis na te gaan op welke hoogte in de schietbuis de kern van de explosie zich bevond?

Antwoord

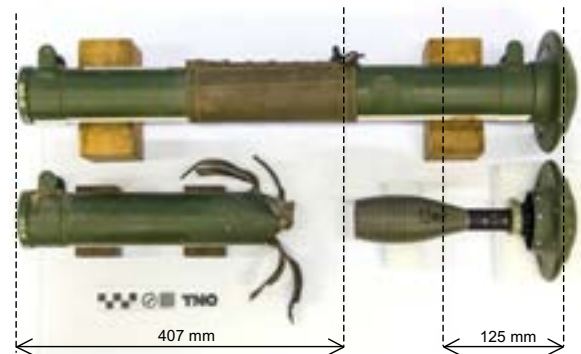
De positie van de mortiergranaat op het moment van de reactie tijdens het ongeval is vastgesteld. Een aantal zaken draagt bij aan het vaststellen van de precieze positie:

- De filmbeelden van het ongeval: op basis van de filmbeelden is vastgesteld dat de valtijd zodanig lang is dat de mortiergranaat de bodem van de schietbuis bereikt,
- Indrukking slaghoedje: analyse van het slaghoedje heeft aangetoond dat de slagpin het slaghoedje heeft geraakt,

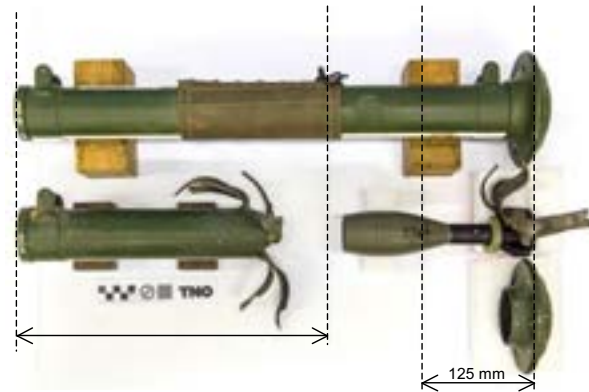
- Reconstructie gevonden delen: het schadebeeld aan de schietbuis, zoals deze zichtbaar wordt in de reconstructie van de gevonden delen toont dat de bron van de reactie zich bevindt ter hoogte van het commandovizier op de schietbuis,
- Reactie van de hoofdclading: vastgesteld is dat de hoofdclading (en niet de grondkardoes) van de mortiergranaat de bron van de reactie is.

Er is een reconstructie gemaakt van de mogelijke positie van de mortiergranaat ten tijde van het ongeval, zie Figuur 8a en 8b. In Figuur 8a zijn de restanten van de bovenzijde van schietbuis No. 513 en de voetplaat uitgelijnd ten opzichte van de referentie schietbuis No. 500. In Figuur 8b zijn zowel de restanten van de bovenzijde als van de onderzijde van de schietbuis uitgelijnd. Een 60 mm mortiergranaat zonder schokbuis is in beide Figuren geplaatst met de grondkardoes uitgelijnd tegen de positie van de bodem van de schietbuis.

De in 8a en 8b aangebrachte stippellijnen markeren de posities tot waar de metalen repen reiken in niet-omgebogen toestand. Binnen deze twee stippellijnen heeft de reactie plaatsgevonden. Doordat de mortiergranaat in deze reconstructie is geplaatst, is te zien dat de hoofdclading van de granaat (olijfgroen) voor het grootste deel binnen deze stippellijnen valt. In Figuur 8a en 8b bevindt het granaatlichaam zich op de bodem van de schietbuis en rechts van de stippellijnen. Het is niet met zekerheid vast te stellen of de hoofdclading tot reactie is gekomen op de aangegeven positie. Het is namelijk tevens mogelijk dat de mortiergranaat al aan het versnellen was (naar de bovenzijde van de schietbuis toe) op het moment van de reactie van de hoofdclading; de boven- en onderzijde van de hoofdclading kunnen dus ook samenvallen met de stippellijnen in Figuur 8a en 8b. Met andere woorden: de stippellijnen geven dus een indicatie van de waarschijnlijke positie van de hoofdclading van de mortiergranaat op het moment van de reactie.



Figuur 8a Positie van de mortiergranaat met de grondkardoes tegen de voetplaat en ten opzichte van de bovenzijde van de restanten van schietbuis No. 513. De intacte schietbuis No. 500 is naast de reconstructie geplaatst ter vergelijking. Gegeven maten zijn ten opzichte van bovenzijde en onderzijde schietbuis.



Figuur 8b Positie van de mortiergranaat uitgelijnd tegen de restanten van de bovenzijde en de onderzijde van schietbuis No. 513. De intacte schietbuis No. 500 is naast de reconstructie geplaatst ter vergelijking. Gegeven maten zijn ten opzichte van bovenzijde en onderzijde schietbuis.

2.10 Explosie van één of twee granaten

Aanvullende onderzoeksvraag AV1.2

Is aan de hand van de fragmenten van de schietbuis na te gaan of er één of twee granaten in de buis zijn geëxplodeerd?

Antwoord

Er is vastgesteld dat er sprake is geweest van één mortiergranaat in de schietbuis ten tijde van het ongeval. Er is gebruik gemaakt van verschillende invalshoeken (restanten schietbuis, restanten afkomstig van een of twee granaten, filmbeelden en valtijd versus tijd tot reactie) om het inzicht op dit punt te verkrijgen.

2.10.1 Restanten schietbuis

Op basis van het schadebeeld aan de schietbuis is in paragraaf 2.9 geconcludeerd dat de reactie in het onderste deel van de schietbuis heeft plaatsgevonden.

In het geval van een double loading zou dit betekenen dat alleen de onderste mortiergranaat gereageerd heeft en dat de bovenliggende mortiergranaat uit de schietbuis is geworpen of verschoten. Dit laatste is op geen van de beschikbare frames uit de opname van het ongeval te zien. Dit in tegenstelling tot de schoten voorafgaand aan het ongeval waarop het verlaten van de mortiergranaat uit de schietbuis wel zichtbaar is². Dit is een extra indicatie dat er geen tweede mortiergranaat in de schietbuis aanwezig was op het moment van het ongeval.

2.10.2 Fragmenten van 1 of 2 granaten

Er zijn geen identieke, uniek te identificeren fragmenten of delen gevonden van mortiergranaten die aantonen dat er sprake is van een reactie van twee granaten in de schietbuis ten tijde van het ongeval.

² De verschillende GoPro films uit verschillende camera's hebben een frame rate tussen de 25 en 29,97 beelden per seconde. Met deze frame rate is de GoPro in staat de mortiergranaat vast te leggen als deze de schietbuis verlaat.

2.10.3 *Filmbeelden*

Op basis van de beschikbare filmbeelden kan niet direct worden uitgesloten dan wel geconcludeerd dat double loading heeft plaatsgevonden, omdat het schot voorafgaand aan het ongeval niet getoond wordt (ref. GoPro film: GOPR0253.MP4).

Op basis van alle beschikbare GoPro film- en camerabeelden wordt de indruk verkregen dat de juiste procedures voor het laden en afvuren van de mortiergranaten worden gevolgd door de twee militairen die de granaten afvuren onder toezicht van een derde militair en vierde militair (filmer). Op de meeste GoPro beelden is te zien dat voorafgaand aan het fatale schot de beschermkap van de mortiergranaat wordt verwijderd, de mortiergranaat wordt losgelaten in de schietbuis en dat deze vervolgens de schietbuis verlaat.

Het tempo van vuren is laag (ver onder de toegestane afvuurfrequentie van 20 per minuut [ref. 2]) hetgeen het optreden van een double loading onwaarschijnlijk maakt.

Hierbij wordt opgemerkt dat het risico op double loading bij een schietbuis met vaste slagpin, zoals bij het ongeval, kleiner is dan bij zogenaamde trigger-fired mortiergranaten. Bij een trigger-fired mortier wordt de mortiergranaat namelijk door een schutter afgevuurd op enig moment na het laden, terwijl bij een schietbuis met slagpin de mortiergranaat automatisch wordt afgevuurd nadat de grondkardoes de slagpin in de voetplaat heeft geraakt (zonder tussenkomst van een schutter).

Omdat er bij een schietbuis met vaste slagpin geen interactie nodig is tussen een schutter en een lader is het risico kleiner dat de lader een tweede mortiergranaat laadt zonder dat de eerste is afgeschoten.

Op één van de foto's na het ongeval is te zien dat van de resterende vijf mortiergranaten in het kistje alle transportveiligheden zijn verwijderd. Mogelijk zijn deze beschermkapjes tegelijk verwijderd tussen de filmbeelden die zijn gemaakt vanaf de rechterzijde van het afvuren voorafgaand aan het ongeval en de filmbeelden die zijn gemaakt tijdens het ongeval, zonder daarbij tussentijds granaten af te vuren. Er wordt hierbij opgemerkt dat in het vuursteunbulletin 07V2013 [ref. 2] deze handelwijze niet expliciet verbiedt. Eén van de veiligheidsbepalingen in het vuursteunbulletin luidt namelijk: "De veiligheidspin van de buis mag pas vlak voor het laden van de mortiergranaat worden verwijderd." Het "...pas vlak voor..." wordt niet in detail gespecificeerd. Daarnaast lijkt het ook niet ongebruikelijk om een aantal mortiergranaten voor te bereiden gegeven de volgende tekst in de Amerikaanse mortar field manual FM 23-90 [ref. 3]: "Before firing, the gunner must remove the safety wire of the M888 (standard point-detonating fuze). Safety wires should be reinserted into all cartridges that have been prepared for firing but not used. Powder increments that have been removed should be replaced. Cartridges should be returned to their original packing and marked accordingly (these cartridges should be used first in subsequent firings)".

2.10.4 *Valtijd*

Op basis van de frame rate van de GoPro kan het moment worden teruggerekend van het moment van loslaten van de granaat tot het moment van de reactie. De af te leggen afstand tot de bodem van de schietbuis is langer dan de afstand tot de punt van de ontsteker van de mortiergranaat in de schietbuis in het geval van een double loading.

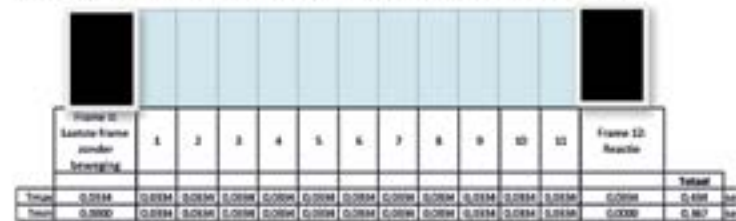
De film waarop het ongeval te zien is (ref. GoPro film: GOPR0253.MP4), is frame voor frame geanalyseerd. De frame met de eerste vallende beweging van de mortiergranaat in de schietbuis wordt aangeduid als frame 0. Op frame 12 is er instantaan een reactie zichtbaar. De frame rate die is afgelezen vanuit de Codec² van het MP4 bestand van de GoPro is 29,97 beelden per seconde.

Dit betekent dat iedere frame een tijdsperiode beslaat van 0,0334 seconden.

Gezien de snelheid van de processen die optreden, wordt het volgende opgemerkt:

- Het moment van de eerste vallende beweging van de mortiergranaat bevindt zich ergens tussen de start en het einde van frame 0 (een periode van 0,0334 seconden).
- Het optreden van het precieze moment van de reactie bevindt zich ergens tussen de start en het einde van frame 12.

Dit houdt in dat er rekening moet worden gehouden met een kleine spreiding in de tijd tot reactie op basis van de filmbeelden. De tijd tot reactie bevindt zich tussen minimaal $11 \times 0,0334 = 0,367$ seconden en maximaal $13 \times 0,0334 = 0,434$ seconden. Dit is schematisch weergegeven in onderstaande Figuur 9.

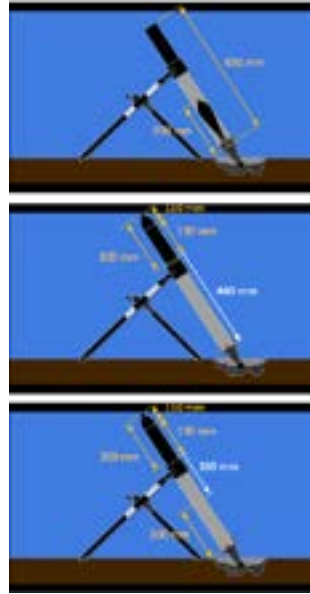


Figuur 9 Berekening van de tijd tot reactie aan de hand van GoPro frames.

De lengte van de schietbuis is 650 mm. Vanuit de filmbeelden wordt afgeleid dat de lader de mortiergranaat vast houdt met ongeveer 190 mm van de granaat al in de schietbuis. De af te leggen weg van de grondkardoes (bodem van de mortiergranaat) tot aan de slagpin is dan 460 mm, zie Figuur 10.

In het geval er al een mortiergranaat in de schietbuis aanwezig zou zijn, is de af te leggen weg slechts 160 mm, want de lengte van een granaat is 300 mm. De af te leggen afstand is bij double loading ongeveer 1/3 van wat gebruikelijk is.

² Software voor het coderen/decoderen of comprimeren/decomprimeren van data.



Figuur 10 Dimensies schietbuis en mortiergranaat (bovenste afbeelding) en afgelegde weg (in wit) van de mortiergranaat in de schietbuis in het geval van single loading (middelste afbeelding) en double loading (onderste afbeelding).

De valtijd wordt berekend uit de af te leggen weg van de mortiergranaat. De mortiergranaat valt namelijk onder invloed van de zwaartekracht ($F_z = m \cdot g$) in de schietbuis en ondervindt tijdens het naar beneden glijden een wrijvingskracht, F_w , door interactie met de binnenzijde van de schietbuis. De schietbuis stond ten tijde van het ongeval onder een hoek van 70 graden ten opzichte van de horizon, zie Figuur 11. De zwaartekracht, F_z , is op basis van deze hoek op te splitsen in een kracht loodrecht op de as van de schietbuis (F_l) en een kracht parallel aan de as van de schietbuis (F_p) volgens:

$$| \quad F_l = \cos \alpha \cdot F_z \quad (1)$$

$$| \quad F_p = \sin \alpha \cdot F_z \quad (2)$$

met:

F_z Zwaartekracht van de mortiergranaat [N]
 α Hoek schietbuis t.o.v. horizon, elevatie [graden]

De kracht F_l bepaalt de wrijvingskracht die de granaat ondervindt middels:

$$| \quad F_w = \mu F_l \quad (3)$$

met

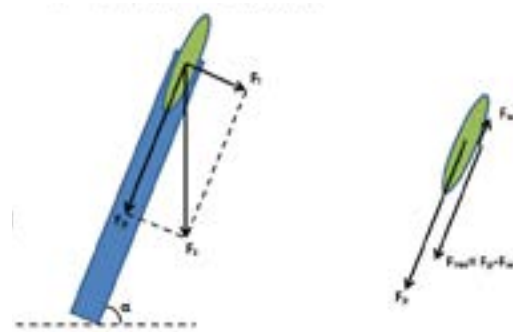
F_w	Wrijvingskracht [N]
F_l	Kracht loodrecht op de wand [N]
μ	Dynamische wrijvingscoëfficiënt [-]. Deze is 0,57 [ref. 4].

De resulterende kracht F_{res} waaronder de mortiergranaat in de schietbuis beweegt is F_p minus de wrijvingskracht F_w , en is af te leiden uit de vergelijkingen (1), (2) en (3):

$$F_{res} = mg(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) \quad (4)$$

met

m	Massa mortiergranaat van 1,6 kg
g	Standaard valversnelling van 9,81 m/s ²



Figuur 11 Krachten evenwicht op de mortiergranaat.

De resulterende kracht F_{res} is de drijvende kracht waaronder de mortier naar de bodem van de schietbuis beweegt. Deze F_{res} in combinatie met de massa m van de mortiergranaat levert de gemiddelde versnelling a die de mortiergranaat ondergaat, volgens de eerste wet van Newton: $F_{res} = m \cdot a$, ofwel:

$$a = \frac{F_{res}}{m} = \frac{mg(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)}{m} = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) \quad (5)$$

Een object dat gedurende een tijdsperiode t een versnelling a ondervindt, legt uit stilstand een afstand x af, die volgt uit:

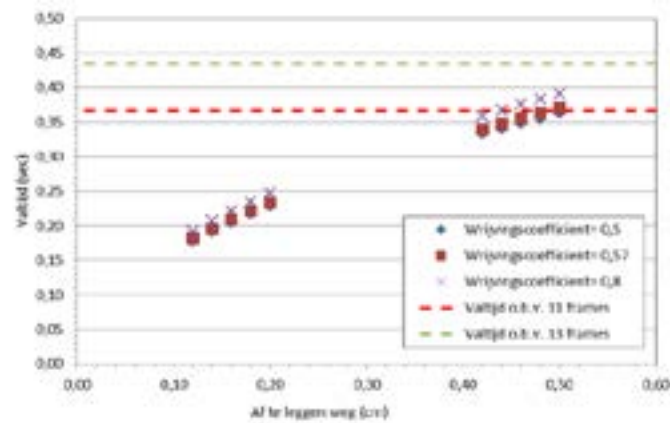
$$x = \frac{1}{2}at^2 \quad (6)$$

Toegepast op de granaat in de mortierbuis betekent dit dat de tijd die nodig is om de 460 mm (afstand x) tot de bodem van de schietbuis te bereiken onder invloed van versnelling a , te berekenen is uit de combinatie van vergelijking (5) en (6):

$$t = \sqrt{\frac{2x}{g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,46}{9,81(\sin 70 - 0,57 \cos 70)}} = 0,355 \text{ seconden} \quad (7)$$

Op basis van deze relatief eenvoudige analyse kan worden geconcludeerd dat de vastgestelde tijd tot reactie uit de filmbeelden tussen de 0,367 en 0,434 seconden zeer nauw overeenkomt met de valtijd die nodig is voor een mortier van 1,6 kg om een afstand van 460 mm af te leggen.

In de berekening is uitgegaan van een dynamische wrijvingscoëfficiënt van 0,57 en de aanname dat de mortiergranaat zich voor 190 mm in de schietbuis bevond op het moment van loslaten. Om er zeker van te zijn dat variatie in deze aannames niet leidt tot een overlap met de valtijd voor double loading, is een gevoeligheidsanalyse toegepast op de berekening. Zie Figuur 12; omdat in de literatuur melding wordt gemaakt van een (statische) wrijvingscoëfficiënt voor staal op staal tussen de 0,5 en 0,8 is de berekening voor deze waarden herhaald met tevens een variatie van 5 cm op de af te leggen weg. Zoals Figuur 12 laat zien, ligt de corresponderende valtijd voor double loading tussen de 0,18 en 0,25 s, en voor single loading tussen de 0,33 en 0,39 s. Alleen de laatste komt overeen met de valtijd zoals afgeleid uit de filmbeelden.



Figuur 12 Gevoeligheidsanalyse van de valtijd versus af te leggen weg voor single loading (rond de 46 cm) en double loading (rond de 16 cm).

De voorgaande analyse toont aan dat er geen sprake kan zijn van een double loading en dat de op de filmbeelden getoonde geladen mortiergranaat de oorzaak is van de waargenomen effecten.

2.10.5 Samenvattend

Geconcludeerd kan worden dat er geen sprake is geweest van een double loading, door:

- De algemene indruk van het ordelijk laden van de mortiergranaten en het rustige afvuurinterval;
- De berekende valtijd van de mortiergranaat in de schietbuis die overeenkomt met het laden van één mortiergranaat;
- Het schadebeeld van de schietbuis;
- De gevonden fragmenten/onderdelen die afkomstig zijn van één granaat.

2.11 Schade door hoofdlading of grondkardoes, plus type reactie

Aanvullende onderzoeksvraag AV1.3

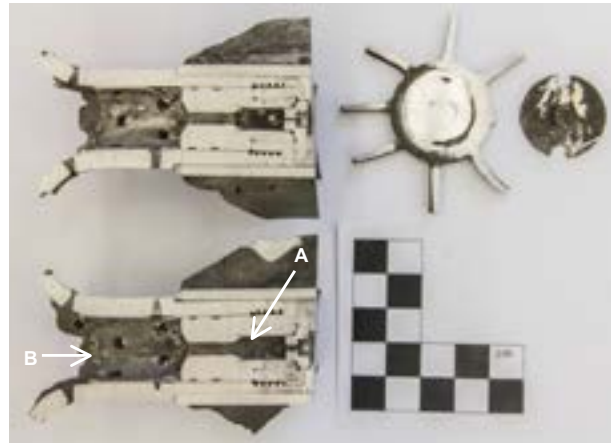
Er is een fragment aangetroffen van het onderste deel van de schietbuis. Op een vrij laag niveau is de buis opengereten en naar buiten omgebogen. Hoe is dit te verklaren – vanuit de hoofdlading of vanuit de grond-/aandrijvingskardoes?

Antwoord

De schade aan de schietbuis is veroorzaakt door een reactie van de hoofdlading. Dit inzicht is verkregen door uit verschillende invalshoeken de feiten te analyseren zoals beschreven in onderstaande paragrafen.

2.11.1 *Grondkardoes*

Bij een normale ontsteking van een mortiergranaat valt de granaat met het slaghoedje op de slagpin op de bodem van de schietbuis. Het slaghoedje initieert de grondkardoes. Deze bestaat uit 0.3 gram zwart buskruit. De ontbranding van dit kruit zorgt voor vlamwerking in de vlampijp. Daarnaast levert dit gasdruk die door de gaten in het staartstuk de holte onder de granaat vult. De vlammen die uit deze gaten komen, ontsteken de aanvullingskardoes die om het staartstuk geklemd zit⁴. De aanvullingskardoes bestaat uit 8 gram rookzwak buskruit. De ontbranding van deze aanvullingskardoes levert, tezamen met de al opbouwende gasdruk, de uiteindelijke voortdrijvende kracht voor de granaat om het doel te bereiken.



Figuur 13 Doorsnede foto van het staartstuk.

Er is een doorsnede gemaakt van het restant van het staartstuk, zie Figuur 13. Er is geen intact kruit aangetroffen aan de binnenzijde van het staartstuk. Wel zijn er verbrandingsproducten in de kamer van de grondkardoes achtergebleven (zie 'A' in Figuur 13). Het is niet vast te stellen in hoeverre het kruit is opgebrand volgens de normale initiatieroute via het slaghoedje, of dat het kruit is opgebrand door de hitte die vrijkomt bij een reactie van de hoofdlading.

⁴ De lader van de mortier wordt geacht deze aanvullingskardoes zo veel mogelijk naar onderen te schuiven vlak voor het laden.

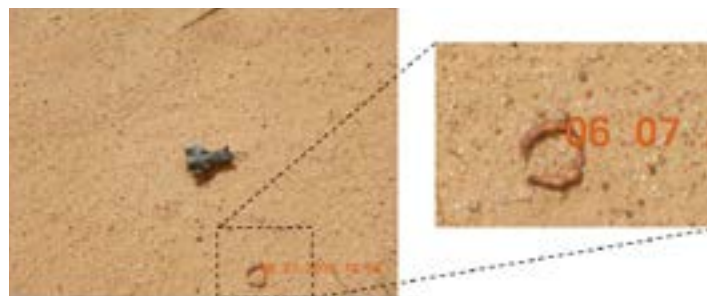
De bovenzijde van de inwendige 'huls' (zie 'B') vertoont wel plastische vervorming die wijst op een belasting vanaf de bovenzijde van het staartstuk. Deze vervorming is waarschijnlijk veroorzaakt door de schokgolf bij detonatie van de hoofdvlading.

De gasdruk die onder de hoofdvlading ontstaat, is bedoeld om de mortiergranaat uit de schietbuis te versnellen conform het functionele ontwerp van de schietbuis. Deze gasdruk ligt onder de barstdruk van de schietbuis en levert dus onvoldoende druk om de schade aan de schietbuis te veroorzaken zoals deze is aangetroffen na het ongeval.

Op één van de foto's genomen na het ongeval (ref. DSCN2971.JPG) is een object te zien dat de vorm heeft van een aanvullingskardoes. Figuur 14 laat een intacte aanvullingskardoes zien en Figuur 15 toont het object in de directe nabijheid van het restant van het staartstuk van de mortiergranaat, zoals aangetroffen na het ongeval. Het is mogelijk dat dit object het restant is van een aanvullingskardoes. Bij een normaal ontstekingsproces is het niet waarschijnlijk dat er restanten worden gevonden van de aanvullingskardoes omdat deze volledig opbrandt. Wanneer dit object daadwerkelijk een restant is van een aanvullingskardoes impliceert dit dat het verbrandingsproces tijdens het ongeval onvolledig is geweest; dat wil zeggen dat het ontbrandingsproces is verstoord of onderbroken door de reactie van de hoofdvlading.



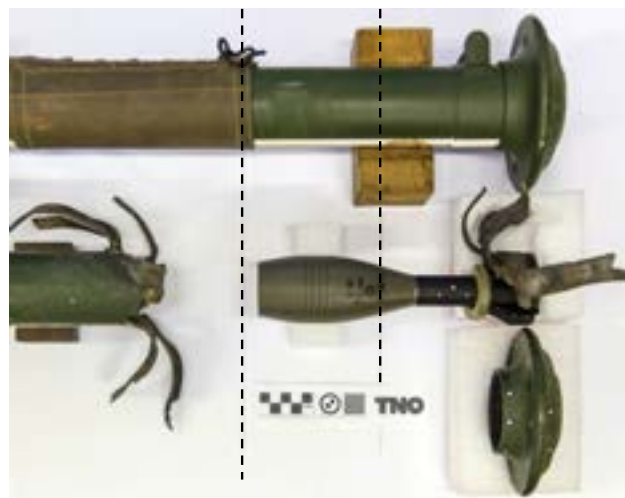
Figuur 14 Intacte aanvullingskardoes.



Figuur 15 Object nabij restant staartstuk, zoals aangetroffen na het ongeval.

2.11.2 *Locatie en mate van schade aan de schietbuis*

Vanuit de reconstructie volgt dat de bron van de reactie zich bevond ter hoogte van het ontbrekende deel van de schietbuis. Op deze plaats is de schietbuis en het commandovizier het sterkst verscherfd. Aan de bovenzijde en de onderzijde ten opzichte van deze locatie wordt een vergelijkbaar schadebeeld aangetroffen. Deze schade bestaat niet uit volledige verscherving van de schietbuis, maar uit scheuren in langsrichting, zie Figuur 16. Ter plaatse van de sterke verscherving van de schietbuis is de hoofdclading van de mortiergranaat gepositioneerd. Deze combinatie van schade in de schietbuis en de positie van de hoofdclading wijst op een reactie in de hoofdclading.



Figuur 16 Schadebeeld schietbuis.

2.11.3 *Details schade aan de schietbuis*

Er zijn twee details in de restanten van de schietbuis gevonden die ondersteunen dat de hoofdclading een heftige reactie heeft vertoond.

1. Fragmentatie schade aan onderzijde schietbuis

De teruggevonden onderzijde van de schietbuis bestaat uit een deel, inclusief de schroefdraad, waarmee de schietbuis in de voetplaat is bevestigd. Een drietal langwerpige metalen repen zitten nog aan deze schroefdraad vast, zie Figuur 17. Aan het uiteinde van de langwerpige delen is een schadebeeld te herkennen, typerend voor schade als gevolg van fragmentinslag. Het schadebeeld op deze metalen delen is weergegeven in Figuur 18 voor drie van de langwerpige delen. Dit schadebeeld op de uiteinden van de langwerpige delen is veroorzaakt doordat de mantel van de mortiergranaat in de schietbuis is gefragmenteerd. De inslag van de mortiergranaat fragmenten met hoge snelheid op de binnenzijde van de schietbuis zorgt voor het schadebeeld zoals weergegeven in Figuur 18. Het optreden van deze inslagsschade draagt bij aan de verdere fragmentatie van de schietbuis doordat op de inslaglocatie initiatie van de scheur optreedt.

Dit is dan ook de reden dat enkel aan het uiteinde van de lange repen metaal dit schadebeeld wordt gevonden.



Figuur 17 Teruggevonden onderste deel schietbuis.

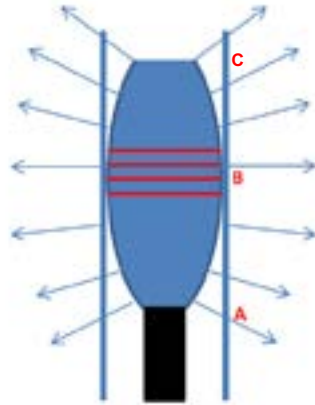


Figuur 18 Schadebeeld aan langwerpige delen onderste deel schietbuis.

Ter illustratie is in Figuur 19 schematisch weergegeven hoe de fragmenten vanuit de hoofdloading in verschillende richtingen worden versneld om vervolgens in te slaan op de binnenzijde van de schietbuis, zie positie A in Figuur 19. Op deze positie is er enige vrije weglengte voor de mantel van de hoofdloading om onder invloed van de reactie van de explosieve lading te expanderen, te fragmenteren, te versnellen en met hoge snelheid in te slaan op de schietbuis.

Opgemerkt moet worden dat het typerende schadebeeld uit Figuur 18 niet wordt gevonden op de repen metaal die nog zijn verbonden aan de restanten van de *bovenzijde* van de schietbuis (positie C in Figuur 19). Dit verschil wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat aan de bovenzijde van de mortiergranaat meer explosieve lading aanwezig is; op positie C is de schietbuis in kleinere delen gefragmenteerd waardoor de delen met dit typerende schadebeeld niet meer aan de restanten van de bovenzijde van de schietbuis verbonden zijn.

Op positie A in Figuur 19 is minder explosieve lading aanwezig waardoor de uiteinden van de metalen repen met dit schadebeeld verbonden zijn gebleven aan de restanten van de onderzijde van de schietbuis.



Figuur 19 Expansie van hoofdclading en fragmentrichtingen.

In 2016 heeft TNO een serie testen uitgevoerd om te onderzoeken hoe een gecontroleerde deflagratie kan worden gerealiseerd in een afgesloten stalen buis gevuld met een Plastic Bonded Explosive (PBX) [ref. 5]. Deze testen hebben aangetoond dat een opgesloten explosief tot een volledige detonatie, een partiële detonatie of een deflagratie kan worden gebracht. Figuur 20 is gereproduceerd uit ref. 5; het laat het schadebeeld zien aan de buis na een detonatie en deflagratie. Het explosief is aan de rechterzijde van de buis aangestoken met een pyrotechnische lading, waarna de linkerzijde met een schok door middel van een detonator is geïnitieerd. Aan de rechterzijde is het explosief hierdoor gedeflagreerd, en aan de linkerzijde gedetoneerd. Figuur 20 laat zien dat alleen de linkerzijde van de buis is gefragmenteerd als gevolg van een detonatie.

De schietbuis is bij het ongeval ter plaatse van de hoofdclading van de mortiergranaat gefragmenteerd. Met de informatie uit [ref. 5] wordt de conclusie ondersteund dat de hoofdclading is gedetoneerd in plaats van gedeflagreerd.



Figuur 20 Schadebeeld aan een afgesloten buis na een detonatie (links) en deflagratie (rechts).

Referentieproeven, uitgevoerd door het Kenniscentrum Wapensystemen en Munitie van Defensie, onderschrijven dat alleen een detonerende granaat een dergelijk schadepatroon kan veroorzaken [ref. 10]. Figuur 21 laat links het restant van een schietbuis zien die is verscherfd door een detonatie van een 60 mm mortiergranaat. Omdat de granaat (op afstand) in gewapende stand in de buis is losgelaten is deze gedetoneerd onderin de schietbuis op het moment dat de grondkardoes de slagpin heeft geraakt. Rechts in Figuur 21 is een schietbuis te zien waarin een mortiergranaat is gedeflagreerd. De deflagratie is mogelijk gemaakt door de mantel van de granaat aan te boren met een diameter van 5 mm. Bij het afvuren (in ongewapende stand) bereikt de vlam- en gasdrukwerking van de ontbrandende kruitlading via dit gat de hoofdvlading van de granaat waardoor de hoofdvlading in de schietbuis ontbrandt. Door de inwendige druk zwelt de schietbuis op en wordt het commandovizier weggeslagen, maar de schietbuis verscherft niet.



Figuur 21 Schietbuis na een inwendige detonatie (links) en deflagratie (rechts) van een 60 mm mortiergranaat [ref. 10].

2. Afdruk hoofdvlading op schietbuis

Tussen de gevonden restanten is ook een fragment gevonden met een aantal evenwijdige lijnen in het metaal. Dit fragment is na het ongeval verwijderd uit het lichaam van één van de slachtoffers. Het gaat om een fragment met een afmeting van ongeveer 3 x 5 cm en een dikte die overeenkomt met de dikte van de wand van de schietbuis. Op basis van de dikte, kleur en het oppervlaktebewerkingspatroon⁵ is geconcludeerd dat dit fragment afkomstig is uit het deel van de schietbuis dat sterk gefragmenteerd is. De lijnen van de afdruk (met nauwelijks voelbaar reliëf) op het fragment hebben een onderlinge afstand van rond de 6,3 mm. Deze afstand komt overeen met de onderlinge afstand tussen de groeven die zich aan de buitenzijde van de hoofdvlading op de mantel bevinden⁶, zie ook Figuur 22.

Op het moment dat de hoofdvlading tot een reactie komt, slaat de buitenzijde van de granaat tegen de binnenzijde van de schietbuis en laat een afdruk achter met vier groeven. In Figuur 19 is deze positie gemarkeerd als 'B'. Op positie B is de ruimte tussen de hoofdvlading en de binnenzijde van de schietbuis zeer klein (in tegenstelling tot op positie A). Op het moment van inslag is de mantel van de hoofdvlading nog niet gefragmenteerd, maar expandeert deze elastisch-plastisch onder invloed van de reactie van de energetische stof. Het schadepatroon van fragmentinslag op de binnenzijde van de schietbuis als in Figuur 18 ontbreekt om deze reden op dit fragment.

⁵ Dit patroon blijft op het metaal achter na het fabricageproces. Het is alleen zichtbaar onder een vergrootglas (en niet op de foto in Figuur 22).

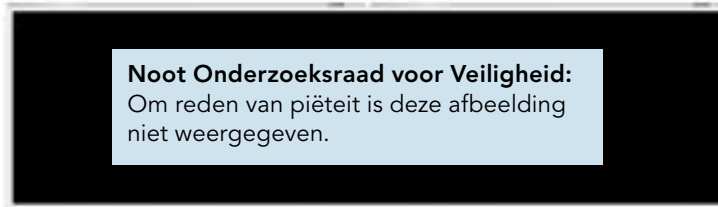
⁶ Dit zijn zogenaamde centreerringen welke zorgen voor geleiding van de mortier in de schietbuis en een gasafdichting naar voren [ref. 6].



Figuur 22 Afdruk op fragment van de schietbuis, afkomstig van de groeven op de mantel van de hoofdvlading op het moment van de reactie van de hoofdvlading.

2.11.4 Filmbeelden ongeval

De afzonderlijke frames van de GoPro film (ref. GoPro film: GOPR0253.MP4) direct voorafgaand aan het ongeval zijn bekeken. Opvallend is de snelheid en mate van de reactie. In Figuur 23 zijn de eerste frame met de reactie en de direct voorafgaande frame naast elkaar afgebeeld. Er is slechts 0,0334 seconden tussen beide frames. Expansie van gassen en projectie van fragmenten in dit korte tijdsbestek is in de orde van 2 m. De expansiesnelheid van reactieproducten, c.q. fragmentsnelheid is hierdoor minimaal 60 m/s. Deze snelheden kunnen zelfs hoger zijn, maar de frame rate van de GoPro is te laag om deze conclusie te kunnen trekken.



Figuur 23 Frames net voor en op het moment van de reactie.

De filmbeelden zijn tevens vergeleken met een schatting van het volume van de reactieproducten. De hoofdvlading van de mortiergranaat bestaat uit 200 g TNT, de boosterlading in de buis bevat 16,6 g TNT. De grondkardoes bevat 0,3 g zwart buskruit en een aanvullingskardoes 8 g rookzwak buskruit. Voor het berekenen van het volume van de reactieproducten wordt uitgegaan van 216,6 g TNT en 8,3 g nitrocellulose. Het specifieke volume van de reactieproducten bij atmosferische condities is 825 L/kg voor TNT en 871 L/kg voor nitrocellulose [ref. 7]. Uit het totale volume van reactieproducten V_{gas} kan een equivalente straal r_{eq} worden afgeleid:

$$r_{\text{eq}} = \sqrt[3]{\frac{3V_{\text{gas}}}{4\pi}} \quad (9)$$

In Tabel 2 zijn het volume van de reactieproducten en equivalente straal in een drietal scenario's weergegeven. Vergelijking van de equivalente straal in deze tabel met de wolk van reactieproducten in Figuur 23 (rechts), wijst op minimaal een reactie van de hoofd- en boosterlading. De reactie van slechts de kruitlading lijkt onwaarschijnlijk, omdat de wolk van reactieproducten een doorsnede heeft groter dan de lengte van de mortier.

Tabel 2 Volume reactieproducten en equivalente straal in een drietal scenario's.

Scenario	Massa energetisch materiaal	V_{gas} [L]	r_{eq} [m]
100% kruitlading	8.3 g NC	7.2	0.12
100% hoofd- en boosterlading	216.6 g TNT	179	0.35
volledig schot	216.6 g TNT en 8.3 g NC	186	0.35

Er zijn rond de plek van het ongeval geen resten onverbrande of deels verbrande explosieve stof (TNT) aangetroffen, zoals zou worden verwacht bij een partiële detonatie, explosie, deflagratie of brand. Dit duidt op detonatie van de hoofdclading volgens de definitie in appendix B.

2.11.5 *Samenvattend*

Op basis van voorgaande analyse wordt geconcludeerd dat de hoofdclading tot detonatie is gekomen. De belangrijkste argumenten hier voor zijn:

- De snelheid van de reactie;
- De mate van schade en fragmentatie aan de schietbuis en het commandovizier;
- Het fragmentatie patroon en restanten van de onderzijde van de schietbuis;
- De afdruk van groeven van hoofdclading op het restant van de schietbuis;
- De wolk van reactieproducten die overeenkomt met een reactie van de hoofd- en boosterlading;
- Het ontbreken van restanten explosieve stof rondom de plek van het ongeval.

2.12 **Binnenzijde schietbuis**

Aanvullende onderzoeksvraag AV1.4

Zijn aan de binnenzijde van de schietbuis(fragmenten) onregelmatigheden zichtbaar die kunnen verklaren waarom de granaat niet op normale wijze de schietbuis heeft verlaten?

Antwoord

Een visuele inspectie is uitgevoerd op de restanten van schietbuis No.513 en op de referentieschietbuis No. 500. Beide schietbuizen vertonen op grote schaal oxidatie. Het is niet vast te stellen wanneer deze oxidatie is opgetreden. Het is mogelijk dat dit is opgetreden tussen het tijdstip van het ongeval en het in dit rapport beschreven onderzoek.

Ter hoogte van de verdikking in de intacte schietbuis wordt een ring waargenomen met een bijna zwarte kleur. Aangenomen wordt dat deze ring zich bevindt op die plaats waar bij normaal functioneren van de mortiergranaat de verbrandingsgassen van de grondkardoes en aanvullingslading de grootste warmteoverdracht op de schietbuis uitoefenen.

Deze ring wordt niet gevonden in de restanten van de schietbuis van het ongeval, omdat dat deel van de schietbuis is verscherfd en niet is teruggevonden.

Het oppervlak van de binnenzijde van beide schietbuizen voelt ruw aan. In de schietbuis van het ongeval worden enkele zeer kleine onregelmatigheden aangetroffen, zie Figuur 24. Deze zijn verspreid in omtreksrichting en hebben een willekeurige vorm. Aangenomen wordt dat deze onregelmatigheden het gevolg zijn van het ongeval, mogelijk door inslag van kleine fragmenten tijdens de reactie van de hoofdclading.

Met behulp van een binnendiameter micrometer is de diameter van de schietbuis gemeten op verschillende posities; deze varieert tussen de 60,56 en 60,60 mm.

Er zijn geen onregelmatigheden aangetroffen die er op wijzen dat de mortiergranaat de schietbuis niet op normale wijze heeft kunnen verlaten.



Figuur 24 Enkele kleine onregelmatigheden aan de binnenzijde van de restanten van schietbuis No. 513 na het ongeval.

2.13 Granaatresten van één of twee granaten

Aanvullende onderzoeksvraag AV2.1

Zijn de granaatresten afkomstig van één of twee granaten.

Antwoord

Er is geen enkele indicatie dat de granaatresten afkomstig zijn van twee granaten. Zie voor een toelichting, paragraaf 2.10.

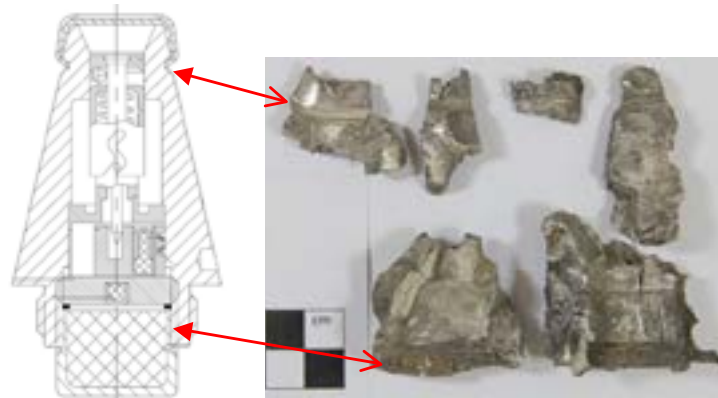
2.14 Componenten van schokbuis

Aanvullende onderzoeksvraag AV2.2

Is de schokbuis teruggevonden, of zijn delen van de schokbuis teruggevonden? Zo ja, kan aan de hand van die delen worden nagegaan of de granaat op het moment van de explosie op scherp stond? Zo nee, wat is daarvoor de verklaring?

Antwoord

In de scherfvesten van de slachtoffers zijn relatief grote aluminium fragmenten aangetroffen. De mantel van de schokbuis bestaat uit een kegelvormig aluminium deel. Een aantal van de fragmenten kan worden herkend als afkomstig van deze mantel, zie Figuur 25. In het bijzonder de schroefdraad (Figuur 25, onderste 2 delen) als ook de ingebrachte groef op een aantal van de overige delen (Figuur 25, bovenste 4 delen) zijn kenmerkend voor de schokbuis.



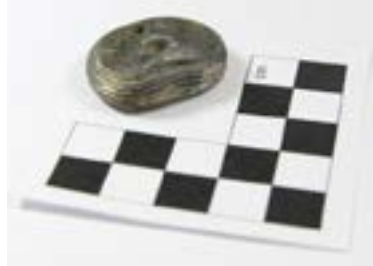
Figuur 25 Aluminium fragmenten afkomstig van de schokbuis.

Ook is er een tweetal componenten gevonden, zie Figuur 26 en Figuur 27, die mogelijk afkomstig zijn uit de schokbuis. De bevestiging dat het de afsluitplaat⁷ respectievelijk het afdekplaatje⁸ van de schokversterker betreft, kan worden verkregen door de directe vergelijking met een originele schokbuis. Een directe vergelijking is niet mogelijk aangezien TNO op het moment van schrijven van dit rapport geen toegang heeft tot een (inerte) schokbuis.

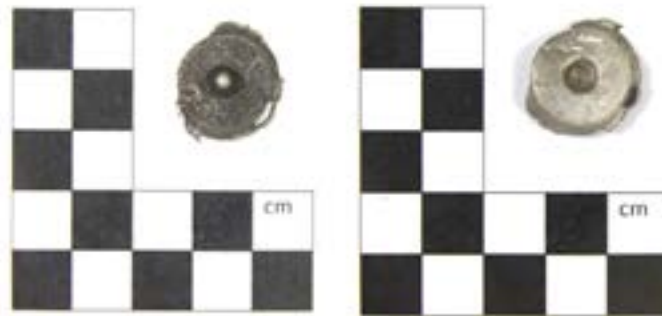
Aan de hand van de teruggevonden en positief geïdentificeerde delen van de schokbuis kan in dit stadium van het onderzoek niet worden vastgesteld of de schokbuis op scherp heeft gestaan op het moment van het ongeval.

⁷ Het is uitgesloten dat dit component (Figuur 24) bij vernietiging van de overgebleven mortiergranaten is vrijgekomen; het is namelijk uit een scherfvest van een van de slachtoffers gehaald. Bij bevestiging van het vermoeden dat dit de afsluitplaat uit de schokbuis is, is de hypothese dat de overdrachtslading in de afsluitplaat heeft gefunctioneerd daar het metaal boven de overdrachtslading is verdwenen (uitgeponst door de overdrachtslading).

⁸ Bij bevestiging van het vermoeden over het afdekplaatje (Figuur 25), is de hypothese dat de overdrachtslading de schokversterker heeft geïnitieerd. Het is namelijk onwaarschijnlijk dat het plaatje afkomstig is uit een van de, na het ongeval vernietigde mortiergranaten. In dat geval komt het detonatiefront (wat de vervorming veroorzaakt) vanaf de hoofdslading en niet vanaf de overdrachtslading.



Figuur 26 Vermoeden van afsluitplaat uit de schokbuis.



Figuur 27 Vermoeden van afdekplaatje schokversterker uit schokbuis, van twee zijden gefotografeerd.

2.15 Verklaring schadebeeld staartstuk

Aanvullende onderzoeksvraag AV2.3

Het bovenste deel van het staartstuk vertoont sterke, naar buiten gerichte ombuigingen, vergelijkbaar met de schil van een half gepelde banaan. Hoe is dit te verklaren? In dit deel van de granaat bevindt zich toch geen explosief? De ombuiging is ook niet te verklaren door de explosie van de grondkardoes, noch van de aanvullingskardoes, aangezien het lagere deel van het staartstuk nog intact is?

Antwoord

Het gevonden restant van het staartstuk van de mortiergranaat vertoont verschillende schades, zie Figuur 28.

Over vrijwel het hele buitenoppervlak is het metaal aangetast door het effect van de reactie die is opgetreden. De vrijkomende hitte en verbrandingsgassen hebben het oppervlak aangetast en een donkergrijze oxidelaag achtergelaten.



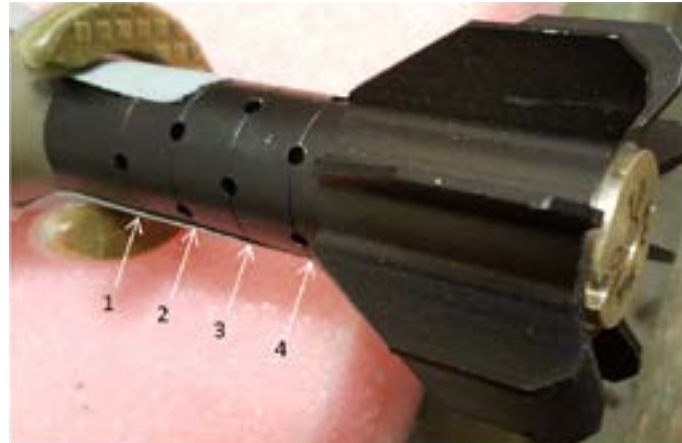
Figuur 28 Restant staartstuk mortiergranaat.

Daarnaast zijn er verschillende lokale deformaties van de vinnen en het centrale deel van het staartstuk aanwezig. Deze zijn veroorzaakt door impact met andere metalen delen (zoals de schietbuis waarin de granaat was geplaatst en de voetplaat), waarschijnlijk direct na het optreden van de reactie en het verspreiden van fragmenten van de schietbuis, het commandovizier en de granaat. Een markant schadebeeld wordt gevonden aan de bovenzijde van het staartstuk (de zijde van de hoofdvlading). Aan de bovenzijde ontbreekt een deel van het staartstuk. Ter indicatie: een intact staartstuk heeft in totaal vier ringen boven elkaar met perforaties, de vlamgaten, zie Figuur 29. Het deel van het staartstuk tussen de tweede ring met vlamgaten en de hoofdvlading ontbreekt met uitzondering van drie repen (uitgebogen) staal tussen de eerste en tweede ring met vlamgaten. Het staartstuk is deels op de eerste en deels op de tweede ring afgescheurd.

Aan de onderzijde van de hoofdvlading is bij productie een kort stuk schroefdraad gemaakt⁹. Het staartstuk is op dit stuk schroefdraad bevestigd. Bij een reactie van de hoofdvlading zal de schokgolf naar deze verbinding lopen. Verdunningsgolven (gereflecteerde schokgolven) zorgen voor het ontstaan van breuken en fragmentatie. Vlamgaten vormen een locale verzwakking in de staart en zijn daarom kwetsbaar voor scheurinitiatie en breuk. Door de verdunningsgolf is de staart op de vlamgaten bezweken.

De combinatie van schades aan het staartstuk valt te verklaren vanuit de reactie die de hoofdvlading heeft gehad. Deze reactie heeft gezorgd voor de schokgolf, hitte en verbrandingsgassen, voor verspreiding van fragmenten en heeft ook het afscheuren en de deformatie aan de bovenzijde van het staartstuk veroorzaakt.

⁹ Dit stukje schroefdraad is teruggevonden na het ongeval (Volgnr. 22 inventarisatielijst Appendix A).



Figuur 29 Intact staartstuk HE80 mortiergranaat.

TNO heeft in 2012 experimenten uitgevoerd [ref. 8] met de HE80 60 mm mortiergranaat zonder schokbuis. Bij deze experimenten is de hoofdvlading met behulp van kneedspringstof (op de locatie van de booster) en een slagpijpje tot detonatie gebracht. Deze experimenten zijn in bunkers uitgevoerd en na afloop zijn restanten dus eenvoudig terug te vinden. In alle gevallen is ook het staartstuk van de mortiergranaat teruggevonden. De teruggevonden staartstukken vertonen vergelijkbare schadebeelden (zie Figuur 30) als het staartstuk dat is teruggevonden na het ongeval (zie Figuur 28); ook bij de experimenten is falen zichtbaar op de eerste en tweede rij vlamgaten¹⁰.

Dit bevestigt dat het schadebeeld op het teruggevonden staartstuk is veroorzaakt door een detonatie van de hoofdvlading.



Figuur 30 Teruggevonden staartstuk HE80 mortiergranaat na TNO experiment in 2012.

¹⁰ Bij de TNO detonatie experimenten in 2012 werd variatie waargenomen in de locatie van falen; in sommige gevallen was het staartstuk slechts gedeeltelijk op de eerste ring of tweede of derde ring vlamgaten afgebroken.

3 Conclusies

Ten behoeve van het onderzoek naar de oorzaak van het dodelijk ongeval in Mali op 6 juli 2016 tijdens een mortiergranaatoefening heeft de OVV een eerste set technische onderzoeksvragen met betrekking tot de restanten van het wapensysteem en de mortiergranaat geformuleerd (OVV-document, d.d. 13 september 2016). Daarnaast heeft de OVV een set aanvullende technische vragen geformuleerd om de oorzaak van het voorval te achterhalen (OVV-document, d.d. 13 september 2016).

In dit rapport zijn beide sets onderzoeksvragen beantwoord. Op basis van de analyse van de filmbeelden en restanten worden de volgende hoofdconclusie en deelconclusies getrokken:

TNO concludeert, op basis van de beschikbare informatie en restanten, dat het ongeval is veroorzaakt door het prematuur functioneren van de bij het ongeval geladen 60 mm High Explosive (HE 80) mortiergranaat.

Deelconclusies:

- De bediening van de schietbuis en het laden van de mortiergranaat zijn ordelijk verlopen; er is geen tweede mortiergranaat geladen (double loading) voordat de voorgaande mortiergranaat is afgevuurd;
- De mortiergranaat die het ongeval heeft veroorzaakt heeft de bodem van de schietbuis bereikt; de slagpin in de voetplaat (bodem) van de schietbuis heeft het slaghoedje van de mortiergranaat geraakt;
- Er zijn geen onregelmatigheden geconstateerd aan de schietbuis;
- Er zijn geen afwijkingen geconstateerd aan de slagpin in de voetplaat (bodem) van de schietbuis;
- Het ontbrandingsproces van het kruit in de grondkardoes en de aanvullingskardoes is waarschijnlijk onvolledig geweest omdat deze is onderbroken door de reactie van de hoofdloading;
- Het schadebeeld aan de schietbuis komt overeen met de positie van de reactie van de hoofdloading, op of vlak na het moment dat de mortiergranaat de bodem van de schietbuis heeft bereikt;
- De hoofdloading van de mortiergranaat is gedetoneerd¹¹.

¹¹ Het achterhalen van de oorzaak van de initiatie van de hoofdloading valt buiten de scope van dit rapport.

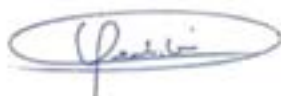
4 Referenties

1. Persoonlijke communicatie OVV-Defensie
2. Vuursteenbulletin 07V2013 MORTIER 60 mm HOTCHKISS BRANDT TYPE COMMANDO, nr. 2013024622, 13 december 2013
3. Field Manual 23-90, Mortars, Change 1, 9th December 2002, Headquarters Departments of the Army and the Air Force
4. Serway Physics for Scientists and Engineers 4th edition (p. 126.)
5. dr. B.J. van der Meer / Ir. F. Valente, Investigation into the controlled deflagration of a steel cased warhead for selectable output, TNO 2016 M11006, 2016
6. Voorschrift Geschuts- en Mortiermunitie 20 mm – 84 mm (B), VS9-847, Ministerie van Defensie, Defensie Materieel Organisatie, verzamelband en bijgewerkt tot en met 04-07-2016
7. R. Meyer, J. Köhler, A. Homburg, Explosives, 6th Edition, 2007.
8. P.A. Hooijmeijer; Sympathische reactie experimenten juli 2012. Testformulier SR120711b / JM3065; 11 Juli 2012
9. www.insensitivemunitions.org
10. KCW&M Projectrapport 60 mm Mortier HE- 80 CvO, Documentnr. 26240, December, 2016.

5 Ondertekening

Rijswijk, 14-12-2016

TNO Technical Sciences

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'P. Hendriksen', enclosed within a blue oval.

Ing. P. Hendriksen
Research manager

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'P.A. Hooijmeijer', written in a cursive style.

ir. P.A. Hooijmeijer
Projectmanager

A Inventarisatie gevonden restanten

Deze appendix bevat een overzicht van de door de OVV aangeleverde restanten van het ongeval.

Tabel A1 Overzicht inventarisatie van de gevonden restanten direct relevant voor beantwoording onderzoeksvragen.

Code Kmar	Korte beschrijving	Afkomstig van	Afkomstig van	Opmerkingen
AABV5257NL	Mortierbuis bovenste deel	Schietbuis	1e zoeking FRA	
AABV5257NL	Mortierbuis onderste deel	Schietbuis	1e zoeking FRA	
AABV5257NL	Voetplaat	Schietbuis	1e zoeking FRA	
AABV5257NL	Mondingsdop	Schietbuis	1e zoeking FRA	
AABV5257NL	"veiligheids"pin om veiligheidskap granaat te verwijderen	Mortiergranaat	1e zoeking FRA	
AABV5257NL	Metalen ring	Onbekend	1e zoeking FRA	Buitendiameter 50 mm
AABV5257NL	Staatstuk mortier	Mortiergranaat	1e zoeking FRA	
Ontbreekt	Canvas handbeschermer mortierbuis	Schietbuis	1e zoeking FRA	
AABV5256NL	Draagriem stel	Schietbuis	1e zoeking FRA	Meerdere delen
AABV5498NL	Verscherving schietbuis	Schietbuis	1e zoeking FRA	Middendeel schietbuis, aan bovenzijde
AABV5498NL	Verscherving schietbuis met externe schroefdraad	Schietbuis	1e zoeking FRA	Onderzijde schietbuis
AABV5498NL	Bevestigingsring draagriem aan onderzijde in 3 stukken	Schietbuis	1e zoeking FRA	
AABV5498NL	Langwerpig metalen deel met schroefdraad	Onbekend	1e zoeking FRA	
AABV5498NL	Diverse delen commandovizier	Schietbuis	1e zoeking FRA	Stelwiel, waterpas plus bevestigingsring, klem pin
AABV5269NL	Diverse delen inclusief 3 kapjes, deel groene granaat	Diversen	2e zoeking CVO	Mogelijk andere granaten, rook heeft lichtgroen granaatlichaam. Mogelijk deel afsluitplaat schokbuis
AABV5296NL	Diversen (incl. klemschroef commandovizier)	Diversen	2e zoeking CVO	Mogelijk andere granaten
AABV5296NL	Klemschroef commandovizier	Schietbuis	2e zoeking CVO	
AABV5499NL	Deel commandovizier	Schietbuis	Scherfvesten	
AABV5260NL	Deel commandovizier	Schietbuis	Scherfvesten	
AABV5260NL	Waarschijnlijk deel commandovizier	Schietbuis	Scherfvesten	
AABV5259NL	Deel commandovizier	Schietbuis	Scherfvesten	Aan zijde getande wiel, afdruk in verf van plaatje
AABV5499NL	Gecorrodeerd deel met schroefdraad	Mortiergranaat	Scherfvesten	Verbinding hoofdvlading met staartstuk mortiergranaat
AABV5499NL	Schijf met uitwendige schroefdraad, holte en 2 gaten	Mogelijk Schokbuis	Scherfvesten	Dikte 6.95 mm, diameter max 29.5 mm, diameter min 24.5 mm. Mogelijk afsluitplaat schokbuis
AABV5499NL	Losse delen, mogelijk aluminium delen schokbuis en commandovizier	Diversen	Scherfvesten	Waarschijnlijk deel met de groef net onder de beschermkap.
AABV5499NL	2 veiligheidspinnen zeer waarschijnlijk niet van incident	Mortiergranaat	Scherfvesten	Waarschijnlijk opgepraat tijdens eerdere schoten
AABV5296NL	Dun metalen plaatje	Mogelijk Schokbuis	2e zoeking CVO	
AABV5296NL	Mogelijke delen ontsteker en commandovizier	Diversen	2e zoeking CVO	uit plastic bakje van volg nr 16, niet magnetisch

Tabel A2 Overzicht inventarisatie van de gevonden restanten niet direct relevant voor beantwoording onderzoeksvragen.



Noot Onderzoeksraad voor Veiligheid:
Om reden van pieteit is dit overzicht niet weergegeven.

B Reactie typen

Er worden verschillende reactietypen van munitie onderscheiden. In onderstaande beschrijvingen wordt een definitie gegeven van de verschillende reactietypen [vertaald in het Nederlands vanuit ref. 9].

Detonatie (Type I)

Meest heftige type explosie. Een supersonische ontleding door het energetische materiaal die een intense schok veroorzaakt in het omringend medium, bijvoorbeeld lucht of water en snelle plastische deformatie van metalen omhullingen gevolgd door omvangrijke fragmentatie. Al het energetische materiaal zal worden verbruikt. De effecten omvatten grote kraters in de grond bij munitie op of vlak bij de grond, perforatie/ fragmentatie van aangrenzend metalen pantser en blast schade aan nabijgelegen constructies.

Partiële Detonatie (Type II)

Het op één na heftigste type explosie. Sommige, maar niet alle energetische materialen reageren als in een detonatie. Een intense schok wordt gevormd; sommige omhullingen breken op in fragmenten; er kan een krater in de grond worden gevormd, belendende metalen platen kunnen worden beschadigd als bij een detonatie en de blast zal nabijgelegen structuren beschadigen. Een partiële detonatie kan ook grote fragmenten produceren als bij een breuk bij hoge druk (brosse breuk). De grootte van de schade, in vergelijking met een volledige detonatie, is afhankelijk van de hoeveelheid materiaal die detoneert.

Explosie (Type III)

Ontsteking en snelle verbranding van een opgesloten energetisch materiaal bouwt lokaal hoge drukken op die leiden tot een heftige breuk van de omhullende structuur. Metalen omhullingen worden gefragmenteerd (brosse breuk) in grote delen die vaak over lange afstanden worden uitgeworpen. Ongereageerde en/of brandende energetische materialen worden ook uitgeworpen. Er is gevaar van vuur en rook. Schokken in de lucht kunnen schade aan naburige structuren opleveren. De blast en hoge snelheidsfragmenten kunnen kleine kraters in de grond veroorzaken en schade (breken, scheuren, gutsen) in belendende metalen platen veroorzaken. De blast is bij een explosie lager dan bij een detonatie.

Deflagratie (Type IV)

Ontsteking en verbranding van opgesloten energetisch materiaal leidt tot een niet-heftige drukaflaat ten gevolge van een lage sterkte van de omhulling of drukaflaat door afsluitingen van de omhulling. De omhulling kan scheuren, maar fragmenteert niet; afsluitingen van openingen kunnen worden weggeschoten en onverbrand en brandend energetisch materiaal kan worden verspreid en het vuur verder verspreiden. Drukaflaat kan een niet vastzittend item verplaatsen, wat een extra gevaar oplevert. Geen blast of significante fragmentatie schade aan de omgeving; slechts hitte en rook schade van het brandend energetisch materiaal.

Brand (Type V)

Het minst heftige type explosie. Het energetisch materiaal ontsteekt en brand zonder het artikel voort te stuwen. De omhulling kan open gaan, smelten of verzwakken zodat deze niet heftig openscheurt, wat een rustige uitstroom van de verbrandingsgassen mogelijk maakt. Brokstukken blijven over het algemeen binnen het gebied van de brand. Het wordt niet verwacht dat de brokstukken een noodlottige uitwerking hebben op personeel of dat er gevaarlijk fragmenten zijn op een afstand van meer dan 15 meter.

ANALYSE VAN BENODIGDE SNELHEID OM SCHOKBUIS TE WAPENEN

In het onderzoek naar de directe oorzaak van het ongeval is een aantal technisch-mechanische scenario's uitgewerkt. Deze technisch-mechanische scenario's hebben als gemeenschappelijke schakel in de redeneerlijn dat de schokbuis van de fatale granaat op het moment van het ongeval in de gewapende stand stond. In deze gewapende stand is de schok van de lancering voldoende om de granaat te laten detoneren.

In opdracht van de Onderzoeksraad heeft TNO onderzocht in hoeverre het mogelijk is de schokbuis door mechanische belasting (vallen, schokken, trillingen) voorafgaand aan het gebruik van de granaat in de gewapende stand te brengen.

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 2017 R10160

**Ongeval mortieroefening Mali: analyse van
benodigde versnelling om schokbuis te
wapenen**

Datum	14 februari 2017
Auteur(s)	R.H.B. Bouma, P.A. Hooijmeijer, E.J. Kroon
Aantal pagina's	33 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	2
Opdrachtgever	Onderzoeksraad Voor Veiligheid
Projectnaam	Vervolg technische onderzoeksvragen
Projectnummer	060.26194

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2017 TNO

Samenvatting

Op 6 juli 2016 heeft een dodelijk ongeval plaatsgevonden in Kidal, Mali tijdens een mortiergranaatoefening. De Onderzoeksraad Voor Veiligheid (OVV) heeft in het kader van het onderzoek gevraagd om een analyse van de benodigde versnelling om het type schokbuis van de betrokken 60 mm mortiergranaat HE 80 te wapenen. Er is een theoretische analyse uitgevoerd om vast te stellen of de schokbuis te wapenen is door schokken en/of trillingen. Er is een vergelijking gemaakt met belastingen die optreden bij normaal gebruik en functioneren, en met de resultaten uit de mechanische metingen zoals uitgevoerd door Kennis Centrum Wapensystemen en Munitie (KCW&M) van het Ministerie van Defensie.

De theoretische analyse heeft zich gericht op:

- het wapenen van de schokbuis door een verticale val van de mortiergranaat
- het wapenen van de schokbuis door een voorwaartse versnelling
- de benodigde combinaties van tijdsduur en versnelling van een schokpuls voor wapening van de schokbuis.

Uit deze analyse wordt geconcludeerd:

- Een vertraging hoger dan 154 g is nodig voor het wapenen van de schokbuis bij een *verticale val* van de mortiergranaat onder de aanname dat de mortiergranaat instantaan stilstaat. Deze vertraging wordt theoretisch gerealiseerd bij een valhoogte groter dan 1,25 m.
- Een minimale versnelling van 132 g is nodig gedurende 14 ms voor wapening van de schokbuis onder invloed van een *voorwaartse versnelling* van de mortiergranaat. Bij hogere versnellingen neemt de benodigde tijdsduur af.
- De benodigde combinaties van tijdsduur en versnelling in een *schokpuls* zijn van belang, waarbij zich 1) een minimum versnelling aftekent bij lange pulsduur en 2) een constante waarde van het product van pulsduur en versnelling bij korte pulsduur.
- In Mali zijn significant hogere temperaturen dan 20 °C aan de orde. De invloed van een temperatuurstijging tot 70 °C op de veerconstante, en daarmee de wapening van de buis, is te verwaarlozen.

In de door KC W&M uitgevoerde mechanische testen (valproef, loose cargo test, schokproef, sinus-sweep trilproef en trilproef tactical wheeled vehicle-all terrain) is geen wapening van de schokbuis waargenomen. Voor al deze proeven, met uitzondering van de valproef, is dit conform de verwachting op basis van de theoretische analyse.

Het is aannemelijk dat het verschil bij de valproeven tussen de theoretische benadering en de experimenten wordt veroorzaakt door het niet meenemen van wrijvingskrachten in het mechaniek van de schokbuis.

Additionele analyse van normaal gebruik van de mortiergranaat laat zien dat de schokbuis niet wapent door een val in een schietbuis, maar dat de eerste stap van de wapening wordt gerealiseerd door de voorwaartse versnelling van de mortiergranaat in de schietbuis bij lancering, op ongeveer 1-2 cm afstand van de bodem van de schietbuis.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	4
2	Theoretische analyse van wapening schokbuis	5
2.1	Algemene informatie schokbuis	5
2.2	Wapening van de schokbuis	6
2.3	Massa-veersysteem voor accidentele wapening van de schokbuis	7
2.4	Berekening van beweging en versnelling van onderdelen in de schokbuis	10
2.5	Wapening van de schokbuis bij normaal gebruik en functioneren	15
3	Mechanische beproevingen door KC W&M	20
4	Conclusies	24
5	Referenties	26
6	Ondertekening	27
	Bijlage(n)	
	A Experimentele bepaling veerconstante	
	B Theoretische analyse van de gewapende mortiergranaat	

1 Inleiding

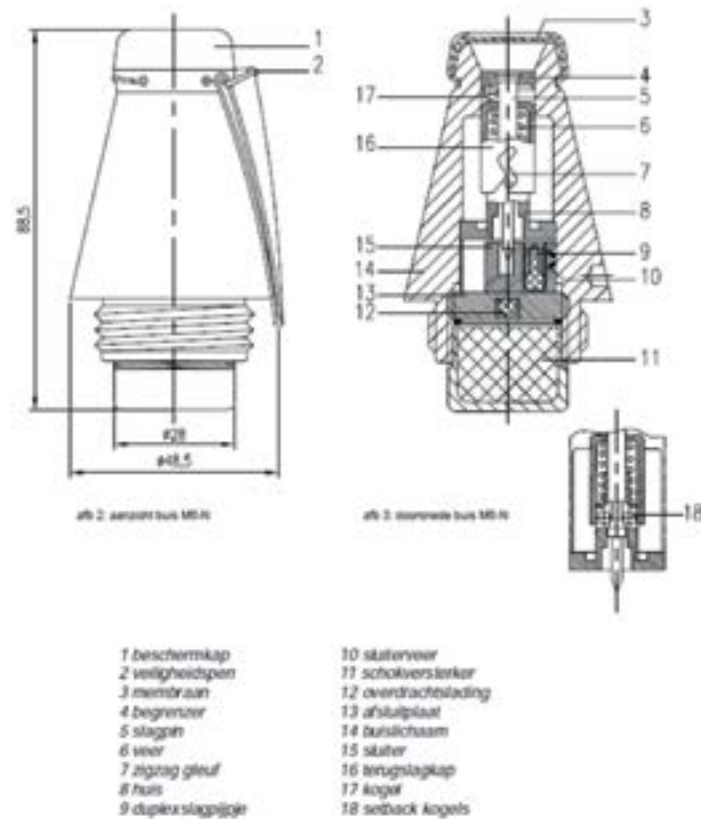
Op 6 juli 2016 heeft een dodelijk ongeval plaatsgevonden in Kidal, Mali tijdens een mortiergranaatoefening. De Onderzoeksraad Voor Veiligheid (OVV) heeft in het kader van het onderzoek ondermeer de volgende activiteit geformuleerd: Analyse van de benodigde versnelling om de schokbuis te wapenen.

Het doel van deze activiteit is om door middel van een theoretische analyse van het mechaniek van de schokbuis vast te stellen of deze te wapenen is door schokken en/of trillingen. De theoretische analyse is vergeleken met de schokken/trillingen die bij transport en gebruik optreden, zoals beproefd door het Kennis Centrum Wapensystemen en Munitie voor de Commissie van Onderzoek (CvO) van het Ministerie van Defensie.

2 Theoretische analyse van wapening schokbuis

2.1 Algemene informatie schokbuis

De doorsnede van de schokbuis M6-N, en de benamingen van de onderdelen zijn weergegeven in Figuur 1. De nummering uit Figuur 1 wordt waar nodig in de tekst vermeld, met name om het onderscheid tussen veer en sluiterveer, en tussen kogel en setback kogels duidelijk te maken. De massa's van de onderdelen uit een inerte referentie schokbuis zijn gemeten en staan vermeld in Tabel 1. De massa's zijn gemeten, omdat deze nodig zijn in de theoretische analyse van de wapening.



Figuur 1 Schokbuis M6-N [VS 9-847, 2016].

Tabel 1 Nummer en benaming van onderdelen uit de schokbuis M6-N, en de gemeten massa.

Nummer	Benaming onderdeel	Massa gram
4+5	Begrenzer en slagpin*	4,07
6	Veer	0,257
8	Huis	11,7
9	Duplex slagpijpe**	1,48
10	Sluiterveer	0,047
12	Overdrachtslading**	0,96
13	Afsluitplaat	27,4
15	Sluiter	5,09
16	Terugslagkap	4,01
17/18	Kogel/setback kogels	0,256 0,254 0,254

* Begrenzer en slagpin zijn als afzonderlijke onderdelen getekend, maar vormen een enkel onderdeel.

** Een inerte referentie schokbuis is geleverd waarbij energetische materialen/onderdelen zijn vervangen door inerte materialen/onderdelen; de gemeten massa is derhalve indicatief.

2.2 Wapening van de schokbuis

Ter verduidelijking van de theoretische analyse in dit rapport wordt de manier waarop de schokbuis wapent toegelicht. De volgende stappen zijn te onderscheiden bij een normale wapening en functionering van de schokbuis.

1. Vanaf het moment van productie houdt de veer (6) onder voorspanning de terugslagkap op zijn plaats. Kogel (17) is gefixeerd op zijn plaats en de schokbuis is ongewapend. Dit blijft zo (ook tijdens opslag en transport) tot en met het moment dat de mortiergranaat door de belader wordt losgelaten en in de schietbuis valt.

2. Bij lancering door ontsteking van de grondkardoes versnelt de mortiergranaat in de schietbuis naar buiten. De terugslagkap (16) beweegt mee, zij het met enige vertraging, en drukt de veer (6) verder in. De veer zit opgesloten tussen de beschermkap (1) en het huis (8) met de setback kogels (18). Het huis beweegt direct mee met elke beweging van de mortiergranaat. De relatieve beweging van de terugslagkap t.o.v. de mortiergranaat is gelijk aan de relatieve beweging van de terugslagkap t.o.v. het huis. Vanwege de massatraagheid van de terugslagkap valt kogel (17) tijdens het versnellen van de granaat uit de schietbuis, in de vrijgekomen loze ruimte buiten de terugslagkap.

3. Op enig moment valt de voortdrijvende kracht voor versnelling van de mortiergranaat weg, mogelijk zelfs binnen het laatste deel van het traject in de schietbuis en wanneer het dikste deel van het granaatlichaam buiten de schietbuis komt. De veer (6) duwt de terugslagkap op dat moment terug tot aan de begrenzer (4), d.w.z. een kogeldiameter (van kogel 17) hoger dan voorheen. De twee setback kogels (18) worden vrijgegeven en vallen eveneens in de loze ruimte buiten de terugslagkap. Nu ook de setback kogels weg zijn, kan de slagpin (5) volledig vrij over de lengte-as bewegen.

4. Omdat de slagpin nu vrij kan bewegen, en de veer (6) een zekere voorspanning heeft, zal de slagpin naar voren bewegen en daarmee de sluitersluit (15) vrijgeven. De voorgespannen sluiterveer (10) drukt de sluitersluit opzij en brengt hiermee het duplex slagpijpje (9) in lijn met de slagpin en de overdrachtslading (12). Op dit moment is de schokbuis gewapend.

5. Bij inslag van de mortiergranaat op het doel wordt de slagpin op zijn plaats gehouden door het membraan (3). De mortiergranaat beweegt door zijn massa draagbaarheid tegen de veer (6) waardoor de slagpin het duplexslagpijpje (9) raakt en de detonatieketen in werking komt. De lengte van de ingedrukte veer is 26.6 mm op het moment dat het duplexslagpijpje net wordt geraakt.

2.3 Massa-veersysteem voor accidentele wapening van de schokbuis

Voor het beantwoorden van de onderzoeksvraag of de schokbuis onder invloed van schokken of trillen gewapend kan worden is enkel stap 2, zoals hierboven benoemd, relevant. Als onder invloed van schokken of trillen de terugslagkap voldoende ver naar beneden, tegen de veer (6) in, wordt gedrukt, zal de kogel (17) vrijkomen. Het wapeningsproces is hiermee namelijk onomkeerbaar in werking gesteld en zal resulteren in wapening van de schokbuis.

Het betreffende massa-veersysteem wordt gekarakteriseerd door de massa van de terugslagkap, de veerconstante van de veer, en de voorspanning van de veer. Vastgesteld moet worden welke versnelling en tijdsduur van deze versnelling nodig is om wapening te realiseren.

Voor een massa-veersysteem zonder demping, zie bijvoorbeeld [Kroon, Bouma, van Ham, 2015], wordt de algemene bewegingsvergelijking gegeven door:

$$\text{Vergelijking 1} \quad F = -kz = m \frac{d^2z}{dt^2}$$

met F de kracht, k de veerconstante, m de massa, z de verplaatsing en t de tijd. De eerste afgeleide van verplaatsing z naar de tijd t is de snelheid van massa m, de tweede afgeleide naar de tijd is de versnelling.

Voor een lineaire veer is de veerconstante gelijk aan:

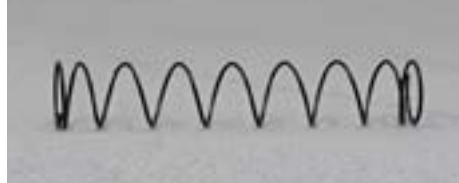
$$\text{Vergelijking 2} \quad k = G \frac{d^4}{8nD^3}$$

met G de afschuifmodulus van het metaal, d de diameter van de draad, D de diameter van de veer, en n het aantal actieve windingen.

De eigenfrequentie f_0 van het massa-systeem is gelijk aan:

$$\text{Vergelijking 3} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Een foto van de veer (6) is weergegeven in Figuur 2. De veer is een lineaire veer. De afmetingen van de veer zijn gemeten en zijn weergegeven in Tabel 2. Daarnaast is een schatting gemaakt van de veerconstante met de afschuifmodulus voor typische metalen (messing, koper en staal) in het bereik $3,5\text{-}8 \cdot 10^{10}$ Pa [Engineering toolbox, 2017].



Figuur 2 Veer (6).

Tabel 2 Karakteristieken van veer.

	Veer
Veerlengte (vrij) L	40,4 mm
Veerlengte (gemonteerd in schokbuis)	16,0 mm
Indrukking veer ΔL in voorgespannen toestand	24,4 mm
Veerdiameter D	7,4 mm
Draaddiameter d	0,45 mm
Actieve windingen n	7
Veerconstante k, berekening	63-145 N/m
Experiment (lineair)	144,7 N/m
Experiment (zigzag)	178,8 N/m

In Tabel 2 staat naast de berekende waarde van de veerconstante van veer (6) op basis van vergelijking 2 ook een tweetal experimenteel bepaalde waarden gegeven ter verificatie van de theoretische berekening. De experimentele bepaling van de veerconstante staat beschreven in bijlage A.

De experimenteel bepaalde veerconstante van 144,7 N/m, waarbij de veer vrij in lineaire richting kan bewegen, ligt aan de bovengrens van de op theoretische gronden berekende veerconstante van 63-145 N/m (zie Tabel 2). De veerconstante is ook experimenteel bepaald onder de realistische conditie dat deze in de terugslagkap en op het huis is geplaatst en wordt gedwongen te roteren vanwege de pin op het huis en de zigzagvorm in de terugslagkap, zie ook Figuur 11. De interactie tussen deze componenten van de schokbuis resulteert in een verhoging van de veerconstante, zie Appendix A. Deze hogere veerconstante is vastgesteld op 178,8 N/m op basis van de meetresultaten in Appendix A en wordt gehanteerd in de verdere analyse.

Bovenstaande metingen zijn uitgevoerd bij kamertemperatuur. Door stijging van temperatuur, zal de veerconstante veranderen. In [Keulegan, 1932] wordt de relatie tussen temperatuurverhoging, expansie van het metaal van de veer, verandering van afschuifmodulus en verandering van veerconstante beschreven, en wordt een uitgebreide set metingen gegeven. Op basis van tabel 3 in deze referentie is de verwachting dat bij een temperatuurstijging van 50 °C de draadlengte van de veer typisch 0,05% zal toenemen, de afschuifmodulus maximaal 2% zal afnemen, en de veerconstante maximaal 2% zal afnemen.

In Mali zijn significant hogere temperaturen dan 20 °C aan de orde. De invloed daarvan op de veerconstante, en daarmee de theoretische analyse, is te verwaarlozen. Het is dus uit te sluiten dat door verhoogde temperaturen een

achteruitgang in de eigenschappen van de veer zal leiden tot eerdere wapening van de schokbuis.

Opgemerkt moet worden dat doordat de terugslagkap geforceerd wordt een zigzag beweging te volgen, deze naast de veerdruk ook wrijving ondervindt door de kracht die wordt uitgeoefend door het directe contact tussen de terugslagkap en de pin op huis (8) in de zigzag gleuf. Hierdoor zal de veerconstante op verschillende momenten tijdens indrukking nog hoger zijn dan 178,8 N/m.

De torderende beweging vereist echter een tweetal bewegingsvergelijkingen, één over de lengte-as van de veer, zie Vergelijking 1, en één voor rotatie om de lengte-as. Beide bewegingsvergelijking zijn gekoppeld via de wrijvingskracht en via de voorgeschreven verplaatsing via de zigzag gleuf. De wrijvingskracht is niet eenvoudig te modelleren, omdat 1) de wrijvingskracht afwezig is wanneer de pin een knik in de zigzag gleuf passeert, en 2) de contacthoek tussen zigzag gleuf en pin nabij deze overgang niet constant is. De wrijvingskracht wordt daarom in de theoretische analyse niet meegenomen; de veerconstante van 178,8 N/m wordt gehandhaafd. Het effect hiervan is dat in de theoretische benadering eerder wapening van de schokbuis wordt berekend dan dat deze in realiteit zal optreden.

De combinatie terugslagkap – veer is bepalend voor de initiële stap in de wapening van de schokbuis door vrijgave van de kogel (17). De combinatie van terugslagkap, slagpin en begrenzer is bepalend voor de vrijgave van de setback kogels (18) en de sluiters.

De eigenfrequenties van verschillende massa-veercombinaties zijn weergegeven in Tabel 3. Uit de eigenfrequentie is ook een karakteristieke responstijd, $1/f_0$, van het massa-veersysteem berekend.

Tabel 3 Eigenfrequentie en karakteristieke responstijd voor een tweetal massa-veer combinaties.

	Eigenfrequentie f_0 Hz	Karakteristieke responstijd s
Terugslagkap - veer	33,6	0,030
Terugslagkap en slagpin begrenzer - veer	23,7	0,042

Uit de afmetingen van losse onderdelen, het samenstel zoals in Figuur 11, de binnenzijde van buislichaam (14), en de sluiters, zijn activeringsafstanden afgeleid, zie Tabel 4. De benodigde extra indrukking van de veer bovenop de voorspanning voor het laten vrijkomen van kogel (17) is gerelateerd aan de meting van enerzijds dimensies van het samenstel in Figuur 11 en anderzijds dimensies in het inwendige van het buislichaam, en is daarmee minder nauwkeurig te bepalen. Vandaar de range op de afstand voor de vrijgave van de kogel.

Tabel 4 Activeringsafstanden.

	Afstand mm
Vrijgave kogel	8,9-9,6
Lengte ingedrukte veer waarbij slagpin duplexslagpijpje raakt	26,6

2.4 Berekening van beweging en versnelling van onderdelen in de schokbuis

Om vast te stellen onder welke opgelegde belasting de verplaatsing zodanig is dat kogel (17) wordt vrijgegeven wordt de bewegingsvergelijking van het relevante massa-veersysteem toegepast op verschillende scenario's die kunnen leiden tot accidentele wapening. Deze scenario's zijn achtereenvolgens:

- Verticale val mortiergranaat (2.4.1)
- Voorwaartse versnelling mortiergranaat (2.4.2)
- Halve sinus schokpuls (2.4.3)

Het oplossen van de bewegingsvergelijkingen is ook toegepast op de situatie waarin de mortiergranaat wordt belast door reguliere belastingen tijdens opslag en functioneren (zie 2.5) en op een gewapende mortiergranaat (zie Appendix B). De informatie in 2.5 en Appendix B draagt niet direct bij aan het beantwoorden van de onderzoeksvraag, maar dient ter verificatie van de theoretische analyse dat de detonatieketen in de mortiergranaat kan worden geactiveerd bij regulier gebruik op basis van de kennis van het functioneren van deze schokbuis.

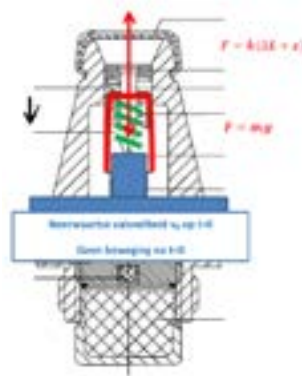
2.4.1 Verticale val mortiergranaat

Wanneer een mortiergranaat verticaal valt op een grondvlak met de schokbuis naar boven gericht, hebben de mortiergranaat als geheel en de terugslagkap in de schokbuis beide een zekere en gelijke valsnelheid v_0 . Deze valsnelheid is gelijk aan:

$$\text{Vergelijking 4} \quad v_0 = \sqrt{2 \cdot \text{valhoogte} \cdot g}$$

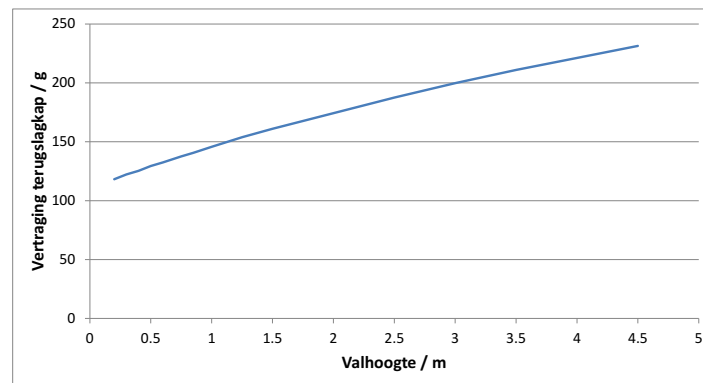
De bewegingsvergelijking voor de dynamische indrukking z van de veer in Figuur 3, vanaf het moment waarop de mortiergranaat bij het raken van de bodem instantaan stilstaat, is:

$$\text{Vergelijking 5} \quad \frac{d^2z}{dt^2} = g - \frac{k_{\text{veer}}}{m_{\text{terugslagkap}}} (\Delta L + z), \text{ met } \frac{dz}{dt}(t=0) = v_0 \text{ en } z(t=0) = 0$$

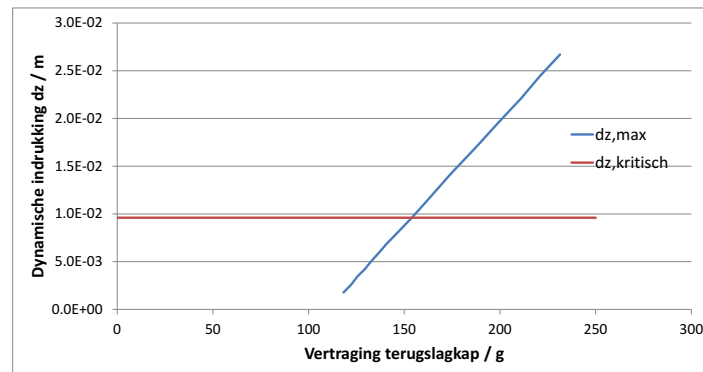


Figuur 3 Schematische weergave voor bewegingsvergelijking verticale val mortiergranaat.

Afhankelijk van de valhoogte neemt de valsnelheid toe en daardoor de vertraging van de terugslagkap bij inslag. Deze beïnvloedt de dynamische indrukking van de veer. De relatie tussen de valhoogte en de ondervonden vertraging staat weergegeven in Figuur 4. De daaruit volgende dynamische indrukking van de veer is weergegeven in Figuur 5.



Figuur 4 Vertraging die terugslagkap in schokbuis ondervindt na inslag, als functie van de valhoogte.



Figuur 5 Dynamische indrukking van de veer als functie van de vertraging die de terugslagkap na inslag (blauw), en kritische indrukking voor wapening van de mortiergranaat (rood).

Theoretisch zal bij een vertraging van de terugslagkap in de mortiergranaat boven de 154 g, d.w.z. bij een val van een hoogte boven de 1,25 m zal wapening van de schokbuis optreden. Bij een val van een hoogte onder de 1,25 m zal de schokbuis zeker niet wapenen.

NB: In deze analyse is aangenomen dat de granaat instantaan stilstaat. De maximale vertraging die de mortiergranaat zelf ondervindt is afgeschat onder aanname van 1) een val op een incompressibele ondergrond zonder weer omhoog te stuiten, en 2) een granaatlichaam dat uit staal bestaat. Uit vergelijking 28 in [Endevco, 2009] is de vertraging ter plaatse van het huis in de schokbuis afgeleid:

Vergelijking 6
$$a_{max,huis} = \frac{c_{staal}}{afstand\ huis-bodem\ granaat} \cdot \frac{v_0}{\sqrt{2}}$$

Met de geluidssnelheid c_{staal} van staal (6100 m/s) en de afstand van huis tot de bodem van de granaat volgt een vertraging van 5300 g. Deze vertraging van het huis is vele malen groter dan de versnelling die de terugslagkap ondervindt en de aanname in de bewegingsvergelijking dat de mortiergranaat instantaan stilstaat is daarom toegestaan.

2.4.2 Voorwaartse versnelling mortiergranaat

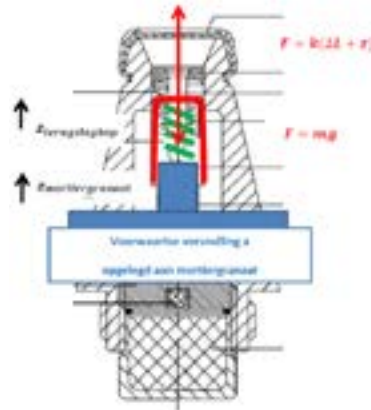
De bewegingsvergelijking voor de dynamische indrukking z van de veer in Figuur 6 en het wapenen van de buis door een voorwaartse versnelling a wordt gegeven door het oplossen van:

Vergelijking 7

$$\frac{d^2 z_{terugslagkap}}{dt^2} = -g + \frac{k_{veer}}{m_{terugslagkap}} (\Delta L - z_{terugslagkap} + z_{mortiergranaat}),$$

$$\frac{d^2 z_{mortiergranaat}}{dt^2} = a + \frac{k_{veer}}{m_{mortiergranaat}} (-\Delta L + z_{terugslagkap} - z_{mortiergranaat}),$$

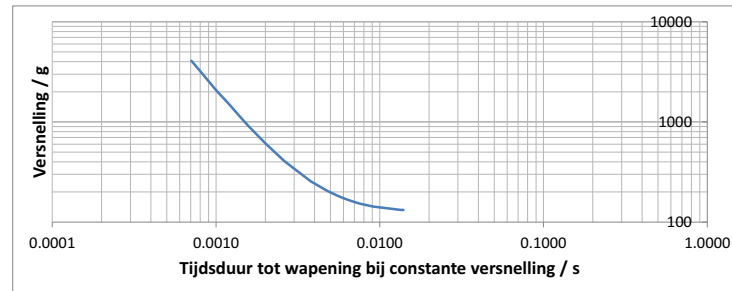
en
$$z = z_{mortiergranaat} - z_{terugslagkap}$$



Figuur 6 Schematische weergave voor bewegingsvergelijking bij een voorwaartse versnelling opgelegd aan de mortiergranaat.

De dynamische indrukking van de veer waardoor kogel (17) wordt vrijgegeven wordt bereikt door een combinatie van versnelling en tijdsduur. Op basis van Vergelijking 7 kan daarom een grafiek worden gemaakt waarbij door het combineren van de tijdsduur en versnelling kan worden vastgesteld of de kogel (17) vrijgegeven wordt. Een minimale versnelling is nodig van 132 g gedurende 14 ms voor wapening van de mortiergranaat onder invloed van een constante voorwaartse versnelling.

Bij combinaties van tijdsduur en versnelling boven de lijn in Figuur 7 zal wapening van de schokbuis optreden, onder de lijn wordt de wapening niet gerealiseerd.

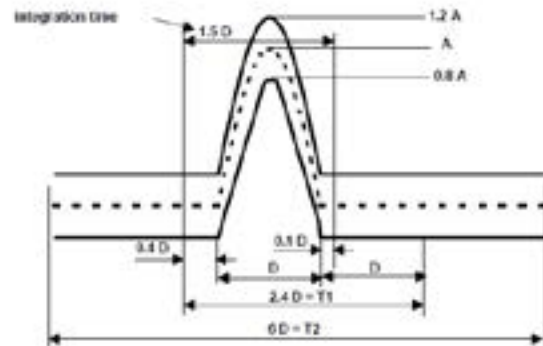


Figuur 7 Combinatie van versnelling en tijdsduur die nodig is voor vrijgave kogel en start wapeningscyclus door continue voorwaartse versnelling van de mortiergranaat.

NB: opgemerkt moet worden dat daadwerkelijke wapening van de schokbuis pas wordt voltooid nadat de versnelling van de mortiergranaat is weggenomen. Pas dan zal de veer zich strekken en vallen ook de setback kogels (18) vrij.

2.4.3 Halve-sinus schokpuls

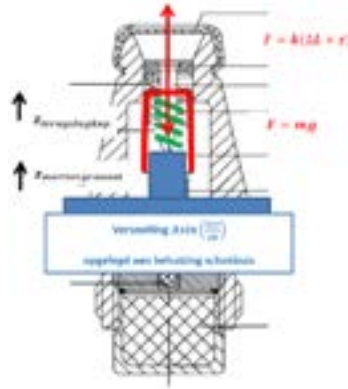
De mortiergranaat kan ook een schok ondergaan. De halve-sinus schokpuls is een van de klassieke puls vormen die bedoeld is als benadering van typische schokken in het operationele domein (bv als gevolg van transport, overslag en gebruik door de militair in het terrein) en staat beschreven in method 403 in [AECTP 400, 2006]. De vorm van de puls is weergegeven in Figuur 8.



Figuur 8 Halve sinus puls met A de maximum versnelling van de nominale schok en D de duur van de schok [AECTP 400, 2006].

De relevante bewegingsvergelijkingen benodigd bij analyse van de schokbuis onder invloed van deze schokpuls, zie Figuur 9, zijn:

Vergelijking 8 $\frac{d^2 z_{\text{terugslagkap}}}{dt^2} = -g + \frac{k_{\text{veer}}}{m_{\text{terugslagkap}}} (\Delta L - z_{\text{terugslagkap}} + z_{\text{mortiergranaat}})$, $\frac{d^2 z_{\text{mortiergranaat}}}{dt^2} = A \sin\left(\frac{2\pi t}{2D}\right)$, voor $t=[0..D]$, en $z = z_{\text{mortiergranaat}} - z_{\text{terugslagkap}}$



Figuur 9 Schematische weergave voor bewegingsvergelijking bij halve-sinus schokpuls opgelegd aan de behuizing van de schokbuis.

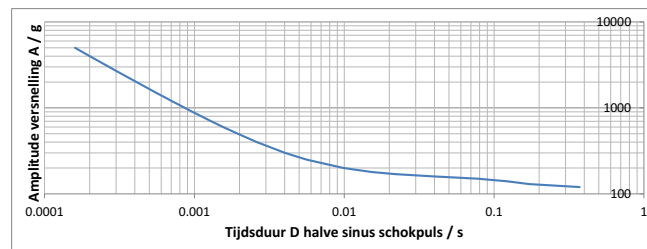
Vrijgave van kogel (17) kan plaatsvinden onder een schokpuls met de juiste combinatie van tijdsduur D en versnelling A . De benodigde combinaties van tijdsduur D en versnelling A voor een schokpuls die resulteert in vrijgave van kogel (17), staan weergegeven in

Figuur 10.

Bij een pulsduur boven de 0,01 s is een afvlakking in de curve zichtbaar; en is een minimum versnelling van 100 à 120 g nodig.

Bij een pulsduur beneden de 0,01 s toont de dubbel-logaritmisch geplote curve een helling van -1, d.w.z. het product van pulsduur en amplitude versnelling is constant (een tien maal kortere pulsduur vereist een 10 maal hogere versnelling).

Bij combinaties van tijdsduur D en versnelling A boven de lijn in Figuur 10 zal wapening van de schokbuis optreden, onder de lijn wordt de wapening niet gerealiseerd.



Figuur 10 Combinatie van amplitude versnelling A en tijdsduur D die nodig is voor vrijgave kogel en start wapeningscyclus door schokpuls met de vorm van een halve sinus.

2.5 Wapening van de schokbuis bij normaal gebruik en functioneren

2.5.1 Mortiergranaat in rust

Als de mortiergranaat in rust is, is in de schokbuis de situatie conform Figuur 11 (verticale positie getoond).



Figuur 11 Huis met slagpin/begrenzer en terugslagkap, op zijn plaats gehouden door de combinatie van veer en kogel.

Voor het krachterevenwicht in verticale rusttoestand geldt:

Vergelijking 9

$$k_{veer} \cdot \Delta L \gg m_{terugslagkap} \cdot g$$

met ΔL de indrukking van de veer in de situatie van Figuur 11 en g de zwaartekrachtversnelling ($9,81 \text{ m/s}^2$).

De zwaartekracht uitgeoefend op de terugslagkap is in verticale toestand maximaal en gelijk aan $0,04 \text{ N}$. De kracht die de veer ondervindt door de voorspanning is gelijk aan $4,4 \text{ N}$. De voorspanning is vele malen groter dan de zwaartekracht die wordt uitgeoefend op de terugslagkap en deze zal daardoor op zijn plaats blijven, ongeacht de oriëntatie van de mortiergranaat.

Uit Vergelijking 9 is af te leiden dat minimaal een versnelling van 429 m/s^2 of $43,7 \text{ g}$ nodig is voor enige indrukking van de veer vanuit stilstand, dus wanneer zowel mortiergranaat als terugslagkap geen initiële impuls hebben.

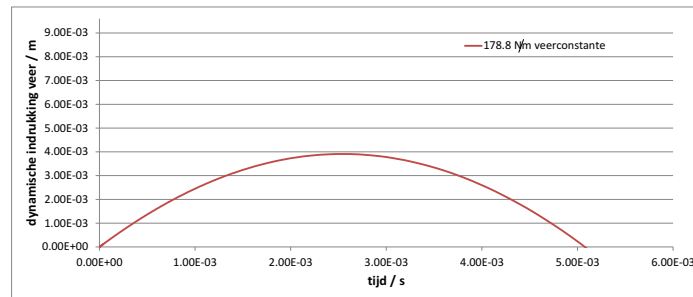
2.5.2 Verticale val in schietbuis

Aan de hand van de in paragraaf 2.4.1 gebruikte vergelijkingen en grafieken is vastgesteld wat de dynamische indrukking van de veer is bij een val van de ongewapende mortiergranaat in de schietbuis. Voor een conservatieve benadering is uitgegaan van een maximale valsnelheid en is uitgegaan van een verticale stand

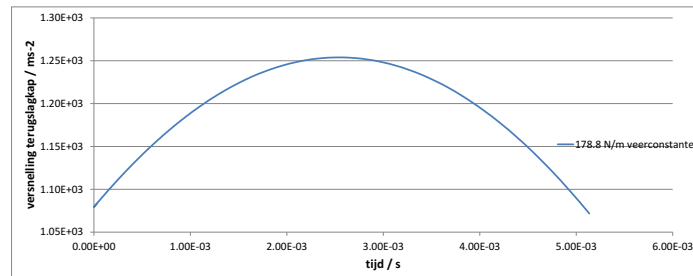
van de schietbuis. De valhoogte van de mortiergranaat is gelijk aan de lengte van de schietbuis (0,65 m) minus de lengte van grondkardoes tot het breedste deel van het granaatlichaam, dat is $0,65 - 0,19 = 0,46$ m. De maximale valsnelheid vanaf deze hoogte is 3,0 m/s.

Met behulp van de bewegingsvergelijking voor de dynamische indrukking van de veer, vanaf het moment waarop de mortiergranaat bij het raken van de bodem instantaan stilstaat, is

Figuur 12 gemaakt. De verticale as van deze Figuur is gemaximeerd op de benodigde dynamische indrukking van 9,6 mm waarbij de kogel wordt vrijgegeven. De veer wordt bij bovengenoemde val in de schietbuis maar ongeveer 4,0 mm ingedrukt. *Het wapenen van de mortiergranaat door een vertical val in de schietbuis is derhalve uitgesloten.* De versnelling die de terugslagkap in dit geval ondervindt, staat weergegeven in Figuur 13 en is 110 – 125 g gedurende 5 ms.



Figuur 12 Dynamische indrukking van de veer bij de impact van een ongewapende mortiergranaat op de bodem van de schietbuis.



Figuur 13 Maximale versnelling die terugslagkap ondervindt wanneer een ongewapende mortiergranaat in de schietbuis valt.

2.5.3 Voorwaartse versnelling bij lancering uit schietbuis

Bij initiatie van de grondkardoes (lading 0) of grondkardoes plus aanvullingslading (lading 1), zal de mortiergranaat door drukopbouw in de schietbuis versnellen totdat deze de loop heeft verlaten.

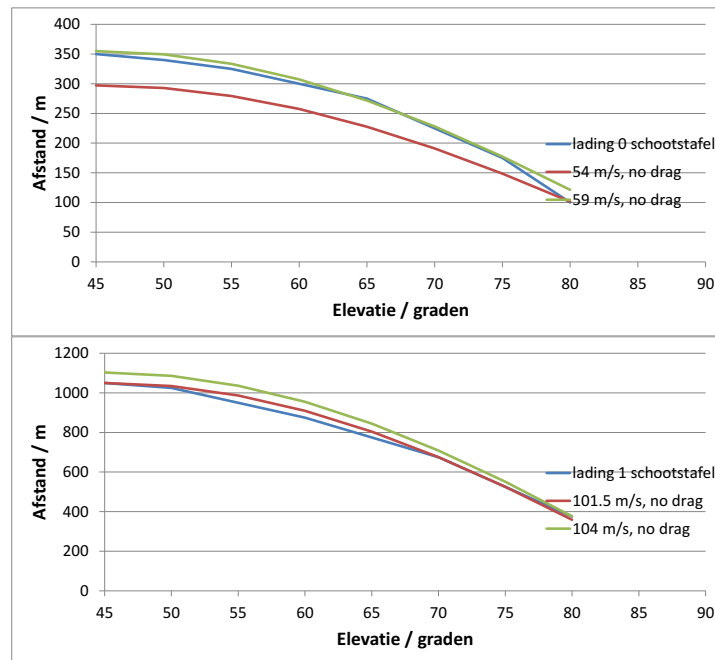
Op het commandovizier staan de combinaties van schootsafstand, elevatie en aantal ladingen weergegeven, zie Figuur 14. Uit de schootstafel is de

mondingsnelheid v geschat voor lading 0 en lading 1, onder verwaarlozing van wrijving in lucht, zie Figuur 15. De afstand is berekend met:

Vergelijking 10
$$afstand = \frac{2 \cos(elevatie) \sin(elevatie) v^2}{g}$$



Figuur 14 Commandovizier met schootstafel [Vuursteunbulletin, 2013].



Figuur 15 Schootstafel voor lading 0 (boven) en lading 1 (onder), en tevens de berekening van afstand versus elevatie voor een paraboollucht onder invloed van de zwaartekracht en aangegeven mondingsnelheid.

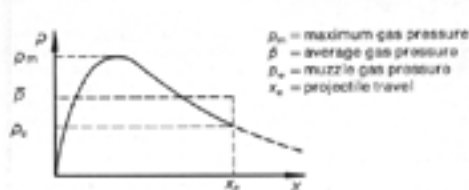
Uit de mondingsnelheid en effectieve weglengte voor versnelling (de lengte waarover de mortiergranaat versnelt zolang deze zich nog in de schietbuis bevindt: 0,46 m) zijn een gemiddelde versnelling a_{gem} van de mortiergranaat, gemiddelde druk p_{gem} in de loop en de bijbehorende tijdsduur Δt voor versnelling berekend uit respectievelijk:

$$\text{Vergelijking 11} \quad a_{gem} = \frac{v^2}{2 \times 0,46}$$

$$\text{Vergelijking 12} \quad p_{gem} = \frac{m_{mortiergranaat} \cdot a_{gem}}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}}$$

$$\text{Vergelijking 13} \quad \Delta t = \sqrt{\frac{2 \times 0,46}{a_{gem}}}$$

met \varnothing de inwendige diameter (60 mm) van de schietbuis en de massa van de mortiergranaat 1,6 kg. In realiteit is er bij een schot een versnellingsprofiel i.p.v. een gemiddelde versnelling, en een drukprofiel i.p.v. een gemiddelde druk (zie Figuur 16). Een typische verhouding van de gemiddelde druk en de piekdruk ligt tussen 0,38 en 0,62 voor wapensystemen van het kaliber 20 mm tot 155 mm [Rheinmetall, 1982]. De gemiddelde waarden zijn een representatieve maat voor de optredende versnellingen van de mortiergranaat en drukken in de schietbuis.



Figuur 16 Pressure versus projectile travel [Rheinmetall, 1982].

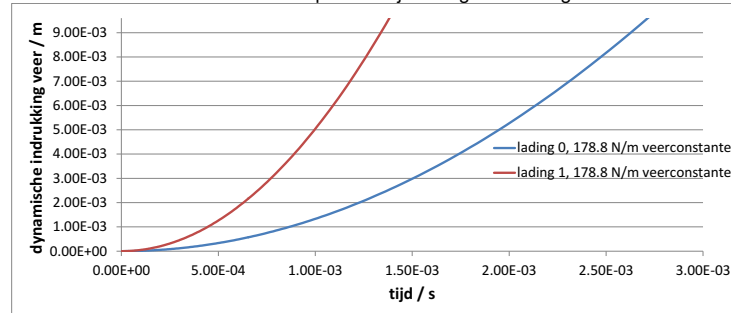
De berekende waarden staan in Tabel 5 vermeld. De versnellingen die optreden zijn van de orde 400 tot 1100 g voor respectievelijk lading 0 en lading 1, en zijn substantieel hoger dan de zwaartekrachtversnelling.

Tabel 5 Mondingsnelheid, gemiddelde versnelling, druk en tijdsduur voor versnelling bij lading 0 en 1.

	Lading 0	Lading 1
Mondingsnelheid v	59 m/s	102 m/s
Gemiddelde versnelling a_{gem}	$3,8 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$	$11,3 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$
Gemiddelde druk p_{gem}	21,5 bar	64 bar
Tijdsduur versnelling Δt	15,6 ms	9,0 ms

De bewegingsvergelijking voor de dynamische indrukking z van de veer en het wapenen van de buis door versnelling in de schietbuis is gegeven in paragraaf 2.4.2 (Vergelijking 7). Oplossing van deze bewegingsvergelijking voor bovengenoemde lanceringen met Lading 0 of Lading 1 resulteert in de grafiek in Figuur 17. De verticale as is weer gemaximeerd op de benodigde dynamische

indrukking waarbij kogel (17) wordt vrijgegeven. De benodigde dynamische indrukken van 8,9 - 9,6 mm voor vrijgave van de kogel (17) wordt bereikt bij een versnelling van 385 g gedurende 2,7 ms voor lading 0 of 1150 g gedurende 1,4 ms voor lading 1. De afgelegde weg van de mortiergranaat t.o.v. de bodem van de schietbuis is 14 en 11 mm voor respectievelijk lading 0 en lading 1.



Figuur 17 Dynamische indrukking van de veer bij de versnelling van een ongewapende mortiergranaat bij lading 0 en lading 1.

Op basis van de bewegingsverlikingen in Vergelijking 7 en bovenstaande figuur wordt geconcludeerd dat *de massa-traagheid van de terugslagkap en de weerstand van veer (7) voorkomen dat de veer zich tijdens de versnelling van de mortiergranaat in de schietbuis weer uitrekt*. De setback kogels komen tijdens de versnelling van de mortiergranaat in de schietbuis niet vrij, en het in lijn plaatsen van de sluiters begint dus pas nadat de mortiergranaat geen significante versnelling meer ondervindt bij of vlak na het verlaten van de schietbuis.

3 Mechanische beproevingen door KC W&M

In opdracht van de Commissie van Onderzoek heeft het Kennis Centrum Wapensystemen en Munitie van het Ministerie van Defensie, beproevingen gedaan aan de 60 mm mortier HE-80 [KCW&M, 2016]. De in het vorige hoofdstuk uitgevoerde theoretische analyse van de wapening van de schokbuis in een aantal scenario's wordt gebuikt om een vergelijk te maken met de resultaten van KC W&M.

3.1.1 Valtest

Valtesten zijn uitgevoerd vanaf 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 en 4,5 m, met een ondergrond van staal, hout en zand. Een verticale val van de mortiergranaat met de schokbuis aan de bovenzijde middels een geleiderail wordt verondersteld. In geen van de testen is de schokbuis in de gewapende stand na de val.

De valhoogte tijdens de experimenten is altijd groter dan de 0,46 m valhoogte van de mortiergranaat in de schietbuis. In Tabel 6 staat de berekende inslagsnelheid en dynamische indrukking van de veer als functie van de valhoogte, berekend met Vergelijking 5.

Tabel 6 Berekende inslagsnelheid, maximale indrukking veer, tijdstip waarop dit wordt bereikt, maximale versnelling van de terugslagkap, als functie van de valhoogte van de mortiergranaat.

Valhoogte m	V_o m/s	dz_{max} mm	tijd tot dz_{max} ms	$a_{max, terugslagkap}$ g
0,5	3,1	4,2	2,6	129
1,0	4,4	7,9	3,5	146
1,5	5,4	11,2	3,8	161
2,0	6,3	17,1	4,4	174
2,5	7,0	17,0	4,8	187
4,5	9,4	26,7	5,2	231

Bij valhoogtes van 0,5 en 1,0 m wordt geen wapening van de schokbuis berekend, bij grotere valhoogtes wel. Dit komt niet volledig overeen met de experimenten. Mogelijke verklaringen zijn 1) de invloed van wrijving tussen de pin op het huis in de schokbuis, en zigzag gleuf in de terugslagkap, en 2) de experimentele inslagcondities en compressibiliteit van het granaatlichaam.

De wrijvingskracht tussen terugslagkap en pin is expliciet niet meegenomen in de modellering, maar kan qua ordegrrootte wel worden vergeleken met 4,4 N, d.i. de kracht uitgeoefend door de voorgespannen veer.

De wrijvingskracht F_w voor beweging van de pin langs de zigzag gleuf is:

$$\text{Vergelijking 14 } F_w = m_{\text{terugslagkap}} \cdot \mu \cdot \sin \alpha \cdot \frac{d^2 z}{dt^2}$$

met μ de dynamische wrijvingscoëfficiënt en α de hoek tussen zigzag gleuf en de lengte-as van de veer. De dynamische wrijvingscoëfficiënt voor aluminium-koper en aluminium-staal is typisch 0,24 [Shibashis, 2011]. De hoek α is 45°.

De maximale versnelling van de terugslagkap uit Tabel 6 ingevuld in Vergelijking 14 levert een orde grootte van de wrijvingskracht F_w . Deze is voor valhoogtes van 1,5 en 4,5 m, gelijk aan 1,1 respectievelijk 1,5 N. De wrijvingskracht is aanzienlijk in vergelijking tot de kracht uitgeoefend door de voorgespannen veer. Beide krachten werken de wapening van de schokbuis tegen. Het is aannemelijk dat ook bij zekere valhoogte boven de 1,0 m, geen wapening van de schokbuis optreedt.

In de theoretische benadering is een oneindig stijve ondergrond en een mortiergranaat met de stijfheid van staal aangenomen. In de praktijk is ook de ondergrond enigszins compressibel, en zal de geometrie van de mortiergranaat met een explosieve vulling, een invloed hebben op de daadwerkelijke versnelling die het huis in de schokbuis ondervindt. De beweging van de terugslagkap t.o.v. het huis bepaalt de eventuele vrijgave van de kogel en start van de wapeningscyclus.

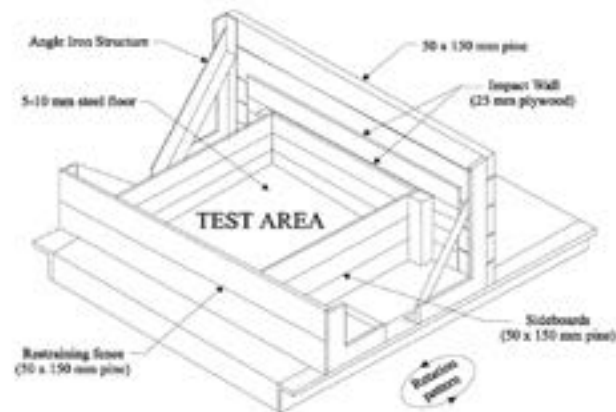
3.1.2 Loose cargo test

Deze test is uitgevoerd conform methode 406 in [AECTP 400, 2006]. De testmode bootst in het bijzonder de botsing van materieel met vloer en wanden van een laadruimte na.

Conform methode 406 is verplicht aandacht te geven aan ondermeer "the definition of the test severity including test time" en "the indication of the failure criteria". Bij de laatste wordt de wapening van de schokbuis verondersteld. T.a.v. test severity is er een annex bij de methode.

De initiële test severity in de methode is gebaseerd op een rotatiesnelheid van de tafel van 300 rpm ($f=5$ Hz), een amplitude A van een 0,5 inch, en een testduur van 20 minuten. Deze test severity is representatief voor 240 km loose cargo transport in een tactisch wielvoertuig over ruw terrein. De test wordt horizontaal en/of verticaal uitgevoerd volgens methode 406.

Het artikel is opgesloten in een configuratie als getoond in Figuur 18.



Figuur 18 Loose cargo test [AECTP 400, 2006].

Vanwege de ongedefinieerde bewegingen en vrije botsingen in de testconfiguratie, zijn de belastingen moeilijk te kwantificeren. De 5 Hz beweging is ruim beneden de 33,6 Hz eigenfrequentie van de veer-terugslagkap combinatie in de schokbuis.

Een opgelegde frequentie beneden de eigenfrequentie impliceert dat de geveerde massa's relatief snel kunnen meebewegen met een verandering in bewegingsnelheid en bewegingsrichting van het granaatlichaam wanneer dit uniform meebeweegt met de stalen grondplaat. De dynamische indrukking van de veer blijft dan beperkt.

Echter, het granaatlichaam zal continu glijden, rollen en botsen met de zijwanden. De ordegrootte O van de impactsnelheid bij een botsing is

$$\text{Vergelijking 15} \quad v = O(A * 0.0254 * 2\pi * f) = O(0.5 * 0.0254 * 2\pi * 5) = O(0.4 \frac{m}{s})$$

Een ordegrootte voor de botsnelheid van 0,4 m/s is substantieel, maar beneden de valsnelheid 3 m/s die wordt bereikt in de schietbuis. *Het is daarmee uitgesloten dat door botsen met de zijwanden de schokbuis kan wapenen.* Dit is in overeenstemming met de resultaten van de loose cargo testen door KC W&M.

3.1.3 Schokproef

De schokproef komt qua beschrijving overeen met de methode 403 half-sine pulse classical waveform shock in [AECTP 400, 2006], zie Figuur 8. In de methode wordt een initiële test severity aangeven waarbij de zwaarste belasting rail impact – standard car is voor de half-sine pulse met 26 g in verticale richting en 9 ms pulsduur, en 39 g in verticale en longitudinale richting en 18 ms. Volgens de bijlage bij methode 403 is de half-sine ook representatief voor de restrained cargo mission/field shock test. Als initiële test severity zijn lagere amplitudes en een groter aantal pulsen van elk 11 ms gegeven.

Table A-1 Classical Shock Initial Test Severity

Test Category	Axis	Waveform Shape	Amplitude, Gs	Duration, ms
Minimum Integrity	All	Terminal Peak Sawtooth	15	11
Transportation	All	Terminal Peak Sawtooth	30	18
Crash Shock	All	Terminal Peak Sawtooth	40	11
High Intensity Shock	All	Terminal Peak Sawtooth	100	6
Rail Impact- Standard Car	Vertical	Half-sine	26	9
	Longitudinal	Half-sine	39	18
Rail Impact- Cushioned Coupler Car	Vertical & Transverse	Half-sine	3.1	30
	Longitudinal	Half-sine	5.1	30

Table A-3 Restrained Cargo Mission/Field Shock Test Severity

Peak Amplitude, Gs	Total Number of Shocks
3.0	402
4.5	204
6.0	84
7.5	42
8.0	3

Figuur 19 Twee tabellen uit de Classical Waveform Shock [AECTP 400, 2006]. De bovenste tabel geeft test intensiteit (amplitude en duur) voor ondermeer de halve sinus schokpuls, en de onderste tabel de amplitude en aantal schokken van 11 ms duur.

Bij testen door KC W&M zijn schokbuizen getest met de punt naar boven en naar beneden, met als zwaarste conditie een maximale versnelling van 50 g, een pulsduur van 5 ms. Er is geen wapening van de schokbuis waargenomen. Deze waarneming is in lijn met de theoretische analyse in paragraaf 2.4.3 en Figuur 10, de aangeboden versnelling en pulsduur zijn niet strikt gelijk aan – wel vergelijkbaar met - de AECTP methode 403, en zijn beneden de berekende curve die nodig is voor wapening van de schokbuis.

3.1.4 *Trilproef met sinus-sweep*

Een sinus sweep is uitgevoerd in het bereik 3-100 Hz met een amplitude van 1 en van 2 g, met een sweep rate van 1 octaaf/minuut. Er is geen wapening van de schokbuis waargenomen.

Deze waarneming is in lijn met de theoretische analyse, gegeven de lage waarde van de trillingsamplitude in de trilproef met sinus-sweep in vergelijking tot de benodigde versnelling voor wapening onder constante versnelling en in de halve sinus schokpuls.

3.1.5 *Trilproef tactical wheeled vehicle - all terrain*

Een trilproef conform AECTP 400 methode 401 is representatief voor de trillingen ter plaatse van het "cargo bed" tijdens transport van een tactisch wielvoertuig over 500 mijl afstand door terrein typisch voor militaire operaties. Trillingsspectra zijn gebaseerd op meerdere trillingssensoren en voertuigen met een laadcapaciteit van 1,5 tot 12 ton. De $G_{\text{rms,versnelling}}$ is conform deze methode gelijk aan 3,99 g in de verticale richting, 1,29 g in de transversale richting en 2,73 g in de longitudinale richting.

Er is in de trilttest geen wapening van de schokbuis waargenomen.

Deze waarneming is in lijn met de theoretische analyse, gegeven de lage waarde van de G_{rms} in vergelijking tot de benodigde versnelling voor wapening onder constante versnelling en in de halve sinus schokpuls.

4 Conclusies

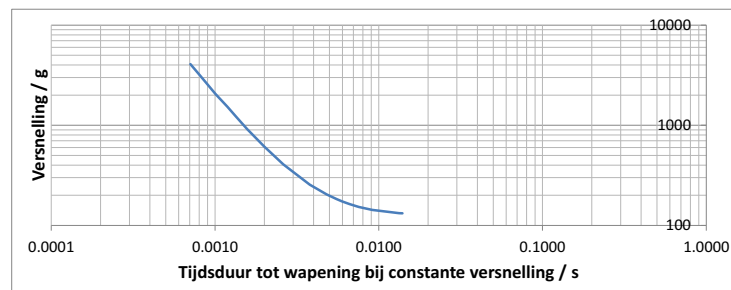
De theoretische analyse van de wapening van de schokbuis is uitgevoerd op basis van een dynamische indrukking van de veer tussen terugslagkap en huis van de schokbuis M6-N. De veerconstante is een experimenteel bepaalde waarde. De terugslagkap wordt geforceerd een zigzag beweging te volgen, en ondervindt naast de veerdruk ook wrijving door de kracht die wordt uitgeoefend door het directe contact tussen de terugslagkap en de pin op het huis. De wrijvingskracht wordt in de theoretische analyse niet meegenomen. Het effect hiervan is dat in de theoretische benadering eerder wapening van de schokbuis wordt berekend dan dat deze in realiteit zal optreden.

De theoretische analyse heeft zich gericht op:

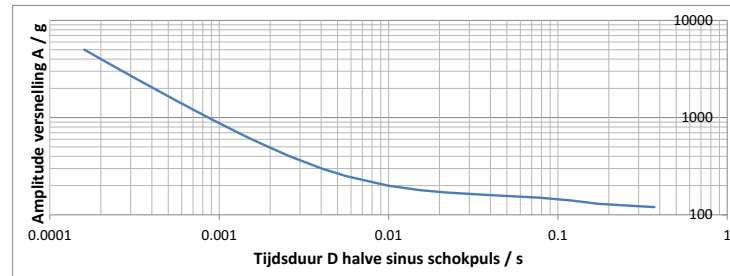
- het wapenen van de schokbuis door een *verticale val* van de mortiergranaat;
- het wapenen van de schokbuis door een *voorwaartse versnelling*;
- de benodigde combinaties van tijdsduur en versnelling van een *schokpuls* voor wapening van de schokbuis.

Uit deze analyse wordt geconcludeerd:

- Een vertraging hoger dan 154 g is nodig voor het wapenen van de schokbuis bij een *verticale val* van de mortiergranaat onder de aanname dat de mortiergranaat instantaan stilstaat. Deze vertraging wordt theoretisch gerealiseerd bij een valhoogte groter dan 1,25 m;
- Een minimale versnelling van 132 g is nodig gedurende 14 ms voor wapening van de schokbuis onder invloed van een *voorwaartse versnelling* van de mortiergranaat. Bij hogere versnellingen neemt de benodigde tijdsduur af;



- De benodigde combinaties van tijdsduur en versnelling in een *schokpuls* zijn significant, waarbij zich 1) een minimum versnelling aftekent bij lange pulsduur en 2) een constante waarde van het product van pulsduur en versnelling bij korte pulsduur;



- In Mali zijn significant hogere temperaturen dan 20 °C aan de orde. De invloed van een temperatuurstijging tot 70 °C op de veerconstante, en daarmee de wapening van de buis, is te verwaarlozen.

Toegepast op normaal gebruik en functioneren van de schokbuis kan worden geconcludeerd dat:

- De voorspanning van de veer in de schokbuis is zo groot dat de veer onder invloed van enkel de zwaartekracht niet kan worden ingedrukt, ongeacht de oriëntatie van de mortiergranaat;
- Het wapenen van de schokbuis door een verticale val van de mortiergranaat in de schietbuis is uitgesloten. De daarbij optredende vertraging die de terugslagkap ondervindt is slechts 110 – 125 g gedurende 5 ms. De vereiste vertraging voor wapening van de schokbuis bij een val van zekere hoogte vereist een minimale vertraging van 154 g.
- Het vrijkomen van kogel (17) door de voorwaartse versnelling bij het afvuren van de mortiergranaat bij lading 0 of lading 1 is afgerond binnen 1 à 2 cm vanaf de bodem van de schietbuis. De daarbij optredende versnellingen zijn 385 g gedurende 2,7 ms voor lading 0 en 1150 g gedurende 1,4 ms voor lading 1. Het in lijn plaatsen van de sluiters en daadwerkelijk wapenen van de schokbuis vangt pas aan nadat de mortiergranaat geen significante versnelling meer ondervindt, bij of na het verlaten van de schietbuis.

In de door KC W&M uitgevoerde mechanische testen (valproef, loose cargo test, schokproef, sinus-sweep trilproef en trilproef tactical wheeled vehicle-all terrain) is geen wapening van de schokbuis waargenomen. Voor al deze proeven, met uitzondering van de valproef, is dit conform de verwachting op basis van de theoretische analyse.

Het is aannemelijk dat het verschil bij de valproeven tussen de theoretische benadering en de experimenten wordt veroorzaakt door het niet meenemen van wrijvingskrachten in het mechaniek van de schokbuis.

5 Referenties

- AECTP, 2006
AECTP, Edition 3, Mechanical environmental test, 2006.
- Endevco, 2009
Acceleration levels of dropped objects, Endevco,
https://www.endevco.com/news/archivednews/2009/2009_02/tp321.pdf.
- Engineering toolbox, 2017
http://www.engineeringtoolbox.com/modulus-rigidity-d_946.html.
- Esmeijer, 1987
Stijfheid van een eendimensionaal stelsel van lineaire veren, W.L. Esmeijer,
<http://alexandria.tue.nl/repository/freearticles/605837.pdf>.
- KCW&M, 2016
Projectrapport 60 mm mortier HE-80 CvO, KCW&M document nr 26240,
versie d.d. 12-12-2016.
- Keulegan, 1932
Temperature coefficient of the moduli of metals and alloys used as elastic
elements, G.H. Keulegan, M.R. Houseman, Bureau of Standards Journal of
Research Vol 10., 289-320, 1932,
http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/10/jresv10n3p289_A2b.pdf.
- Kroon, Bouma, van Ham, 2015
Inventarisatie van WOII vliegtuigbom ontstekers in NL bodem, E.J. Kroon,
N.H.A. van Ham, R.H.B. Bouma, TNO rapport TNO 2015 R10074.
- Rheinmetall, 1982
Handbook on Weaponry, Rheinmetall, 1982.
- Shibashis, 2011
Typical coefficient of friction values for common materials,
<http://blog.mechguru.com/machine-design/typical-coefficient-of-friction-values-for-common-materials/>.
- VS 9-847, 2016
Voorschrift Geschuts- en Mortiermunitie 20 mm – 84 mm (B), VS 9-847,
Ministerie van Defensie, Defensie Materieel Organisatie, verzamelband
bijgewerkt tot en met 05-07-2016.
- Vuursteenbulletin, 2013
Vuursteenbulletin 07V2013, Mortier 60 mm Hotchkiss Brandt type
commando, 13 december 2013.

6 Ondertekening

Rijswijk, 14-2-2017

TNO Technical Sciences

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'P. Hendriksen', enclosed within a light blue oval shape.

P. Hendriksen
Afdelingshoofd

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'P.A. Hooijmeijer', written in a cursive style.

P.A. Hooijmeijer
Projectleider

A Experimentele bepaling veerconstante

De veerconstante van veer (6) is experimenteel bepaald door gecontroleerd de veer in te drukken tussen huis en slagpin/begrenzer alsook tussen huis en terugslagkap. De drie onderdelen zijn als samenstel geplaatst op een balans (Sartorius met 6000 gram bereik en 1 gram nauwkeurige aflezing) onder een kolomboormachine met digitale uitlezing van de slag (met 0,005 mm nauwkeurige aflezing). De opstelling is weergegeven in Figuur A.1.



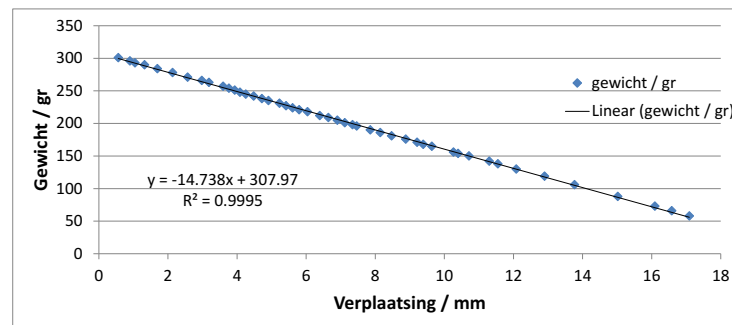
Figuur A.1 Kolomboormachine, balans en veer opgesloten tussen huis en slagpin/begrenzer.

De eerste meting is uitgevoerd aan het samenstel van huis, veer en slagpin/begrenzer, zie Figuur A.2. Het samenstel is op de balans geplaatst. De slagpin/begrenzer is tegen de aanslag in het huis gedrukt en de kolom is naar beneden geplaatst. Vervolgens is de kolom in stappen omhoog gedraaid, en bijbehorende waarden op de balans en op de uitlezing van de kolomboormachine genoteerd. De gewogen massa neemt af terwijl de afstand toeneemt.



Figuur A.2 Detail van opstelling met huis, veer en slagpin/begrenzer combinatie.

De meetwaarden staan uitgezet in Figuur A.3. Een lineaire lijn is gefit aan de meetwaarden. De helling van 14,738 kg/m staat gelijk aan een veerconstante van $14,738 * 9,81 = 144,58 \text{ N/m}$.



Figuur A.3 Gewicht gemeten op de balans, tegen de verplaatsing gemeten op de kolomboormachine voor de combinatie van huis, veer en slagpin/begrenzer.

Het werkingsprincipe van de balans is eveneens gebaseerd op een lineaire relatie tussen kracht en verplaatsing. De gemeten veerconstante moet worden gecorrigeerd worden voor de stijfheid van de balans indien deze niet onnodig stijf is. De specificaties van de balans op de site van de fabrikant geven geen uitsluitel. Een eenvoudige meting is uitgevoerd door 5989 gram (bijna het maximum gewicht) te plaatsen op de balans. De uitslag is slechts $\approx 0,5 \text{ mm}$.

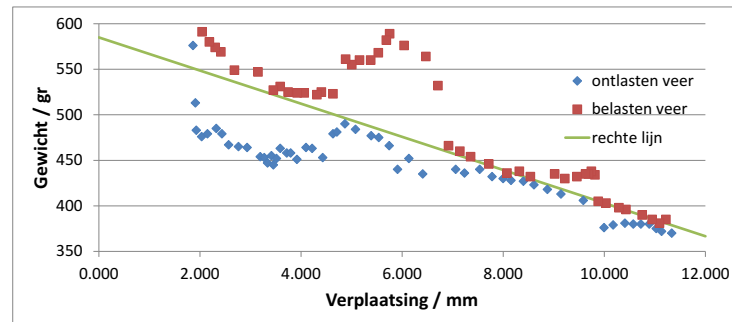
De veerconstante van veer (6) volgt uit [Esmeijer, 1987]

$$\text{Vergelijking 16} \quad \frac{1}{k_{\text{veer}}} = \frac{1}{k_{\text{meting}}} - \frac{1}{k_{\text{balans}}}$$

en is $144,7 \text{ N/m}$.

In de terugslagkap zit een zigzag gleuf, en op het huis een pin die er voor zorgt dat de terugslagkap bij het indrukken ook een roterende beweging ondergaat. De veerconstante is daarom ook in een tweede meting bepaald bij opsluiting tussen huis en terugslagkap. De meting is begonnen met een ingedrukte veer die is ontlast, zie de blauwe datapunten in Figuur A.4. Vervolgens is de meting gecontinueerd met het indrukken van de veer, zie de rode datapunten. Tijdens het ontlasten van de veer wordt de terugslagkap tijdens een deel van de meting tegen gehouden op de onderzijde van de zigzag gleuf, en tijdens het belasten van de veer op de bovenzijde van de zigzag gleuf. Een verticale sprong in de gemeten kracht komt overeen met een knik in de zigzag. De door de veer uitgeoefende kracht op de terugslagkap is zowel tijdens het belasten als ontlasten van de veer naar boven gericht. De wrijvingskracht werkt tegen de bewegingsrichting in; tijdens het belasten van de veer is de door wrijving uitgeoefende kracht naar boven gericht en tijdens het ontlasten van de veer naar beneden gericht. De hysteresis in de meting is daarmee verklaarbaar. De groene lijn is de lineaire trendlijn op de data punten die een lineair verband vertonen en verbindt de punten tijdens belasten en ontlasten van de veer, waarbij de obstructie door de pin op het huis geen rol speelt. De helling is $18,2 \text{ kg/m}$. De

daaruit berekende veerconstante van veer (6) is significant hoger, namelijk 178,8 N/m. Deze wrijvingsconstante is representatief voor de veer waarbij de terugslagkap wrijvingsloos roteert vanwege de pin op het huis. De hogere weerstand tegen indrukking van de veer die zichtbaar is in Figuur A.4 is moeilijk te modelleren en wordt hiermee genegeerd, maar wordt in de overwegingen in Hoofdstuk 2 benoemd.



Figuur A.4 Gewicht gemeten op de balans, tegen de verplaatsing gemeten op de kolomboormachine voor de combinatie huis, veer en terugslagkap.



Figuur A.5 Detail van opstelling met huis, veer en terugslagkap combinatie overeenkomend met een verplaatsing van 3,2 mm, 4,1 mm en 11,1 mm in Figuur A.4.

B Theoretische analyse van de gewapende mortiergranaat

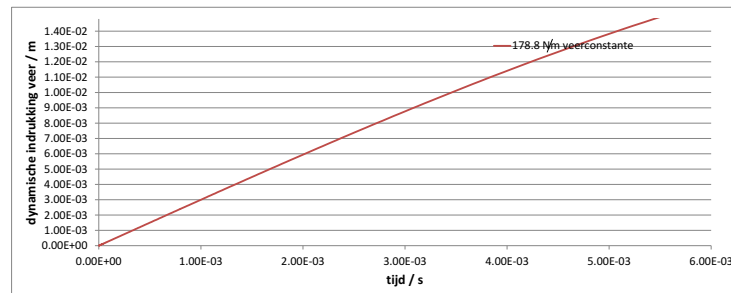
Een theoretische analyse van de gewapende mortiergranaat is uitgevoerd. Deze berekeningen zijn ter verificatie dat de detonatieketen in de mortiergranaat kan worden geactiveerd op basis van dezelfde theoretische analyse van de schokbuis, en aansluit op kennis van het functioneren van de mortiergranaat in de praktijk.

B.1 Gewapende mortiergranaat valt in de schietbuis

De bewegingsvergelijking voor de val van een gewapende mortiergranaat in de schietbuis is:

$$\text{Vergelijking B.1} \quad \frac{d^2z}{dt^2} = g - \frac{k_{\text{veer}}}{m_{\text{terugslagkap}} + m_{\text{slagpin/begrenzer}}} z$$

De wijzigingen t.o.v. het vallen van een niet-gewapende mortiergranaat zijn de hogere massa, een niet voorgespannen veer, en een benodigde indrukking van de veer van $40,4 - 26,6 = 14,8$ mm, voor inslag van de slagpin op het duplexslagpijpe. De indrukking van de veer na het vallen van de mortiergranaat in de schietbuis is weergegeven in Figuur B.1, waarbij de verticale as is gemaximeerd op 14,8 mm. De maximale indrukking van de veer bedraagt echter 20,9 mm. Uit de berekening volgt dat de benodigde indrukking van de veer voldoende is voor inslag van de slagpin op het duplex slagpijpe.



Figuur B.1 Dynamische indrukking van de veer bij de impact van een gewapende mortiergranaat op de bodem van de schietbuis.

B.2 Versnelling gewapende mortiergranaat bij lancering

De bewegingsvergelijkingen voor de versnelling van een gewapende mortiergranaat in de schietbuis, zie Figuur B.2, is:

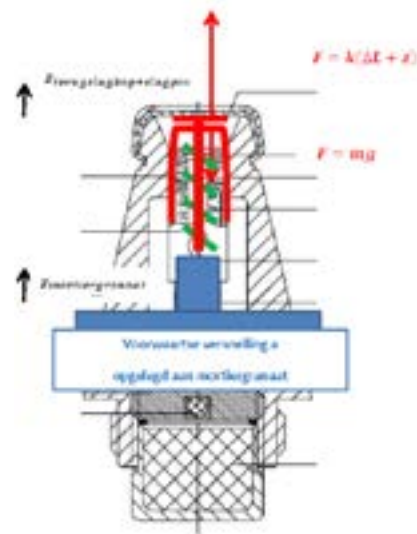
Vergelijking B.2

$$\frac{d^2 z_{\text{terugslagkap en slagpin}}}{dt^2} = -g + \frac{k_{\text{veer}}}{m_{\text{terugslagkap en slagpin}}} (-z_{\text{terugslagkap en slagpin}} + z_{\text{mortiergranaat}}),$$

$$\frac{d^2 z_{\text{mortiergranaat}}}{dt^2} = a + \frac{k_{\text{veer}}}{m_{\text{mortiergranaat}}} (+z_{\text{terugslagkap en slagpin}} - z_{\text{mortiergranaat}}),$$

en

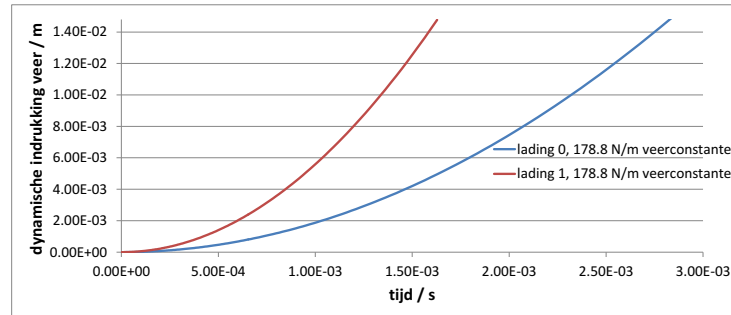
$$z = z_{\text{mortiergranaat}} - z_{\text{terugslagkap en slagpin}}$$



Figuur B.2 Schematische weergave voor bewegingsvergelijking bij voorwaartse versnelling opgelegd aan een gewapende mortiergranaat.

Het resultaat is weergegeven in Figuur B.3. De afgelegde weg van de mortiergranaat t.o.v. de bodem van de schietbuis is 15 mm voor zowel lading 0 als lading 1. Het moment waarop de slagpin daarbij het duplexslagpijpje raakt, wordt bereikt bij een versnelling van 385 g gedurende 2.8 ms (lading 0) of 1150 g gedurende 1,6 ms (lading 1).

In het geval een gewapende mortiergranaat in de schietbuis valt, de grondkardoes initieert, en de mortiergranaat lanceert, zal de mortiergranaat in de schietbuis detoneren op een korte afstand t.o.v. de bodem van de schietbuis.



Figuur B.3 Dynamische indrukking van de veer bij de versnelling van een gewapende mortiergranaat bij lading 0 en lading 1.

MICROSCOPISCH ONDERZOEK AFSLUITPLAAT M6-N SCHOKBUIS

In het scherfvest van een van de slachtoffers is een metalen onderdeel gevonden dat is geïdentificeerd als de afsluitplaat van de schokbuis. Deze afsluitplaat is een deel van het veiligheidsmechanisme dat in de schokbuis is ondergebracht.

In opdracht van de Onderzoeksraad heeft TNO de afsluitplaat microscopisch onderzocht. Dit onderzoek heeft informatie opgeleverd over de directe oorzaken van het ongeval, waaronder een aanwijzing dat de afsluitplaat, als onderdeel van het veiligheidsmechanisme van de schokbuis, niet heeft gefunctioneerd zoals bedoeld is.

Memorandum

Aan
Chris van der Schors (OVV)

Van
Ir. P.A. Hooijmeijer, Ir. E.J. Kroon, Dr. Ir. R.H.B. Bouma

Kopie aan
Peter Verhallen (OVV)

Onderwerp
Microscopisch onderzoek afsluitplaat M6-N schokbuis

Inleiding en doelstelling

In fase 1 van het onderzoek naar de technische oorzaak van het ongeval tijdens een mortieroefening in Mali op 6 juli 2016 is geconcludeerd¹ dat het ongeval is veroorzaakt door het prematuur functioneren van de bij het ongeval geladen 60 mm HE 80 mortiergranaat. Dit document beschrijft nader technisch onderzoek naar een component afkomstig van de op de betreffende mortiergranaat bevestigde M6-N schokbuis. De resultaten van dit onderzoek zijn sturend in het nader bepalen van de technische oorzaak van het ongeval.

In het scherfvest van een van de slachtoffers is het in Figuur 1 getoonde onderdeel gevonden. Aan de hand van een referentie schokbuis M6-N is vastgesteld dat dit onderdeel de afsluitplaat (13) is die zich in de schokbuis tussen de schokversterker (11) en de sluitring (15) bevindt, zie Figuur 2 en 3. Het centrale gat aan de onderzijde van dit onderdeel bevat normaalgesproken de overdrachtsslading (12); dit is een los cupje met een energetische lading. Twee off-center gaten zijn aangebracht aan de onderzijde van de afsluitplaat ten behoeve van assemblage van de schokbuis.

De in Figuur 1 getoonde component is vervormd tijdens het ongeval. Een van de twee off-center gaten in de onderzijde van de afsluitplaat (Figuur 1, links) is hierdoor moeilijk zichtbaar.



Figuur 1 Onderzijde (links) en bovenzijde (rechts) van de afsluitplaat afkomstig uit de M6-N schokbuis.

¹ E.J. Kroon, R.H.B. Bouma, P.A. Hooijmeijer, Ongeval mortieroefening Mali: Algemene technische onderzoeksvragen met betrekking tot de restanten, TNO 2016 R11512, 14-12-2016

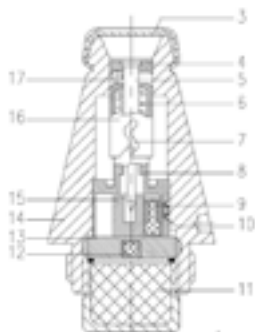
Lange Kleiweg 137
2288 GJ Rijswijk
Postbus 45
2280 AA Rijswijk
www.tno.nl

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

Datum
27 januari 2017

Onze referentie
17EM/0041

Doorkiesnummer
+31 88 866 23 95



- | | |
|-------------------|------------------------|
| 1 beschermkap | 10 subrocker |
| 2 veiligheidspeen | 11 schokveeranker |
| 3 montevlaan | 12 verbindingsklemming |
| 4 bevestigings | 13 afsluitplaat |
| 5 slagpijp | 14 busknaam |
| 6 veer | 15 veer |
| 7 zijzijg pijp | 16 leuningskap |
| 8 bus | 17 kop |
| 9 duplexslagpijp | 18 subback kappen |

Datum
27 januari 2017

Onze referentie
17EM/0041

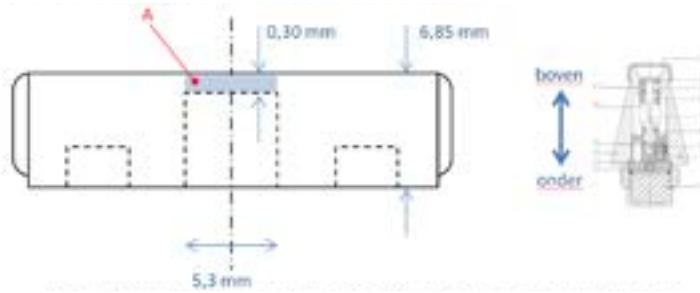
Blad
2/10

Figuur 2 Doorsnede M6-N schokbuis.



Figuur 3 Foto's van afsluitplaat uit een referentie schokbuis.

In Figuur 4 is een schematische dwarsdoorsnede getoond van de afsluitplaat. Vóór functioneren van de schokbuis is het centrale gat aan de bovenzijde gesloten. Bij normaal functioneren van de schokbuis wordt het bij A gearceerde materiaal weggeslagen door ontsteking van het duplex slagpijpe. In Figuur 1 is te zien dat het bij A aangeduide materiaal (zie Figuur 4) ontbreekt in het gevonden onderdeel en dat het centrale gat door de dikte van de afsluitplaat loopt.



Figuur 4 Schematische doorsnede van de afsluitplaat (niet op schaal, maten genomen van een referentie schokbuis).

Het is onbekend onder welk mechanisme het materiaal op positie A is weggeslagen. Aan de hand van microscopisch onderzoek is onderzocht of er aanwijzingen zijn in het gevonden onderdeel waaruit blijkt dat:

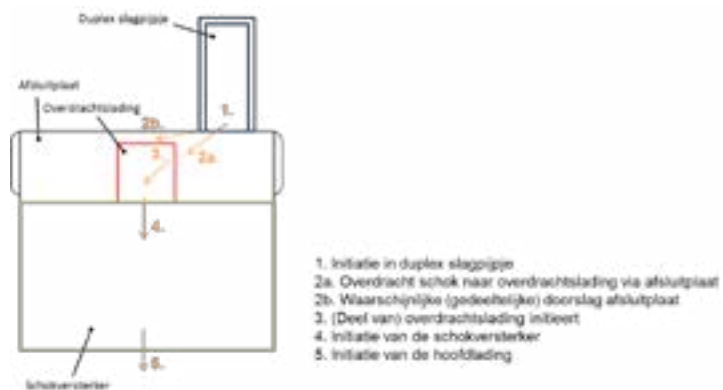
- a. Door functioneren van het duplex slagpijpje het materiaal is weggeslagen en vervolgens de overdrachtslading heeft gefunctioneerd (effect van duplex slagpijpje en schadebeeld op afsluitplaat is van boven naar onder gericht);
- b. Door functioneren van de overdrachtslading het materiaal is weggeslagen (afwijkende wijze van functioneren, effect van overdrachtslading en schadebeeld op afsluitplaat is van onder naar boven gericht).

Dit onderzoek is een verdere stap in het vaststellen van de mogelijke oorzaak van het ongeval tijdens de mortieroefening op 6 juli 2016 in Mali.

Werkingshypotheses

Er is een drietal werkingshypotheses opgesteld van hoe tijdens het ongeval dit deel van de schokbuis heeft gefunctioneerd. Deze werkingshypotheses zijn hieronder schematisch weergegeven. Werkhypotheses 1 en 3 sluiten aan bij een werking van de componenten van boven naar onder (variant a, zie boven). Werkhypothese 2 sluit aan bij een werking van de componenten van onder naar boven (variant b, zie boven). Aan de hand van het in dit document beschreven onderzoek wordt vastgesteld of een of meerdere werkingshypotheses mogelijk zijn, of kunnen worden uitgesloten.

Werkingshypothese 1 Niet gewapende schokbuis – initiatie vanuit duplex slagpijpje



Datum

27 januari 2017

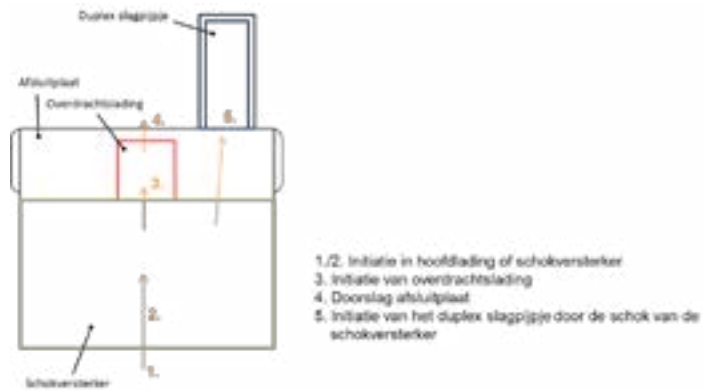
Onze referentie

17EM/0041

Blad

3/10

Werkingshypothese 2 Niet gewapende schokbuis – initiatie vanuit hoofdloading/
schokversterker

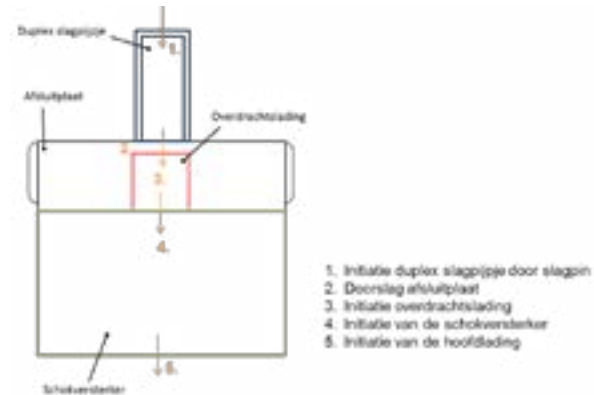


Datum
27 januari 2017

Onze referentie
17EM/0041

Blad
4/10

Werkingshypothese 3 Gewapende schokbuis – initiatie vanuit duplex slagpijpe



Aanpak

De afsluitplaat is met een diamantzaag doormidden gezaagd, zodat de binnenzijde van het centrale gat met een microscoop kon worden onderzocht. Van de twee helften van de afsluitplaat is vervolgens een aantal details gefotografeerd die aanwijzingen bevatten voor de wijze waarop het materiaal in het centrale gat is weggeslagen. De foto's zijn genomen met behulp van een optische microscoop met vergrotingen in het bereik van 5X tot 20X.

Voor een heldere beeldvorming wordt bij elke foto weergegeven wat de oriëntatie is van het beeld ten opzichte van de bovenzijde en onderzijde van de afsluitplaat.

Onderzoek aan centrale gat

Figuur 5 toont het centrale gat in een van de twee helften van de afsluitplaat. Aan de bovenzijde in het gat is een dunne rand te zien (A). Oorspronkelijk zat op deze positie materiaal van de afsluitplaat, maar door functioneren van het duplex slagpijpe dan wel de overdrachtsslading is dit weggeslagen. De globale vorm van deze dunne rand is licht gekromd, op punt B in Figuur 5 is vooral duidelijk te zien dat deze laag naar beneden is vervormd.

De binnenzijde van het centrale gat is deels afgedekt met een ander materiaal. Dit heeft een meer glimmend oppervlak. Dit materiaal loopt van net onder de rand (A) tot bijna de onderzijde van de afsluitplaat, zie de rode stippellijn. Dit materiaal is een restant van het cupje waarin de overdrachtsslading was opgesloten. Bij het ontsteken van de overdrachtsslading is dit cupje deels tegen de wand van het centrale gat geperst en achtergebleven. Andere delen zijn weggeslagen of gesmolten onder invloed van de reactie van de lading.

Datum

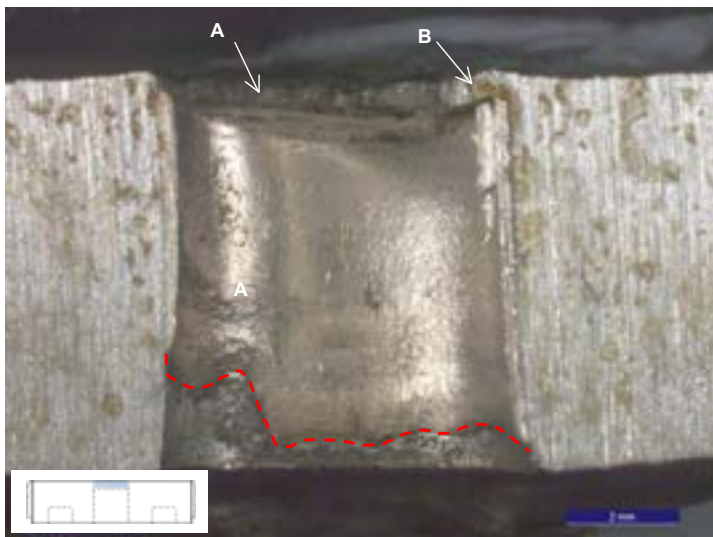
27 januari 2017

Onze referentie

17EM/0041

Blad

5/10



Figuur 5 Centrale gat afsluitplaat, helft 1.

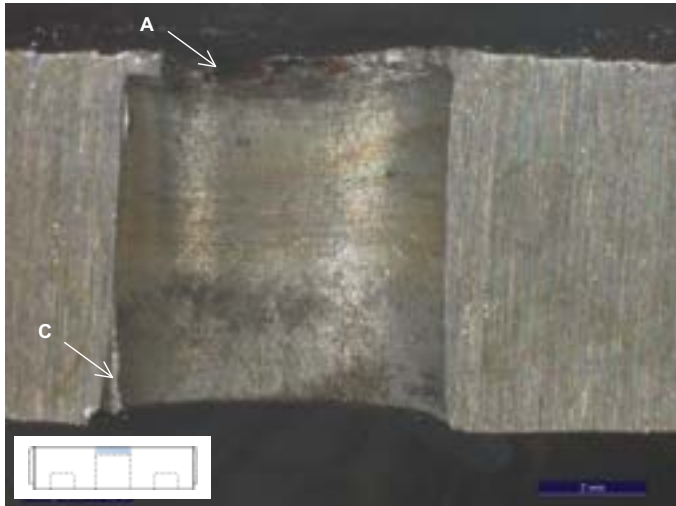
In Figuur 6 is het centrale gat getoond in de andere helft van de doorgezaagde afsluitplaat. Opnieuw is aan de bovenzijde van het gat dezelfde rand te zien waar het materiaal van de afsluitplaat is weggeslagen (A). Aan de binnenzijde van deze helft van het centrale gat zijn geen restanten van het cupje van de overdrachtsslading aangetroffen, met uitzondering van een klein stukje (C)².

² Er is geen indicatie dat enige waarde gehecht moet worden aan de asymmetrie van de aanwezigheid van het restant van het cupje. Mogelijk dat bij het doorzagen van de afsluitplaat de niet aanwezige helft van het cupje uit het centrale gat is gevallen.

Datum
27 januari 2017

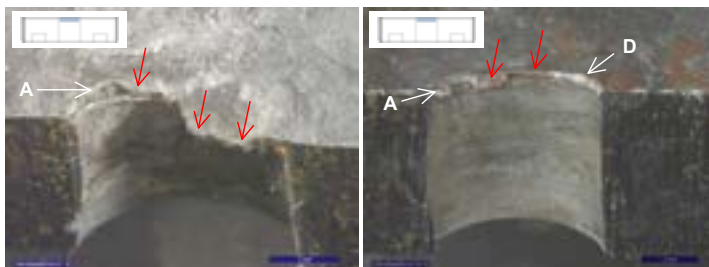
Onze referentie
17EM/0041

Blad
6/10



Figuur 6 Centrale gat afsluitplaat, helft 2.

Om beter naar de details in rand (A) te kijken zijn de delen van de afsluitplaat zoals in Figuren 5 en 6 ook gefotografeerd onder een iets andere invalshoek, zie Figuur 7. Beide foto's in Figuur 7 zijn genomen vanaf de bovenzijde van de afsluitplaat (dus van de zijde van het duplex slagpijpje).



Figuur 7 Afbeeldingen van de twee delen van de afsluitplaat na doorzagen, ter plaatse van het centrale gat.

In beide foto's is de rand (A) te zien. Langs de rand zijn een aantal details gemarkeerd met rode pijlen waar het materiaal naar onderen is gedeformeerd.

Deze details zijn indicaties dat het materiaal van de afsluitplaat onder invloed van een belasting vanaf de bovenzijde van de afsluitplaat is belast, gedeformeerd en bezwaken (NB: deze met rode pijlen gemarkeerde details zijn natuurlijk ook terug te vinden in Figuren 5 en 6).

De onderrand van het cupje van de overdrachtslading aan de binnenzijde van een van de helften van het centrale gat is ook in detail gefotografeerd. Zie Figuur 8 waar deze onderrand is getoond vanaf de onderzijde van de afsluitplaat.

Deze rand is zeer dun, wat aangeeft dat er insnoering heeft plaatsgevonden van dit materiaal. Deze insnoering treedt op bij een trekbelasting op metaal. De vorm van deze onderrand is dus indicatief voor een trekbelasting op de wand van het cupje van boven naar beneden. Een tegengestelde beweging van onder naar boven (initiatie van de overdrachtslading door de schokversterker of hoofdloading) had een vergelijkbare schade veroorzaakt welke dan aan de bovenzijde van het centrale gat was gevonden, nabij rand A (deze is niet aangetroffen), of had de in Figuur 8 getoonde rand van het cupje gestuikt (door de optredende drukbelasting) en daarmee juist een verdikking veroorzaakt.

Samenvattend kan worden gesteld dat er een aantal aanwijzingen is gevonden in het centrale gat dat wijst op een belasting op dit centrale deel van de afsluitplaat en overdrachtslading die van boven naar onderen is gericht. Deze belasting heeft vervorming en bezwijken van het deel van de afsluitplaat boven het centrale gat veroorzaakt en initiatie van de overdrachtslading (met een propagatie van de reactie in de overdrachtslading van boven naar beneden). Dit sluit variant b. en daarmee werkhypothese 2 uit (werking van de componenten van onder naar boven).

De meest waarschijnlijke bron voor deze belasting op de bovenzijde van de afsluitplaat is het duplex slagpijpje. In onderstaande paragraaf worden enkele schadebeelden aan de afsluitplaat besproken die mogelijk inzicht geven in de positie van het duplex slagpijpje op het moment van het ongeval, met andere woorden of de schokbuis gewapend was of niet (respectievelijk werkhypothese 3 en 1).

Datum

27 januari 2017

Onze referentie

17EM/0041

Blad

7/10



Datum
27 januari 2017

Onze referentie
17EM/0041

Blad
8/10

Figuur 8 Onderrand cupje overdrachtslading aan de binnenzijde van een van de helften van het centrale gat. Inzet: indicatie van de richting waarin de hoofdfoto is genomen.

Onderzoek mogelijke positie en initiatie duplex slagpijpje

Er is een opvallend detail gevonden in het schadebeeld aan de bovenzijde van de afsluitplaat. Dit detail bevindt zich aan de bovenzijde van de afsluitplaat op enige afstand van het centrale gat. Hier is een opvallende afdruk te zien, zie Figuur 9. Het is mogelijk dat deze afdruk veroorzaakt is door interactie met andere delen van de granaat of de schietbuis tijdens de verscherving, of door initiatie van het duplex slagpijpje. In het laatste geval zou het slagpijpje gepositioneerd moeten zijn op die positie waarbij de schokbuis nog ongewapend is. Functioneren van het slagpijpje moet dan door een andere oorzaak zijn veroorzaakt dan initiatie door de slagpin. Dit scenario zou overeenkomen met werkhypothese 1.

Aan een referentie schokbuis is gemeten dat de hartlijn van het slagpijpje in ongewapende toestand ongeveer 6,8 mm uit het centrum van de afsluitplaat is gepositioneerd. Door de vervorming van de teruggevonden afsluitplaat is niet precies vast te stellen wat de afstand is tot het centrale gat.

In Figuur 10 is een foto geplaatst waarbij de afsluiter uit een referentie schokbuis (met een grote uitsparing voor het duplexslagpijpje en de kleine uitsparing voor het borgen van de slagpin in de ongewapende stand) is geplaatst op de beschadigde afsluitplaat. Deze Figuur geeft een indicatie van de positie van de afdruk op de vervormde en beschadigde afsluitplaat ten opzichte van de positie van het duplex slagpijpje. Er is een klein verschil tussen deze twee.



Datum
27 januari 2017
Onze referentie
17EM/0041
Blad
9/10

Figuur 9 Detail aan bovenzijde afsluitplaat (links: zoals gevonden, rechts: na doorzagen).



Figuur 10 Afsluiter van een referentie schokbuis geplaatst op de vervormde afsluitplaat en een afsluitplaat uit een referentie schokbuis.

Normaliter moet een schokbuis zo worden ontworpen dat in ongewapende toestand doorslag³ van componenten met energetische materialen (zoals bijvoorbeeld doorslag bij premature initiatie van het duplex slagpijpje naar de overdrachtslading) niet mogelijk is. Er is echter geen informatie voorhanden die aantoont dat deze doorslag voor schokbuis M6-N in ongewapende toestand niet mogelijk is.

Datum

27 januari 2017

Onze referentie

17EM/0041

Blad

10/10

Conclusie

Na microscopisch onderzoek aan het centrale gat in de afsluitplaat wordt geconcludeerd dat het duplex slagpijpje de overdrachtslading heeft geïnitieerd en niet andersom. Lokale schade aan de bovenzijde van de afsluiter is mogelijk veroorzaakt door een detonatie van het slagpijpje in de ongewapende stand van de schokbuis (werkhypothese 1).

Aanbeveling

Er wordt aanbevolen om een aantal "doorslagtesten" uit te voeren om de functionaliteit van de afsluitplaat te verifiëren door het duplex slagpijpje extern te initiëren in een schokbuis in de veilige/ongewapende stand. In plaats van de schokversterker wordt een metalen dop (met schroefdraad) geplaatst om de schokbuis aan de onderzijde af te dichten.

³ De 'Explosive Train Interruption test' is een verplichte test genoemd in STANAG 4157 Fuzing systems: test requirements for the assessment of safety and suitability for service. In de bijbehorende AOP-20 Manual of tests for the safety qualification of fuzing systems, staat test D1 'Primary explosive component safety' beschreven.

KLIMATOLOGISCHE OMSTANDIGHEDEN EN POTENTIËLE INVLOEDEN

Uit de literatuur is bekend dat omgevingscondities van invloed kunnen zijn op de kwaliteit en de veilige werking van munitie. Zeker in Mali, waar munitie in warme omstandigheden wordt opgeslagen en gebruikt, is dit een aandachtspunt.

In opdracht van de Onderzoeksraad heeft TNO onderzocht of klimaatsomstandigheden de werking van de ongevalsgranaat kunnen hebben beïnvloed en zo ja, of er een oorzakelijk verband kan bestaan tussen deze invloed en het ontstaan van het ongeval.

TNO-rapport

TNO 2017 R10104

**Ongeval mortieroefening Mali: Klimatologische
omstandigheden en potentiële invloeden**

Technical Sciences

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

Datum	23 maart 2017
Auteur(s)	Dr. J.S. Henzing Ir. E. Kroon Ir. P.A. Hooijmeijer Dr. Ir. R.H.B. Bouma
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	35 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	Onderzoeksraad Voor Veiligheid
Projectnaam	Technisch Onderzoek Ongeval met 60 mm mortiergranaat
Projectnummer	060.26194/01.01

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2017 TNO

Samenvatting

Op 6 juli 2016 heeft een dodelijk ongeval plaatsgevonden in Kidal, Mali tijdens een oefening met een 60 mm High Explosive mortiergranaat (HE 80) met een M6-N (H) fuze (schokbuis). In opdracht van de Onderzoeksraad Voor Veiligheid (OVV) heeft TNO de klimatologische omstandigheden tijdens opslag en gebruik geanalyseerd om vast te stellen of deze hebben bijgedragen aan het voortijdig functioneren (detoneren) van de mortiergranaat.

Voor deze analyse zijn de TNO klimaat tool en analytische vergelijkingen gebruikt om de temperatuur van de mortiergranaat te berekenen in de opslag en tijdens gebruik. Aan de hand van de berekeningen is vastgesteld dat de 60 mm mortiergranaten, opgeslagen in de zeecontainer in Kidal, waarschijnlijk een temperatuur boven de 60 °C hebben bereikt. Deze opwarming is regelmatig opgetreden in de dagen direct voor en na 6 juli.

Ook is berekend dat buiten de opslag of tijdens gebruik, de stalen mantel en de TNT hoofdvlading door blootstelling aan zonlicht een temperatuur kunnen bereiken van 80 °C. Omdat de mortiergranaten met de blote hand werden geladen is het onwaarschijnlijk dat de granaten ook daadwerkelijk deze temperatuur hebben bereikt tijdens de oefening.

Door blootstelling aan zonlicht is het waarschijnlijk dat de temperatuur van de fuze tijdens gebruik tot boven de 50 °C is gestegen en mogelijk zelfs tot boven de 60 °C. Op basis van de analyse wordt geconcludeerd dat zowel tijdens opslag als bij gebruik de door de leverancier gespecificeerde maximaal toelaatbare fuze temperatuur van 50 °C is overschreden.

Het is onwaarschijnlijk dat door het opwarmen van de TNT hoofdvlading exudaat is doorgedrongen tot onder of boven de afsluitplaat¹ van de schokbuis. In het geval dat exudaat die locaties toch heeft bereikt, is het onwaarschijnlijk dat ontbranding ervan bij de schok van de lancering leidt tot een detonatie van de hoofdvlading.

Initiatie van de RDX boosterlading of de PETN overdrachtslading door de schok van de lancering is uiterst onwaarschijnlijk, ook bij verhoogde temperatuur.

Vocht kan doordringen tot aan de energetische lading in de primer via de lijmlaag van het membraam op de punt van de mortiergranaat, zeker als deze een of meerdere schokken heeft ondergaan.

Onder invloed van vocht kan er (galvanische) corrosie optreden wat leidt tot degradatie van het aluminium primer cupje en de koper/nikkel (Melchior) houder. Dit proces versnelt mogelijk bij verhoogde temperatuur. Tevens kan onder invloed van vocht waterstofazide ontstaan bij hydrolyse van loodzide. Het waterstofazide kan met het koper in de Melchior cup houder en in de messing sluiters reageren en het zeer gevoelige koperazide vormen. Vermoed wordt dat hydrolyse van loodzide wordt bevorderd door de destructie van het primer cupje onder invloed van een (galvanisch) corrosieproces.

¹ Bij voortijdige initiatie van de primerlading moet de afsluitplaat doorslag naar de hoofdvlading voorkomen in de ongewapende (veilige) stand van de fuze.

Mogelijk wordt corrosie van de Melchior houder versneld door de aanwezigheid van (antimoon)sulfide in de primer. Tevens kan onder verhoogde temperatuur tetrazeen sublimeren met mogelijke kristalvorming elders in de ontsteker.

Indien koperazide (en tetrazeen) is gevormd, dan is detonatie hiervan door de schok van de lancering waarschijnlijk, met initiatie van de primer tot gevolg. Doorslag naar de overdrachtslading door de afsluiter of langs een "brug" van koperazide (en tetrazeen) tussen de primer en de overdrachtslading in de veilige stand van de ontsteker, leidt tot initiatie van de booster en detonatie van de hoofdlading. De kans op doorslag is mogelijk temperatuurafhankelijk.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	5
2	Temperatuur tijdens opslag en gebruik	6
2.1	Opslag	6
2.2	Gebruik.....	13
3	Potentiële invloed van vocht en temperatuur	15
3.1	Hoofdlading en booster	16
3.2	Energetische composities in de fuze	19
4	Conclusies	28
5	Aanbevelingen	30
6	Referenties	31
7	Ondertekening	35

1 Inleiding

Op 6 juli 2016 heeft een dodelijk ongeval plaatsgevonden in Kidal, Mali tijdens een oefening met een 60 mm High Explosive (HE) mortiergranaat met M6-N (H) fuze (schokbuis). De Onderzoeksraad Voor Veiligheid (OVV) heeft in het kader van het technisch onderzoek TNO gevraagd om de klimatologische omstandigheden tijdens opslag en gebruik te analyseren.

Het doel van deze analyse is: vaststellen of de klimatologische omstandigheden hebben bijgedragen aan het voortijdig functioneren van de mortiergranaat tijdens de oefening. De analyse is gebaseerd op een vergelijking tussen de berekende temperatuur tijdens opslag/gebruik en de temperatuureisen voor transport/opslag en gebruik volgens Tabel 1.

Tabel 1 Temperatuurvoorschriften voor transport/opslag en gebruik.

Referentie	Toepassing	Temperatuurvoorschriften		
		Transport/ opslag [°C]	Gebruik [°C]	Klimaatgebieden [STANAG 2895] ²
Correspondentie, 2006	Compleet schot	-46 tot +63 [STANAG 4225]	-46 tot +63 [STANAG 4225]	A2, A3, C2
Levens Cyclus Beschrijving (LCB), 2006	Compleet schot	-46 tot +71	-46 tot +49 excl. zonnestraling, met zonnestraling vooralsnog +63	A1, A2, A3, C2
Arsenal, 2017 ³ [Bulcomersks, 2017]	M6-N fuze	-50 tot +50	-50 tot +50	---

Met behulp van de TNO klimaat tool is de temperatuur van de 60 mm HE80 mortiergranaat ingeschat tijdens:

- opslag van de munitie in de witte zeecontainer in Kidal, Mali
- gebruik en onder blootstelling aan zonlicht.

Deze beschouwing wordt geleverd in Hoofdstuk 2.

Hoofdstuk 3 beschrijft de potentiële invloed van vocht en temperatuur op het correct functioneren van de mortiergranaat. Hoofdstuk 4 en 5 leveren conclusies en aanbevelingen.

² A1 = very hot, A2 = hot dry, A3 = intermediate, C2 = cold [STANAG 2895].

³ Arsenal2000JSCo heeft mondeling meegedeeld dat er volgens Russische ontwerp principes doorgaans minimaal een 20% marge wordt toegepast op naar de klant afgegeven munitievoorschriften, zoals bijvoorbeeld maximale wapen(gas)druk tot maximale gebruikstemperatuur. Dit betekent dat de maximale gebruikstemperatuur voor de M6-N fuze ligt op 60°C. Desalniettemin, adviseert Arsenal2000JSCo haar klanten de gespecificeerde maximale gebruikstemperatuur na te leven [Bezoek Arsenal, 2017].

2 Temperatuur tijdens opslag en gebruik

Dit hoofdstuk levert een beschouwing over de ingeschatte temperaturen tijdens opslag en gebruik in paragraaf 2.1 en 2.2. De klimatologische data die hiervoor is gebruikt, is gegenereerd met de TNO klimaat tool. Op iedere willekeurige plaats op aarde zijn van uur-tot-uur de weersomstandigheden zoals temperatuur en vocht vastgesteld waarbij modelberekeningen met grond- en satellietmetingen zijn gecombineerd. De flexibele klimaat tool maakt van deze tijdseries direct interpreteerbare statische parameters, zoals bijvoorbeeld de kans op een overschrijding van een bepaalde temperatuurgrens in verschillende seizoenen.

2.1 Opslag

Materiaal dat in de zon staat, wordt warmer dan de lucht in de omgeving. In een auto in de zon wordt het al snel 20 graden warmer dan de buitenlucht temperatuur en in een kamer met een dakkapel is het aanzienlijk warmer dan in de andere kamers. De reden is dat de atmosfeer transparant is voor zonnestraling en dat materiaal het zonlicht (deels) absorbeert. De opwarming is niet ongelimiteerd omdat het materiaal warmte uitstraalt in de vorm van langgolvlige straling⁴. De uitgezonden energie is afhankelijk van het soort materiaal en de temperatuur van het materiaal. Naast de warmtestraling zorgen temperatuurverschillen tussen materiaal en omgevingslucht voor wervels en stromingen die energie afvoeren. Deze stromingen noemen we hier convectie. De opwarming van het materiaal gaat daarom door totdat inkomende energie en uitgaande energie in balans zijn. Als we geforceerde ventilatie door bijvoorbeeld wind of bewegen buiten beschouwing laten, dan luidt de vergelijking:

$$a(\text{zonnestraling})E_{\text{zon}} \downarrow + a(\text{infrarood})E_{\text{lucht}} \downarrow = E_{\text{materiaal}} \uparrow + E_{\text{convectie}} \uparrow \quad (1)$$

De binnenkomende energie, de linkerkant van vergelijking 1, bestaat uit twee termen. De eerste term geeft aan hoeveel zonne-energie wordt geabsorbeerd. De tweede term betreft de warmtestraling uit de omgeving. De rechterkant van de vergelijking geeft de energieverliestermen door warmte-uitstraling en convectieve afkoeling. De vier termen worden hieronder verder toegelicht.

Niet alle energie E die op een materiaal valt, wordt opgenomen. De factor a , is de fractie van opvallende elektromagnetische straling die wordt geabsorbeerd. De factor a wordt ook wel de absorptiecoëfficiënt genoemd. Absorptie van zonlicht is in letterlijke zin moeilijk te zien, daarom wordt ook vaak de wat intuïtievare reflectiecoëfficiënt gebruikt r gebruikt. De relatie tussen de twee is eenvoudig $a + r = 1$. Een aantal typische reflectiecoëfficiënten voor zonnestraling zijn: $r_{\text{asfalt}} = 0,15$; $r_{\text{beton}} = 0,3$; $r_{\text{witte verf}} = 0,58$; $r_{\text{aluminium}} = 0,71$; $r_{\text{donkergroene auto}} = 0,5$.

⁴ De golflengtes van deze langgolvlige straling liggen in het infrarode deel van het spectrum en kunnen we dus niet zien. Hoe warmer het materiaal is, hoe korter de golflengte van de straling. Voor gloeilampen en sterren (de zon!) is de golflengte van de uitgezonden straling zo kort dat het in het zichtbare deel van het elektromagnetische spectrum ligt. Deze straling noemen we licht.

De zeecontainer waarin de mortiergranaten lagen opgeslagen is wit van kleur, zie Figuur 1. Voor deze verf lijkt de volgende absorptiecoëfficiënt het meest van toepassing:

a (zonnestraling) = 0,42

Voor witte verf worden ook hogere reflectiefactoren gevonden. In de uiteindelijke berekeningen is daarom gevarieerd met de absorptiecoëfficiënt. De gekozen absorptiecoëfficiënt is geldig voor zichtbaar zonlicht.



Figuur 1 Munitieopslag in een zeecontainer in Kidal, Mali. De container is ingeklemd tussen twee andere zeecontainers [KMAR, 2016].

$E_{\text{zon}} \downarrow$ is de inkomende zonnestraling. Deze is opgebouwd uit direct zonlicht en diffuus licht uit alle richtingen. Aan de top van de atmosfeer komt ongeveer 1367 W/m^2 aan zonnestraling binnen. De hoeveelheid energie aan het oppervlak hangt af van hoe schuin de zon invalt en hoeveel absorptie en verstrooiing er in de atmosfeer plaatsvindt. Rond het middaguur valt in de zuidelijke subtropen de zon loodrecht op het oppervlak. Als we aannemen dat de atmosfeer redelijk vrij is van stof dan is een reële schatting voor de maximale hoeveelheid straling aan de grond:

$$E_{\text{zon}} \downarrow = E_{\text{direct}} \downarrow + E_{\text{diffuus}} \downarrow = 1120 + 112 = 1232 \text{ W/m}^2$$

In de berekeningen voor verschillende tijdstippen op de dag is rekening gehouden met de zonnestand. De variatie over de dag heeft een sinus-achtig verband. Als er meer stof in de atmosfeer hangt dan wordt de zon wat waziger en $E_{\text{direct}} \downarrow$ neemt af. Het zonlicht wordt echter nauwelijks geabsorbeerd maar als diffuus zonlicht verstrooid. Dit is goed te zien aan de lucht die niet meer blauw kleurt maar witgeel. Hoe groter de stofdeeltjes hoe meer het licht voorwaarts verstrooid wordt. Voor opwaaiend mineraal stof is de hoeveelheid straling die het oppervlak bereikt daarom een minder sterke functie van de hoeveelheid fijnstof in de lucht als men wellicht in eerste instantie denkt.

In de twee term van vergelijking (1), is $E_{\text{lucht}} \downarrow$ de warmte-uitstraling van de lucht. Zoals ieder materiaal warmte uitstraalt doet de atmosfeer dat ook. De langgolvlige straling die uit een wolk komt, past bij de temperatuur van die wolk. Voor onbewolkte luchten is de ontvangen energie in de vorm van langgolvlige straling vaak wat lager. De straling hoort veelal bij de temperatuur die men vindt op een hoogte van 2-6 kilometer. Uit metingen blijkt dat in de subtropen bij onbewolkte maar sterk vervuilde lucht maximaal 400 W/m^2 aan langgolvlige straling wordt ontvangen. Voor Kidal is de volgende waarde reëel voor juli 2016:

$$E_{\text{lucht}} \downarrow = 350 \text{ W/m}^2$$

Zoals gezegd, bestaat ook de uitgaande energie, d.w.z. de rechterkant van vergelijking 1, uit twee termen.

De eerste term $E_{\text{materiaal}}$ is de afkoeling ten gevolge van warmte uitstraling. Voor de langgolvlige stralingsafkoeling maken we gebruik van de wet van Stefan-Boltzmann:

$E = e\sigma T^4$, waarbij e de emissiviteit van het materiaal, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ de Stefan Boltzmann constante en T de temperatuur van het materiaal. Kirchhoff heeft aangetoond dat materiaal dat veel elektromagnetische straling absorbeert ook veel straling emitteert in het zelfde golflengtegebied; de emissiviteit is gelijk aan de absorptiecoëfficiënt, $e = a$. Zonnestraling en de warmtestraling van objecten bestrijken een verschillend deel van het spectrum. De a (zonnestraling) is dus niet gelijk aan de emissiviteit die we hier nodig hebben. De zeecontainer is van staal.

De uitgezonden straling komt echter van de buitenste paar micrometers van het oppervlakte en dat is in dit geval witte verf. Witte verf is te koop in verschillende samenstellingen en de emissiviteit varieert bij kamertemperatuur veelal tussen 0.82 en 0.95. De hoge waarde geldt voor een verf die makkelijk warmte kwijt raakt door uitstraling. Witte verf absorbeert dus relatief weinig zonlicht immers a (zonnestraling) = 0.42 maar straalt relatief veel langgolvlige straling a (infrarood) = 0.9 uit. Voor sommige materialen is de emissiviteit een sterke functie van de temperatuur. Voor witte verven is de temperatuurafhankelijkheid in het temperatuur bereik tot 100°C klein ten opzichte van de variaties tussen witte verven onderling. Hier laten we de temperatuurafhankelijkheid daarom buiten beschouwing.

Opmerking: voor glanzende metalen geldt dat bij de kleine absorptiecoëfficiënt in het zichtbare deel van het spectrum ook een kleine absorptiecoëfficiënt in het infrarode deel van het spectrum hoort. Een glanzend metaaloppervlak absorbeert dus weinig zonlicht, maar het licht dat het absorbeert is moeilijk kwijt te raken door uitstraling. Glanzende metaal oppervlakken worden daarom extra heet in de zon.

De laatste term in de energiebalansvergelijking (1) is de convectieve afkoeling. $E_{\text{convectie}}$. De term voor warmte verlies ten gevolge van lucht bewegingen door warmteverschillen tussen materiaal en lucht is de minst voor de hand liggende term. Het energieverlies kan worden berekend als het product van een factor h en het temperatuurverschil tussen het zon-beschenen materiaal en de buitenlucht temperatuur, d.w.z. $E_{\text{convectie}} = h\Delta T$. De factor h wordt in het Engels gerefereerd als "convective heat transfer coefficient". In het Nederlands worden verschillende vertalingen gebruikt; gangbaar is de term warmteoverdrachtscoëfficiënt.

De warmteoverdrachtscoëfficiënt hangt op een complexe manier samen met de geometrie van het voorwerp en met het temperatuurverschil tussen voorwerp en omgevingslucht. Bij kleine temperatuurverschillen zal er geen stroming worden geïnduceerd en wordt de warmte alleen door thermische diffusie afgevoerd. In dit laatste geval is $h=0$ en dus $E_{\text{convectie}} = 0$. Voor dit hypothetische geval zal de temperatuurstijging maximaal zijn. De temperatuurstijging van de metalen buitenkant van het dak wordt door geleiding effectief doorgegeven aan de binnenzijde van het dak (plafond) en de aangrenzende lucht in de container neemt snel dezelfde temperatuur aan omdat de warmtecapaciteit van de lucht in de container laag is.

Voor witte verven heeft de emissiviteit ook een behoorlijke range. Voor de laagste en hoogste emissiviteiten die nog realistisch zijn, zijn ook twee berekeningen

uitgevoerd. In Tabel 2 is te zien dat het berekende temperatuurverschil met de buitenlucht 5 graden hoger of 3 graden lager zou zijn als de emissiviteit respectievelijk lager (0.82) of juist hoger (0.95) ingeschat zou worden. De berekende temperatuurop warming van de container is dus minder gevoelig voor de aanname voor emissiviteit dan voor de aanname van de absorptie van zonlicht.

In Tabel 2 staan de berekende luchttemperaturen voor een aantal verschillende aannames voor de gebruikte verf, de berekeningen zijn geldig voor de hoogste zonnestand. Voor de verf op de container nemen we aan dat een absorptie coëfficiënt van 0.42 het meest waarschijnlijk is. Er zijn echter veel 'gebroken witte' verven met een lagere absorptiecoëfficiënt bijvoorbeeld 0.35. De beste verf voor deze toepassing zou een absorptiecoëfficiënt van 0.25 of lager hebben. Voor een reële buitentemperatuur vinden we, als we de convectieve afkoeling negeren, dat het in de container 41 °C warmer is dan in de buitenlucht. Het kiezen van een wittere verf (lage absorptiecoëfficiënt voor zichtbaar licht) zou zeer effectief zijn om de temperatuurotoename in de container te voorkomen. Zolang convectieve afkoeling ontbreekt ($h=0$) vinden we voor wittere verf dat het in de container maar 16 graden warmer zou zijn dan de omgevingstemperatuur. Het meest effectief blijft natuurlijk het creëren van een schaduw waaronder goed geventileerd wordt. In dit laatste geval zou de temperatuur marginaal boven de omgevingstemperatuur komen.

Voor witte verven heeft de emissiviteit ook een behoorlijke range. Voor de laagste en hoogste emissiviteiten die nog realistisch zijn, zijn ook twee berekeningen uitgevoerd. In Tabel 2 is te zien dat het berekende temperatuurverschil met de buitenlucht 5 graden hoger of 3 graden lager zou zijn als de emissiviteit respectievelijk lager (0.82) of juist hoger (0.95) ingeschat zou worden. De berekende temperatuurop warming van de container is dus minder gevoelig voor de aanname voor emissiviteit dan voor de aanname van de absorptie van zonlicht.

Tabel 2 Berekende luchttemperaturen voor een aantal verschillende aannames voor de gebruikte verf, de berekeningen zijn geldig voor de hoogste zonnestand.

Temperatuurverschil tussen buitenlucht (schaduw) en de lucht in een wit geschilderde zeecontainer. Berekeningen gelden voor het middaguur met een zonne-instraling van 1232 W/m ² en een atmosferische warmtestraling van 350 W/m ² . Meest representatief geachte waarden zijn vet gedrukt.			
Absorptiecoëfficiënt <i>a</i> (zonnestraling)	Emissiviteit <i>e</i> (infrarood)	Temperatuurverschil [°C]	
		<i>h</i> = 0	<i>h</i> berekend
0.25	0.9	16	10
0.35	0.9	31	20
0.42	0.9	41	26
0.42	0.82	46	28
0.42	0.95	38	24

Voor de zeecontainer zijn ook berekeningen uitgevoerd met een warmteoverdrachtscoëfficiënt die is berekend op basis van gepubliceerde wetenschappelijke experimenten. Vele studies beschouwen cilinders en vreemde geometrieën of vlakke horizontale hete voorwerpen maar dan met te kleine afmetingen voor deze studie [Corcione, 2007]. Voor deze studie maken we gebruik van een artikel van [Lloyd, J.R. and W.R. Moran, 1974]. In dit artikel wordt voor experimentele data een relatie afgeleid voor de warmteoverdrachtscoëfficiënt.

Het artikel is bijzonder nuttig omdat het grote voorwerpen behandelt. Voor deze studie adopteren we de relatie voor een rechthoekige plaat:

$$Nu = 0.15Ra^{1/6} \quad (2)$$

Waarbij $Nu=hW/k$ het dimensieloze Nusseltgetal is, h de warmteoverdrachtscoëfficiënt die we zoeken, W de breedte van de plaat (dak van container) en k de thermische geleidingscoëfficiënt van lucht.

Ra is het Rayleigh nummer dat afhangt van het temperatuurverschil tussen de plaat en de omgevingslucht. In onze berekeningen:

$$Ra = g\beta(T_{dak} - T_{buitenlucht})W^3/\nu\alpha \quad (3)$$

met g de zwaartekracht versnelling, β de thermische expansiecoëfficiënt van lucht, ν de kinematische viscositeit van lucht en α de thermische diffusiviteit van lucht.

In deze studie gaan we uit van een windstille situatie. In dat geval hebben we te maken met natuurlijke (vrije) convectie. Vrije convectie kan zowel laminair als turbulent van vorm zijn. De transitie vindt ongeveer plaats bij een Rayleigh number rond de 10^7 . De zeecontainer valt door zijn afmeting ruim in het regime van natuurlijke turbulente convectie, vergelijking (2) is daarop van toepassing.

Door de geabsorbeerde zonnestraling wordt het dak warmer en zal de warmte uitstraling toenemen. Na een tijdje wordt het dak zo warm dat er spontaan convectie begint op te treden. De evenwichtstemperatuur waarin we geïnteresseerd zijn kan niet analytisch worden bepaald maar moet numeriek worden gevonden. De resultaten van de numerieke modelering, gebruik makend van vergelijkingen (2) en (3), zijn in Voor witte verven heeft de emissiviteit ook een behoorlijke range. Voor de laagste en hoogste emissiviteiten die nog realistisch zijn, zijn ook twee berekeningen uitgevoerd. In Tabel 2 is te zien dat het berekende temperatuurverschil met de buitenlucht 5 graden hoger of 3 graden lager zou zijn als de emissiviteit respectievelijk lager (0.82) of juist hoger (0.95) ingeschat zou worden. De berekende temperatuurop warming van de container is dus minder gevoelig voor de aanname voor emissiviteit dan voor de aanname van de absorptie van zonlicht.

Tabel 2 opgenomen. De spontane convectieve afkoeling zorgt ervoor dat het temperatuurverschil tussen de lucht in de container en de buitenlucht met ongeveer 15 °C wordt getemperd tot 26 °C.

In de week van 6 juli 2016 was het dagelijks rond de 43 °C, maar op 6 juli zelf was het 40 °C in Kidal. Op basis van de berekeningen concluderen we daarom dat het in de opslag op 6 juli rond de 66 °C is geworden. Ook op de dagen direct voor en na 6 juli is de gespecificeerde maximale temperatuur voor transport/opslag en gebruik van 63 °C overschreden als het windstil was rond het middaguur.

Over de wind op de dagen voor en op 6 juli is bekend dat het zeer rustig was rondom Kidal. De lokale wind over het dak van de container is niet bekend, terwijl deze juist zeer belangrijk is. Wind voert zeer effectief warmte af. Ter illustratie, bij een vrij matige wind, 3 op de schaal van Beaufort, verdubbelt de warmteoverdrachtscoëfficiënt en zou de 26 °C hogere binnentemperatuur verlaagd worden naar 16°C. Een matige wind van 4 m/s zou de temperatuur in de opslag dus kunnen verlagen tot 56 – 59 °C in de week van 6 juli. Zoals gezegd, er was

weinig wind, het lijkt daarom waarschijnlijk dat de gespecificeerde temperatuur voor opslag en transport in de container is overschreden.

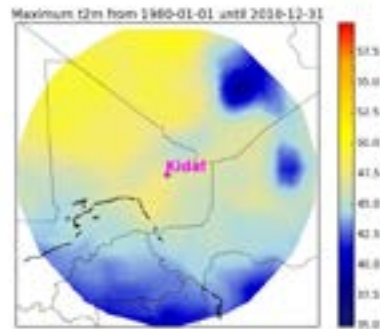
Eind juni, begin juli 2016 is het warmste deel van het jaar in Kidal, zoals blijkt uit Figuur 2.



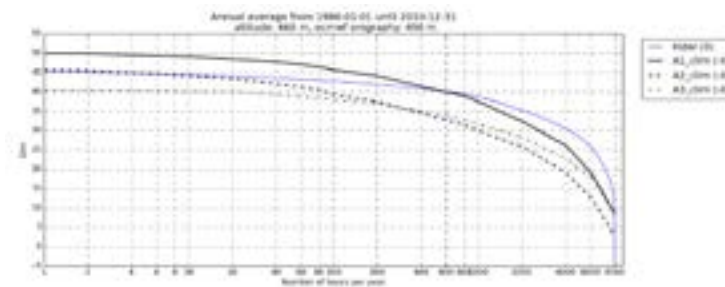
Figuur 2 Maximum (groen) en minimum (blauw) temperatuur waargenomen per week in 2016 (52 punten verbonden met lijnen).

In de 30-jaar periode van 1980 tot 2010 was het maar op ongeveer 10 dagen warmer dan de eerste week van juli 2016, bovendien was het tijdens die recorddagen maar weinig warmer, zie Figuur 3 en Figuur 4⁵. Op dit soort recorddagen zal de temperatuur in de opslag waarschijnlijk hoger worden dan 63 °C. Het 26°C temperatuurverschil wordt alleen bereikt bij maximale zoninstraling. We kunnen er dus niet zomaar vanuit gaan dat alle uren met een temperatuur boven de 37°C ook tot een overschrijding van de grenswaarde leidt; volgens Figuur 4 zou dat in ongeveer 1000 uur per jaar dus ruim 10% van de tijd plaatsvinden. In werkelijkheid waait het regelmatig wel, maar bovendien is het ook later op de dag als de zon alweer gezakt is ook dikwijls nog boven de 37°C.

⁵ Het AECTP klimaat voor Kidal is A1. Voor dit klimaat kan de temperatuur in de zeecontainer oplopen tot rond de 70 °C. De maximum temperatuur van 50 °C die bij A1 hoort lijkt echter niet bereikt te worden in Kidal. Een A2 klimaat lijkt beter te passen.



Figuur 3 Klimatologische (1980-2010) maximum temperatuur in de regio rond Kidal.



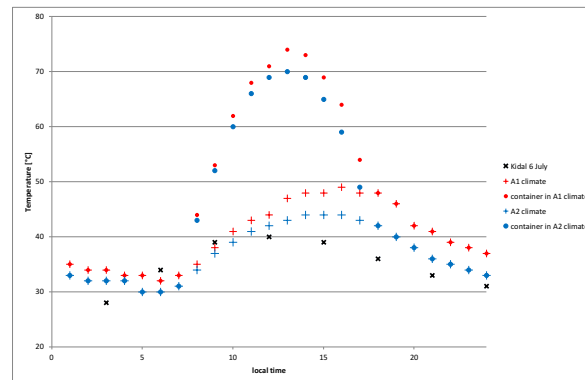
Figuur 4 Het aantal uur per jaar dat de temperatuur in de periode 1980-2010 een bepaald maximum overschreed volgens de TNO klimaat tool (blauw) en volgens verschillende AECTP 200 klimaten. Bijvoorbeeld: in Kidal is het 2000 uur per jaar warmer dan 35 °C en maar 4 uur was het warmer dan 45 °C.

De lucht in de zeecontainer volgt bijna instantaan de bereikte daktemperatuur. Direct onder het dak (of van binnen uit gezien het plafond) wordt de maximum temperatuur bereikt zoals berekend. Bij het ontbreken van circulatie in de container, zal het onderin de container waar de materialen liggen opgeslagen beduidend koeler zijn dan bovenin. De voorkant van de container (ingang) ontvangt echter ook zonlicht. De hoeveelheid hangt af van de oriëntatie ten opzichte van de zon. Deze hete voorkant zal net als een verwarmingselement een circulatie teweegbrengen zodat de warmte over de ruimte zal zijn verdeeld. Bij de allerhoogste zonnestand valt er geen straling op de voorkant. Ook wanneer de zon de containers vanaf de zijkant beschijnt, waarbij de middelste container dus in de schaduw ligt, zal er geen zon op de zijkanten vallen. De binnencirculatie zal onderdrukt worden. Het is dus mogelijk dat nabij de bodem van de zeecontainer, de maximum temperatuur niet wordt bereikt. Enige vorm van circulatie lijkt echter waarschijnlijk zodat het aannemelijk is dat de opgestapelde munitiekisten (zie Figuur 1) in de dagen rondom 6 juli zijn blootgesteld aan een temperatuur van boven de 63°C.

De mortiergranaten en de explosieve stoffen in de kern van de granaten warmen niet even snel op als de temperatuur van de lucht in de zeecontainer. De houten bekisting heeft een dempende werking op dagelijkse temperatuurgang van de opgeslagen goederen. De mortiergranaten zouden met hun warmtecapaciteit en geleidingscoëfficiënten binnen 20 minuten de omgevingstemperatuur overnemen als ze onbeschermd lagen opgesteld; de kerntemperatuur heeft wellicht nog langer nodig. De kokers en zeker de bekistingen zorgen ervoor dat de tijd die nodig is om de temperatuur te volgen veel groter is dan deze 20 minuten en mogelijk zelfs uren bedraagt. Het is dus van belang om het temperatuursverloop over de dag te beschouwen.

In Figuur 5 zijn enkele verwachtingswaarden van het dagelijkse temperatuursverloop gegeven. De temperatuur op 6 juli 2016 is weergegeven met tijdstappen van drie uur. De hoogst bereikte temperatuur was 40°C. In Figuur 5 zijn ook de AECTP klimaten A1 en A2 weergegeven. Volgens de Leaflet series heeft Kidal een A1 klimaat. Het A2 klimaat past echter veel beter zeker voor de maximale temperaturen. Voor ieder uur van de dag is het temperatuurverschil tussen container en buitenlucht berekend en opgeteld bij de dagelijkse gang van de A1 en A2 klimaten.

Aan het begin en einde van de dag is de zoninstraling te zwak (of afwezig) om de temperatuur in de container te verhogen. Naar het middaguur neemt het verschil toe tot een maximum van 26°C. De periode waarbinnen de gespecificeerde maximale temperatuur voor transport/opslag en gebruik van 63 °C wordt bereikt beslaat ongeveer 5 uur (van 11:00 tot 16:00) in zowel A1 als A2 klimaat. Binnen deze periode geldt een piektemperatuur van 70 °C voor A2 klimaat en 73 °C voor A1 klimaat. De periode is waarschijnlijk voldoende lang om de mortiergranaten op te warmen tot boven de 60 °C. Omdat het A2 klimaat in Figuur 5 representatief is voor de dagen direct voor en na 6 juli, is opwarming tot boven de 60 °C regelmatig opgetreden.



Figuur 5 Verwachte dagelijkse temperatuurgang in de container geplott voor 6 juli 2016.

2.2 Gebruik

Figuur 5 geeft ook de berekende buitentemperatuur in Kidal op 6 juli. Uit de figuur blijkt dat ten tijde van het ongeval (rond 9:30) de temperatuur ongeveer 40 °C is.

Naast opwarming aan de buitenlucht vindt opwarming ook plaats door zonnestraling. Zoals blijkt uit Figuur 6 zijn de mortiergranaten bij gebruik blootgesteld aan zonlicht.



Figuur 6 Gebruik van de 60 mm HE80 mortiergranaat tijdens oefening in Kidal op 6 juli 2016.

Een mortiergranaat die open en bloot in de zon ligt zal snel opwarmen. De groene verf waarmee het granaatlichaam is beschilderd heeft een hogere absorptiecoëfficiënt dan de witte verf van de container; $a(\text{zonlicht})=0.5$. De groene verf verlaagt bovendien de emissiviteit tot 0.7. Het netto resultaat is dat de mantel van het granaatlichaam een temperatuur van 80 °C kan bereiken wanneer deze vol in de zon ligt. De stalen mantel transporteert de hitte bovendien snel naar de energetische vulling zodat deze ook snel in temperatuur oploopt. Omdat de mortiergranaten tijdens de oefening met de blote hand zijn geladen (zie Figuur 6) is het onwaarschijnlijk dat de granaten ook daadwerkelijk een temperatuur hebben bereikt van 80 °C.

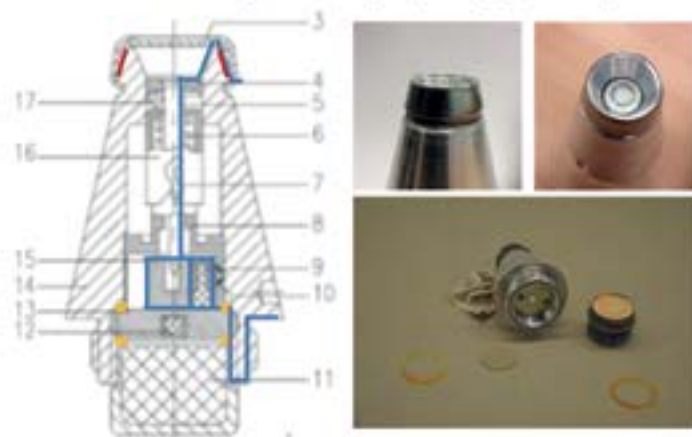
De fuze (schokbuis) vormt de punt van de mortiergranaat en is van aluminium. Aluminium absorbeert relatief weinig zonlicht $a(\text{zonlicht})=0.3$. Omdat echter de emissiviteit bijzonder laag is $\epsilon=0.1$, kan aluminium de warmte niet kwijt door uitstraling. Een stuk aluminium zou daarom een temperatuur van ruim 100 graden kunnen bereiken. Voor de granaatpunt geldt dat een deel van de warmte via warmtegeleiding aan het granaatlichaam wordt overgedragen. Bovendien zullen er spontaan stromingen ontstaan die de warmte afvoeren. Het geheel van warmteopname en -afgifte naar het granaatlichaam en de omgeving is te complex voor een nauwkeurige schatting van de temperatuur van de fuze binnen de duur van dit project. Het is aannemelijk dat wanneer de mortiergranaten in de zon worden gelegd de maximum temperatuur van de fuze hoger wordt dan in de opslag, dus meer dan 60 °C, zeker wanneer het deksel van de munitiekist open staat. Met zekerheid kan gesteld worden dat de temperatuur van de fuze boven de 50 °C reikt wanneer de mortiergranaten op een hete dag aan zonlicht worden blootgesteld⁶.

⁶ Ter verificatie is een (inerte) aluminium schokbuis in een oven geplaatst en opgewarmd tot juist boven de 60 °C. Vervolgens is vastgesteld dat deze schokbuis met de blote hand te hanteren is.

3 Potentiële invloed van vocht en temperatuur

In [Bouma, Hooijmeijer, Kroon, 2017] wordt geconcludeerd dat de invloed van een temperatuurstijging tot 70 °C op de veerconstante, en daarmee de wapening van de buis, is te verwaarlozen. Daarom richt dit hoofdstuk zich niet op de mechanische werking van de fuze maar op de energetische materialen die in de mortiergranaat aanwezig zijn.

Hoge temperatuur en vocht hebben mogelijk invloed op de kwaliteit van de energetische materialen in een munitieartikel. In hoofdstuk 2 is berekend dat de 60 mm HE mortiergranaten tijdens opslag en gebruik zijn blootgesteld aan hoge temperaturen. In [Klaver, 2016] is visueel vastgesteld dat er 60 mm HE80 munitie met drie verschillende lotnummers aanwezig is te Gao, Mali. Tijdens inspectie is het volgende waargenomen: "één schot met lichte corrosie op de transportveiligheid en één schot met lichte corrosie tussen de buis en granaallichaam". In [CvO, 2016] wordt na demontage van de fuze van twintig granaten gesteld dat "Bij de visuele inspectie zijn geen bijzonderheden waargenomen. Wel zat er lichte corrosie op de sluiters en het slagpijpje in de sluiters van granaat nummer 14", en "granaat nummer 14 is afgevaallen [voor testen] omdat het slagpijpje vastzat in de sluiters". Op basis van deze constatering is het aannemelijk dat er mortiergranaten zijn geweest die op enig moment zijn blootgesteld aan vocht en dat dit vocht kan doordringen tot de primer. De meest voor de hand liggende weg waarlangs vocht kan doordringen tot de primer is via bovenzijde; de barrière wordt hier gevormd door de lijm waarmee het membraan op de behuizing is bevestigd (de beschermkap zit los en vormt geen barrière). Minder voor de hand liggend is indringing van vocht via de schroefdraad van de fuze, de schroefdraad van de booster, de schroefdraad van de afsluitplaat en twee rubberen afdichtingen. Beide wegen zijn weergegeven in Figuur 7.



Figuur 7 Doorsnede fuze met potentiële routes (blauw) voor indringing van vocht via lijm laag (rood) en afdichtingen (geel) (links), lijm laag voor het membraan (midden boven), opening tussen slagpijp en huis (rechtsboven) en onderzijde huis met afsluitplaat, booster met kartonnen afdekplaatje en twee rubberen ringen (rechtsonder).

Hoewel zowel lijm als rubberen ringen permeabel zijn, is de weg langs een lijmlaag veel eenvoudiger dan langs de drie schroefdraden en de twee afdichtringen. Ter bevestiging zijn twee eenvoudige lektesten uitgevoerd. Eerst zijn vijf schokbuis behuizingen met de neus naar beneden geplaatst en gevuld met water; deze bleken alle waterdicht. Vervolgens zijn de vijf schokbuizen een voor een bevestigd op een inert granaatlichaam en onderworpen aan vijf valtesten vanaf een hoogte van ongeveer 1 m met een willekeurige oriëntatie tijdens de impact op de grond. Daarna zijn de behuizingen vrijgemaakt van het granaatlichaam en opnieuw gevuld met water; de lijmlaag van één van de vijf behuizingen bleek lek te zijn, zie Figuur 8.



Figuur 8 De lijmlaag van één van de vijf M6-N schokbuis behuizingen is lek na een vijftal valtesten vanaf ongeveer 1 m hoogte en willekeurige impact oriëntatie met de grond.

Hiermee is aangetoond dat doordringing van vocht via de lijmlaag van het membraan tot aan de energetische lading in de primer mogelijk is wanneer na een schok de mortiergranaat wordt blootgesteld aan vocht. Het is aannemelijk dat ook zonder schok, de lijmlaag verouderd en met de tijd makkelijker vocht doorlaat⁷.

Paragraaf 3.1 beschrijft de potentiële invloed van vocht en temperatuur op de hoofdlading en booster. Paragraaf 3.2 beschrijft deze invloed voor de energetische lading in de fuze.

3.1 Hoofdlading en booster

De hoofdlading van de 60 mm HE mortiergranaat bestaat uit TNT en de booster (schokversterker) is gemaakt van RDX. Dit zijn beide relatief schok- en wrijvingsongevoelige (secundaire) springstoffen, die bij normale functionering door middel van een zogeheten schok tot detonatie overgang tot detonatie worden gebracht. Door impact of wrijving (minder sterke stimuli dan een detonatie) zullen (losse) TNT en RDX kristallen ontbranden in plaats van detoneren.

⁷ De potentiële invloed van vocht door condensatie van de lucht (als gevolg van temperatuurswisselingen) in de luchtkamer van de fuze (zie Figuur 7) wordt verwaarloosbaar geacht. De hoeveelheid condensaat is gerelateerd aan het volume van de luchtkamer en is daarom zeer klein. Accumulatie van vocht is onaannemelijk; condensatie is een reversibel proces want het wordt afgewisseld met verdamping.

3.1.1 Hoofdlading TNT

TNT lost nauwelijks op in water, heeft een smeltpunt van rond de 81 °C en een deflagratietemperatuur van 300 °C [Meyer, 2007]. De in paragraaf 2.2 berekende maximum temperatuur van 80 °C ligt juist onder de smelttemperatuur van TNT. Bovendien werden de mortiergranaten tijdens de oefening met blote hand geladen; het is daarom onwaarschijnlijk dat de "ongevalsgranaat" is afgevuurd met een vloeibare hoofdlading.

De springstof TNT is zeer stabiel. Bij de productie van TNT ontstaan asymmetrische trinitrotoluenen (bijvoorbeeld 2,3,5 TNT) en dinitrotoluenen (DNT). Deze stoffen zijn onderling oplosbaar. De hoeveelheid verontreinigingen bepalen de smeltpuntsverlaging [Rosen *et al.*, 1959]. Het dichtheidsverschil tussen kristallijn TNT (1,654 g/cm³) en vloeibaar TNT (1,47 g/cm³) [Meyer, 2007] is relatief groot, en de bijbehorende volumeverandering tijdens smelt is 12.5%. Exudatie (uitzweeten) is daarom een proces dat typisch voorkomt bij TNT ladingen of ladingen op basis van TNT. Exudatie is gedefinieerd in [AOP-38, 2009] als "the process through which an energetic material oozes out through openings such as screw threads, fuze cavity, etc." Uitzweeting begint bij temperaturen in de nabijheid van het smeltpunt; rond de 80 °C voor TNT en rond de 70 °C voor DNT; de kwaliteit van de TNT lading⁸ is bepalend voor de exacte temperatuur waarbij exudatie optreedt. De smelttemperatuur van het exudaat zelf is mogelijk aanzienlijk lager; in [DGA] wordt melding gemaakt van smelten vanaf 46 °C.

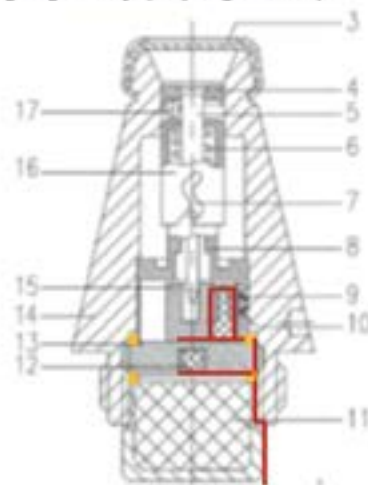
Bij opwarmen van de hoofdlading tot 70 - 80 °C (en hoger), ontstaat een olieachtige smelt van de nevenproducten waarin het "gewone" TNT gedeeltelijk is opgelost. Migratie van TNT kristallen uit de hoofdlading via dit exudaat is mogelijk. Na afkoeling van het exudaat zullen fijne kristallen van TNT en van de nevenproducten ontstaan die gevoelig en daarom gevaarlijk kunnen zijn, zeker als zij zich tussen de schroefdraad van het granaatlichaam en de fuze bevinden. Ontbranding van dit exudaat bij de schok van de lancering zou mogelijk tot een deflagratie van de booster en hoofdlading kunnen leiden. Een detonatie van de hoofdlading (zoals zich heeft voorgedaan) is zeer onwaarschijnlijk want daarvoor is een schok nodig afkomstig van de boosterlading. Een detonatie van de booster is onwaarschijnlijk want daarvoor is een schok nodig van de overdrachtslading.

Figuur 9 geeft twee potentiële andere routes weer voor het exudaat; een tot onder en een tot boven de afsluitplaat. Het wordt onwaarschijnlijk geacht dat het exudaat langs de schroefdraad van de booster en de afdichtring tot onder de afsluitplaat is doorgedrongen (onderste rode lijn in Figuur 9) en dat ontbranding van het exudaat bij de schok van de lancering de overdrachtslading heeft geïnitieerd (die vervolgens de booster en de hoofdlading tot detonatie heeft gebracht). De overdrachtslading moet namelijk met een schok worden geïnitieerd. Dit geldt ook indien er RDX kristallen uit de booster met het exudaat mee gemigreerd zijn (zie paragraaf 3.1.2).

Nog onwaarschijnlijker is dat het exudaat zich heeft verplaatst langs de schroefdraad van de booster en de afdichtring, de schroefdraad van de afsluitplaat en de (tweede) afdichtring en vervolgens is neergeslagen tussen de afsluitplaat en primer en rond de primer. In dit scenario zou een "brug" kunnen ontstaan van energetische stoffen tussen de primer en de overdrachtslading (bovenste rode lijn in Figuur 9).

⁸ Arsenal brengt de TNT hoofdlading in de granaat aan door middel van persen bij kamertemperatuur [Bezoek Arsenal, 2017].

Hoewel het in de primer aanwezige vlamegevoelige loodstijfnaat (zie paragraaf 3.2) door ontbranding van exudaat een detonatie van de primer kan veroorzaken, moet de afsluitplaat voorkomen dat de overdrachtslading wordt geïnitieerd in de veilige stand (waarbij primer en overdrachtslading uit lijn staan). Hierbij zal de brug van exudaat ontbranden zonder initiatie van de overdrachtslading. Het doorgeven van de schok door het exudaat van de primer naar de overdrachtslading (die vervolgens de booster en de hoofdading tot detonatie brengt) wordt onwaarschijnlijk geacht. Dit geldt ook indien er RDX kristallen uit de booster met het exudaat mee gemigreerd zijn (zie paragraaf 3.1.2).



Figuur 9 Potentiële maar onwaarschijnlijke routes van exudaat tot onder en boven de afsluitplaat.

Bij exudatie kunnen door de migratie van stoffen holtes ontstaan in de hoofdading. Omdat de versnelling bij lancering voor een mortiersysteem relatief laag is ten opzichte van het afvuren grotere kalibers munitie (bijvoorbeeld een houwitser) is het onwaarschijnlijk dat het dichtklappen van de mogelijk ontstane holtes leiden tot initiatie van de hoofdading.

Onderbouwing van bovenstaande wordt geleverd in [Naval ordnance lab, 1959], dat concludeert: "At 75 °C, two samples of Grade I TNT showed 5.2% and 7.4% liquid TNT. A purified sample of TNT showed no liquid at the same temperature". [Naval ordnance lab, 1959] stelt tevens dat: "Exudation may produce a cavity in the loaded weapon, which is perhaps the major objection to it. If the cavity is under the booster, the charge may fail to detonate".

Het is onwaarschijnlijk dat het opwarmen van de TNT hoofdading tot ongeveer 60 °C in opslag of tot 80 °C tijdens gebruik (zie paragraaf 2.2) het ongeval met de mortiergranaat heeft veroorzaakt.

3.1.2 *Boosterlading RDX*

De boosterlading bestaat uit RDX⁹ [Bezoek Arsenal, 2017]. RDX lost niet op in water, heeft een smeltpunt van 204 °C [Meyer, 2007], een zelfontstekingstemperatuur van 316 °C [Weinheimer, 2002] en een hoge chemische stabiliteit. Initiatie van de boosterlading (en dus van de hoofdlading) door de schok van de lancering is uiterst onwaarschijnlijk, ook bij verhoogde temperatuur.

3.2 **Energetische composities in de fuze**

3.2.1 *Overdrachtslading PETN*

In de afsluitplaat bevindt zich een overdrachtslading van PETN (pentriet) [Bezoek Arsenal, 2017]. Pentriet is een secundair explosief dat met een schok tot detonatie moet worden gebracht. Door impact of wrijving zullen (losse) PETN kristallen ontbranden in plaats van detoneren. PETN is gevoeliger voor impact en wrijving dan TNT en RDX, maar minder gevoelig in vergelijking met primaire springstoffen.

Pentriet lost niet op in water [Meyer, 2007], heeft een smeltpunt van 141.3 °C [Foltz, 2009], een zelfontstekingstemperatuur van 272 °C [Weinheimer, 2002]. Het is zeer stabiel met betrekking tot decompositie tijdens opslag bij lage temperatuur. Een halveringswaarde 12 miljoen jaar wordt voorspeld bij een temperatuur van 30 °C. Thermische decompositie wordt echter gemeld ver onder de smeltemperatuur, waarvan een bruikbare operationele gebruikstemperatuur is afgeleid van 70 – 75 °C [Foltz, 2009]. Potentiële veroudering door vocht is onwaarschijnlijk omdat vocht de overdrachtslading moeilijk kan bereiken (zie Figuur 7). Initiatie van de overdrachtslading (leidend tot initiatie van de booster en de hoofdlading) door de schok van de lancering is uiterst onwaarschijnlijk, ook bij verhoogde temperatuur.

3.2.2 *Duplexslagpijpje*

Het duplexslagpijpje heeft een primerlading die bestaat uit drie delen:

- het bovenste deel bestaat uit een impact en wrijvingsgevoelig mengsel van (van boven naar onder):
 - Loodstyfnaat
 - Tetrazeen
 - Bariumnitraat
 - Antimoonsulfide
- het middelste deel bestaat uit loodazide
- het onderste deel (tegen de sluitplaat aan) bestaat uit pentriet (zie paragraaf 3.2.1).

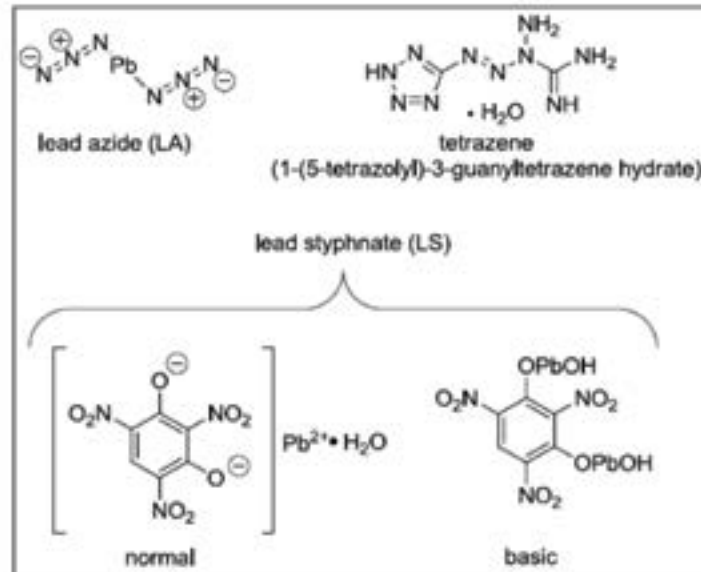
Met uitzondering van het pentriet, zijn bovengenoemde energetische materialen alle primaire springstoffen. De (losse) kristallen van deze stoffen kunnen detoneren onder invloed van een vlam, hitte, impact, wrijving of statische elektriciteit.

De relatie van de bovenstaande materialen met vocht en temperatuur worden als volgt beschreven:

- Loodstyfnaat is vlamgevoelig, lost vrijwel niet op in water en heeft een deflagratietemperatuur van 275 – 280 °C [Meyer, 2007].

⁹ Een alternatieve boosterlading is Tetryl. Deze stof lost nauwelijks op in water en heeft een smeltpunt van 129.5 °C [Meyer, 2007]. De smeltemperatuur ligt ver onder de berekende temperatuur voor opslag en gebruik. Er wordt geen invloed verwacht van klimatologische omstandigheden op de stabiliteit en werking van Tetryl indien deze is gebruikt als boosterlading.

Loodstyfnaat wordt zowel in normale als in basische vorm toegepast in primer composities [Oyler *et al.*, 2015]. Het is niet duidelijk in welke vorm loodstyfnaat is toegepast in de M6-N schokbuis. Voor de structuurformule van beide vormen loodstyfnaat, zie Figuur 10.



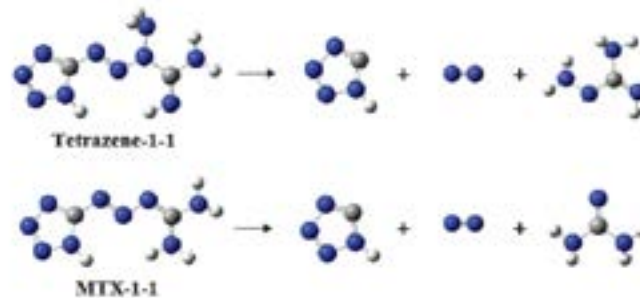
Figuur 10 Structuurformule van loodazide, tetrazeen, normaal loodstyfnaat, en basisch loodstyfnaat [Oyler *et al.*, 2015].

- Tetrazeen is een sensibiliserende stof die vrijwel niet in water oplost en deflagreert bij 140 °C [Meyer, 2007]. Hoewel instabiel, wordt tetrazeen gebruikt als sensitizer in cap composities omdat er tot nu toe geen geschikte alternatieven zijn gevonden [Agrawal, 2010]. Onder verhoogde temperatuur gaat tetrazeen ontleed. De sublimatie van tetrazeen met kristalvorming op een andere plek is experimenteel waargenomen [Duvalois, 2017]. In [NAVSEA, 2002] wordt de analyse gegeven van de operationele levensduur van een primer; daarin is gemeten dat 20% van het tetrazeen is ontleed bij een belasting van negen dagen op 89 °C¹⁰. In [Yan *et al.*, 2014] wordt de thermische decompositie van tetrazeen en MTX-1 vergeleken. 5-Aminotetrazole (5-ATZ) is reeds bekend als een initieel decompositie product. Door de bepaling van activeringsenergie uit Differential Scanning Calorimetry en Thermo Gravimetry metingen, en het uitvoeren van quantum-chemische berekeningen, zijn de mogelijke decompositieroutes nader bestudeerd. De mogelijk decompositieroutes van zowel tetrazeen als MTX-1 is weergegeven in Figuur 11. Volgens de quantum-chemische berekeningen vormt zich initieel 1H-tetrazole, N₂ en aminocyanamide.

¹⁰ Op basis van de gepresenteerde activeringsenergie van 180 kJ/mole kan met de Arrhenius vergelijking worden geschat dat eenzelfde omzetting (20%) optreedt in 4,5 jaar bij 60 °C, en in 0,7 jaar bij 70 °C.

NH_2 in de vorm van cyanamide kan reageren met 1*H*-tetrazole tot 5-ATZ en hydrogen cyanide (HCN) bij lage temperatuur. Dit komt overeen met de waargenomen vorming van 5-ATZ bij 6 dagen verwarming van tetrazeen bij 90 °C [Yan *et al.*, 2014]. Deze referentie geeft niet de volledige decompositievergelijking weer.

Omdat per molecuul tetrazeen 2 stikstofmoleculen en 2 waterstofmoleculen overblijven, zullen stikstof, waterstof, ammoniak, waterstofazide en/of protonen gevormd worden.



Figuur 11 Initiële decompositieroutes van tetrazeen en MTX-1 [Yan *et al.*, 2014].

[Matyáš, Pachman, 2013] beschrijft dat de decompositie van tetrazeen in kokend water leidt tot een variëteit aan producten inclusief het zeer gevoelige primaire explosief 5-azidotetrazole, onder vermelding van "Some explosions of decomposition solutions have been reported after cooling down the water with what was believed to be innocent decomposition products."

Het ontsteeksas VH4/1 met een samenstelling van 44% barium nitraat, 27% composition RD 1303 (d.i. lood styfnaat), 27% antimoonsulfide en 2% tetrazeen wordt beschreven in [DEF-STAN 13-179, 1995]. Een eis voor de verwerking van tetrazeen luidt "when drying tetrazene either alone, or in a mixture, the temperature of the tetrazene shall not exceed 55 °C". In Cap Composition EP 41 [DEF STAN, 13-173, 1995] met een samenstelling van 39% bariumnitraat, 38% loodstyfnaat, 11% calciumsilicide, 5% antimoonsulfide, 5% looddioxide en 2% tetrazeen, luidt de eis t.a.v. manufacture "when drying tetrazene either alone or in a mixture, the temperature of the tetrazene shall not exceed 50 °C". De thermische en hydrolytische stabiliteit van een tetrazeen / loodzide mengsel is onderzocht en vergeleken met een 2-picryl-5-nitrotetrazole (PNT) / loodzide mengsel [Elischer, 1984]. De kwantitatieve bepaling van tetrazeen dan wel PNT in een mengsel op basis van DSC metingen, en de bepaling van de ontsteekgevoeligheid (stab sensitivity), na thermische veroudering of blootstelling aan vocht, geven impliciet weer dat loodzide stabiel is dan tetrazeen. Door 6 weken blootstelling aan 89 °C, neemt de stab initiation energy¹¹ toe van 3.6 mJ tot 110 mJ. Door 6 maanden blootstelling aan een luchtvochtigheid van 78-80 %, bij een temperatuur van 20 °C, neemt de stab initiation energy toe van 3.3 tot 4.1 mJ.

¹¹ "Stab" initiatie is één van de mogelijke manieren voor het starten van de detonatieketen in een mechanische buis en wordt ook in de M6-N schokbuis toegepast. Bij stab initiatie doorboort een pin de mantel en dringt in de primaire explosieve stof die daarvoor gevoelig is en explosief reageert [AMCP, 1969].

Het tetrazeen/loodazide wordt ongevoeliger door blootstelling aan zeer hoge temperatuur of aan hoge luchtvochtigheid, en dit wordt toegeschreven aan de ontleding van tetrazeen.

- Bariumnitraat is een niet-hygroscopische oxidator [Oyler, *et al.*, 2015] en heeft een smeltpunt van 592 °C [Meyer, 2007]
- Antimoonsulfide is een brandstof die slecht oplost in water, met een smeltpunt van 550 °C [ESPI, 2016].

Zowel compositie VH4/1 als EP 41 zijn verwant aan het ontsteeksas (het mengsel in het bovenste deel van het duplex slagpijpje). De maximaal toegestane hoeveelheid aan vluchtige stoffen in deze composities zijn respectievelijk 0.05% en 0.2%. De ingrediënten van de EP 41 premix absorberen vocht. Derhalve geldt de eis “.. the premix shall not be exposed to the atmosphere, any stage of manufacture, filling or storage, when the relative humidity exceeds 70%.” [DEF STAN, 13-173, 1995].

Daarnaast wordt het loodstijfnaat gemaakt door het reageren van styphnic acid met loodoxide, en wordt een eis gesteld aan de maximale hoeveelheid vrij styphnic acid.

- Loodazide (middelste deel van het duplex slagpijpje) is niet hygroscopisch, lost niet op in water, heeft een deflagratie temperatuur van 320 - 360 °C en is thermisch zeer stabiel [Meyer, 2007].

Loodazide is in het verleden in verband gebracht met de vorming van het zeer gevoelig koperazide. [Shaneyfelt, 1984] stelt dat loodazide in droge conditie de meeste metalen niet corrodeert. Echter, loodazide kan in aanwezigheid van vocht reageren met koper, kwik, tin en zink en zeer gevoelige en gevaarlijke azides vormen. In [Kroon, van Ham, Bouma, 2015] wordt een voorbeeld gegeven:

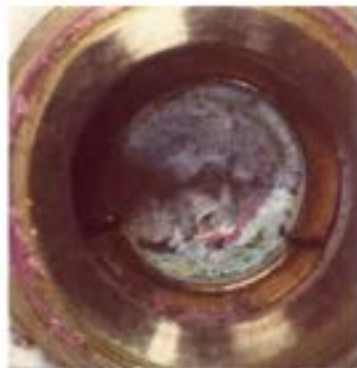
Koperazide is een uitermate gevoelige stof die bij geringe stoot of schok kan reageren. TNO heeft in 1974 onderzocht waarom accidentele reacties optraden bij de 81 mm mortier van de Koninklijke Marine (KM) [Josseling de Jong, 1976]. Tijdens onderhoud van deze munitie die terugkwam in Den Helder na een verblijf in de Antillen¹², bleek dat de rotor die zorgt voor het scherp stellen na verschieten (onderdeel van het veiligheids- en wapeningsmechaniek), bij een aantal granaten door de kartonnen verpakking was geschoten, zie Figuur 12. Het onderzoek wees uit dat de slaghoedjes van de (schok)buizen gecorrodeerd waren waarbij koperazide werd gevormd. Geconcludeerd werd dat de messing onderdelen rond het slaghoedje gereageerd hadden met de loodazide in het aluminium slaghoedje. Door inwendige wrijving, waarschijnlijk door trillingen tijdens transport, is de koperazide in werking getreden wat heeft geleid tot het activeren van de inleidingslading en de vertragingslading. De hoofdlading is niet geactiveerd omdat de mortier in de veilige stand stond (niet op scherp).

¹² Voor de Antillen geldt een Tropisch Savanne klimaat dat voorkomt in gebieden rond de evenaar (<http://www.klimaatinfo.nl/curacao>).



Figuur 12 Geperforeerde verpakking en verschoten rotor van de baanveiligheid van de 81 mm mortier [Josseling de Jong, 1976].

De betreffende munitie was met een schip van de KM gedurende 18 maanden in de Antillen. De daar heersende hoge temperatuur en luchtvochtigheid waren de oorzaak van de reactie van loodazide met waterdamp uit de atmosfeer. Deze is zichtbaar op het bovenaanzicht van het slaghoedje in de messing huls in Figuur 13. De resten van de sas (antimoon-sulfide en kaliumchloraat) zijn zichtbaar als grijze en witte kristallen, mogelijk vermengd met aluminium-verbindingen van het slaghoedje. Resten van rode (afdichtings)lak zijn zichtbaar als ook groene kristallen die duiden op koperverbindingen zoals koperazide en het niet-explosieve koperhydroxide ($\text{Cu}(\text{OH})_2$) en koperoxide (CuO).



Figuur 13 Bovenaanzicht aluminium slaghoedje in messing huls uit (schok)buis type V-19 [Josseling de Jong, 1976].

In deze staat is de munitie niet meer bruikbaar omdat betrouwbare functionering onmogelijk is geworden en er groot risico bestaat bij het manipuleren van de munitie. Dit is echter een tijdelijk effect; koperazide zal doorreageren met water (damp) tot uiteindelijk koperoxides zijn gevormd waarna alle explosieve eigenschappen zijn verdwenen.

Dit betekent dat indien vocht kan doordringen tot de energetische lading van de primer en er koperhoudende metalen aanwezig zijn, de mogelijkheid bestaat op de *tijdelijke aanwezigheid* van het zeer gevoelige koperazide.

In het geval van de M6-N fuze is de primer aanwezig in een aluminium cupje dat geplaatst is in een houder gemaakt van een koper-nikkel metaal legering (met een typische 70/30 verhouding), die bekend staat onder de naam Melchior [Bezoek Arsenal, 2017]. Melchior is zeer goed bestand tegen corrosie in lucht, water en zeewater. Echter, koper-nikkel legeringen tonen verhoogde corrosiesnelheid in water waarin sulfide of ammonia aanwezig zijn, wat kan leiden tot de vorming van koperoxides [Powell & Michels, 2000]. Er wordt opgemerkt dat de gegeven primer samenstelling (antimoon)sulfide bevat dat dus eventuele corrosie van Melchior houder versnelt.

Verder wordt opgemerkt dat er in de omgeving van de primer verschillende metalen aanwezig zijn:

- Aluminium (primer cup en schokbuis behuizing)
- Melchior, koper/nikkel (cup houder)
- Koperhoudend messing (sluiter)
- Staal (afsluitplaat).

Onder invloed van vocht kan er galvanische corrosie¹³ ontstaan wat zal leiden tot degradatie van het aluminium en het Melchior. De combinatie van vocht met een verhoogde temperatuur kan leiden tot thermo galvanische corrosie waarvoor de vuistregel geldt dat een verhoging van 10 °C het proces van corrosie verdubbelt. Tevens kan onder invloed van vocht waterstofazide ontstaan bij hydrolyse van loodzide¹⁴. Het waterstofazide kan met het koper in de Melchior cup houder en het koper in de messing sluiter reageren en koperazide vormen. In het eerste stadium van dit proces kunnen zeer gevoelige verbindingen gevormd worden, die in een later stadium overgaan in minder gevoelige stoffen, die naast koper en azide ook hydroxylgroepen, watermoleculen en mogelijk carbonaatgroepen kunnen bevatten [Lamnevik, 1967]. De groene aanslag rond het slaghoedje in Figuur 13 wijst op deze koperverbindingen.

Volgens [Josseling de Jong, 1976] is, opmerkelijk genoeg, de koperazide verbinding met de grootste gevoeligheid wit van kleur. Een witte aanslag op de slaghoedjes en de omgeving ervan kan ongevaarlijk zijn (bijvoorbeeld aluminiumoxide), maar ook zeer gevaarlijk (koperazide) [Kabik & Urban, 1972]. Vermoed wordt dat de hydrolyse van loodzide is bevorderd door de destructie van het slaghoedje onder invloed van een (galvanisch) corrosieproces.

[Josseling de Jong, 1976] demonstreert dat corrosie ook is opgetreden in het messing cupje waarin het aluminium slaghoedje was gevat, zie Figuur 14.

¹³ Aan elkaar gekoppelde metalen in een elektrolyt (de verbinding tussen twee polen (anode en kathode)) vormen een zogenaamd galvanisch koppel. Voor het minst edele metaal van het koppel veroorzaakt dit versnelde corrosie als gevolg van een potentiaalverhoging, terwijl het meest edele metaal juist minder zal corroderen dankzij de potentiaalverlaging.

¹⁴ Waterstofazide heeft een kookpunt van 37 °C; dus onder deze temperatuur is het vloeibaar en boven deze temperatuur is het een gas.

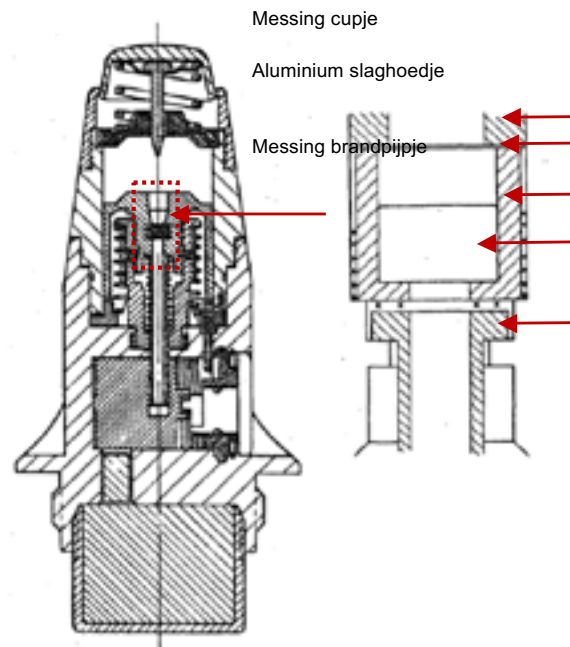


Figuur 14 Messing cupjes (links) en aluminium slaghoedjes (rechts) uit schokbuizen V-19 afkomstig uit de Nederlandse Antillen [Josseling de Jong, 1976].

Links in Figuur 14 is duidelijk aan de gele kleur te zien waar het slaghoedje in het messing cupje heeft gezeten. Daarboven is een groene aanslag zichtbaar. De inhoud is nog grotendeels aanwezig in de slaghoedjes (rechts in Figuur 14). Ook hier is een groene aanslag duidelijk zichtbaar.

De groene aanslag werd overal op de messing onderdelen aangetroffen ook in de ruimte tussen het messing huisje en het messing cupje en tevens op de bovenkant van het messing brandpijpje, zoals is weergegeven in Figuur 15. De groene aanslag boven het slaghoedje is onderzocht op azide en carbonaat. Beide bleken aanwezig¹⁵. Dit azide kan eventueel rechtstreeks afkomstig zijn van het oorspronkelijke loodazide uit het slaghoedje. De groene kristallen tussen het messing huisje en het messing cupje gaven eveneens een positieve reactie op azide; ook koper was aanwezig. Dit azide kan niet rechtstreeks afkomstig zijn van het oorspronkelijke loodazide. Figuur 15 toont aan dat door degradatie koperazide kan voorkomen op enige afstand van de primer. [Josseling de Jong, 1976] concludeert dat men in het algemeen kan stellen dat de aanwezigheid van koper in de directe omgeving van loodazide onaanvaardbaar geacht moet worden, ook in de vorm van messing en met een luchtruimte ertussen.

¹⁵ De samenstelling van de energetische lading van het slaghoedje was loodazide in het onderste deel en een mengsel van antimoonsulfide en kaliumchloraat in het bovenste deel.

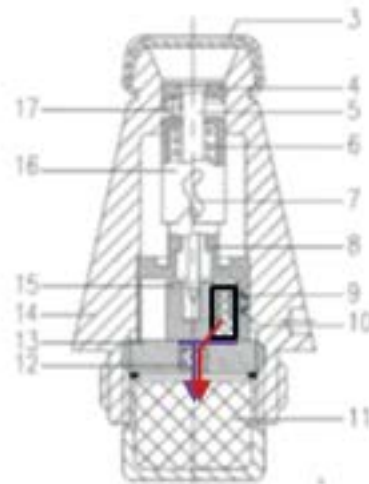


Figuur 15 V-19 schokbuis in veilige stand (links) en positie van het slaghoedje (rechts) met azide bevattende groene aanslag aangegeven met x, die niet rechtsreeks afkomstig kan zijn van het oorspronkelijke loodazide [Josseling de Jong, 1976].

Indien er daadwerkelijk koperazide is gevormd in de M6-N schokbuis, dan zijn er twee mogelijke oorzaken die de explosieve trein (duplex slagpijpe-overdrachtslading-booster-hoofdlading) in werking kunnen zetten. Zie Figuur 16; door de schok bij de lancering van de mortiergranaat is er koperazide gedetoneerd wat geleid heeft tot initiatie van de primer (zwart):

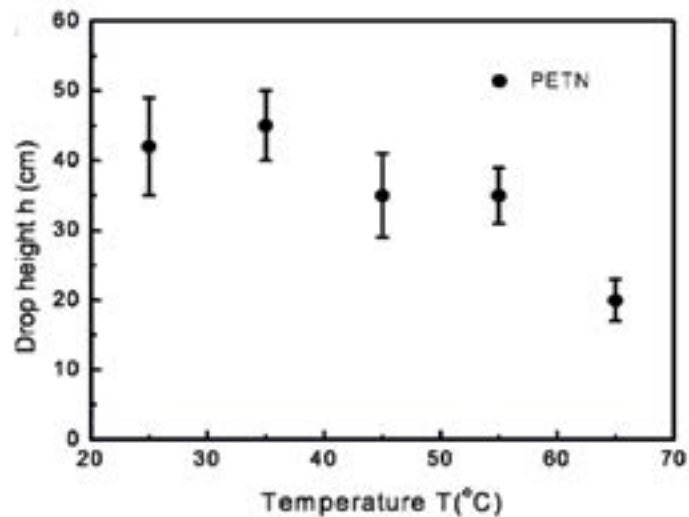
- met doorslag door de afsluiter (in rood) naar de overdrachtslading waarbij de afsluiter niet gefunctioneerd heeft volgens het veiligheids- en wapeningsconcept. Deze intrinsieke veiligheid is door Arsenal niet geverifieerd met een zogenaamde *explosive train interruption test*¹⁶ [Bezoek Arsenal, 2007]
- met doorslag langs een "brug" tussen de primer en de overdrachtslading (in paars) over de afsluitplaat, waarbij de brug (in tegenstelling tot exudaat) bestaat uit stoffen met explosieve eigenschappen, zoals koperazide mogelijk aangevuld met neerslag van gesublimeerd tetrazeen.

¹⁶ Bijvoorbeeld volgens AOP-20 ed.1, 2002 Manual of tests for the safety qualification of fuzing systems.



Figuur 16 Door detonatie van koperazide bij lancering van de mortiergranaat detoneert de primer (zwart) met directe doorslag (rood) of detoneert de primer en de "brug" van koperazide tussen primer en overdrachtslading (paars).

Voor beide routes in Figuur 16 geldt dat mogelijke doorslag afhankelijk is van de gevoeligheid van de overdrachtslading (en booster) die mogelijk toeneemt bij een temperatuur boven de 50 à 60 °C (of hoger). Figuur 17, gereproduceerd uit [Zhang & Weeks, 2010], levert hiervoor een indicatie; de impactgevoeligheid van PETN is ongeveer twee hoger bij een temperatuur van 65 °C dan bij kamertemperatuur.



Figuur 17 Valhoogte waarbij PETN reageert versus temperatuur [Zhang & Weeks, 2010].

4 Conclusies

Op 6 juli 2016 heeft een dodelijk ongeval plaatsgevonden in Kidal, Mali tijdens een oefening met een 60 mm High Explosive (HE) mortiergranaat met M6-N (H) fuze (schokbuis). De Onderzoeksraad Voor Veiligheid (OVV) heeft in het kader van het technisch onderzoek TNO gevraagd om de klimatologische omstandigheden tijdens opslag en gebruik te analyseren.

Het doel van deze analyse is het vaststellen of de klimatologische omstandigheden hebben bijgedragen aan het voortijdig functioneren (detoneren) van de mortiergranaat tijdens de oefening. Voor deze analyse zijn de TNO klimaat tool en analytische vergelijkingen gebruikt om de temperatuur van de mortiergranaat te berekenen in de opslag in Kidal en tijdens gebruik.

De berekeningen laten zien dat de 60 mm mortiergranaten waarschijnlijk een temperatuur boven de 60 °C hebben bereikt in de opslag in de zeecontainer in Kidal. Deze opwarming is regelmatig opgetreden in de dagen direct voor en na het ongeval.

Ook is berekend dat buiten de opslag of tijdens gebruik, de stalen mantel en de TNT hoofdclading door blootstelling aan zonlicht een temperatuur kunnen bereiken van 80 °C. Omdat de mortiergranaten met de blote hand werden geladen is het onwaarschijnlijk dat de granaten ook daadwerkelijk deze temperatuur hebben bereikt tijdens de oefening.

Door blootstelling aan zonlicht is het waarschijnlijk dat de temperatuur van de fuze tijdens gebruik tot boven de 50 °C is gestegen en mogelijk zelfs tot boven de 60 °C. Op basis van de analyse wordt geconcludeerd dat zowel tijdens opslag als bij gebruik de door de leverancier gespecificeerde maximaal toelaatbare fuze temperatuur van 50 °C is overschreden.

Het is onwaarschijnlijk dat door het opwarmen van de TNT hoofdclading exudaat is doorgedrongen tot onder of boven de afsluitplaat. In het geval dat exudaat die locaties toch heeft bereikt, is het onwaarschijnlijk dat ontbranding ervan bij de schok van de lancering leidt tot een detonatie van de hoofdclading.

Initiatie van de RDX boosterlading of de PETN overdrachtslading door de schok van de lancering is uiterst onwaarschijnlijk, ook bij verhoogde temperatuur.

Wanneer na een schok de mortiergranaat wordt blootgesteld aan vocht, kan dit vocht doordringen in de M6-N schokbuis via de lijmlaag van het membraan tot aan de energetische lading in de primer. Het is aannemelijk dat ook zonder schok, de lijmlaag veroudert en met de tijd makkelijker vocht doorlaat.

Onder invloed van vocht kan er (galvanische) corrosie optreden wat leidt tot degradatie van het aluminium primer cupje en de Melchior houder. Dit proces versnelt mogelijk bij verhoogde temperatuur. Tevens kan onder invloed van vocht waterstofazide ontstaan bij hydrolyse van loodazide.

Het waterstofazide kan met het koper in de Melchior cup houder en het koper in de messing sluiters reageren en het zeer gevoelige koperazide vormen¹⁷. Vermoed wordt dat hydrolyse van loodazide wordt bevorderd door de destructie van het primer cupje onder invloed van een (galvanisch) corrosieproces. Mogelijk wordt corrosie van de Melchior houder versneld door de aanwezigheid van (antimoon)sulfide in de primer. Tevens kan onder verhoogde temperatuur tetrazeen sublimeren met mogelijke kristalvorming elders in de ontsteker. Indien koperazide (en tetrazeen) is gevormd, dan is detonatie hiervan door de schok van de lancering waarschijnlijk, met initiatie van de primer tot gevolg. Doorslag naar de overdrachtslading door de afsluiter of langs een "brug" van koperazide (en tetrazeen) tussen de primer en de overdrachtslading in de veilige stand van de ontsteker, leidt tot initiatie van de booster en detonatie van de hoofdvlading. De kans op doorslag is mogelijk temperatuurafhankelijk.

¹⁷ Zoals eerder is geconstateerd voor V-19 schokbuis die terugkeerden uit de Nederlandse Antillen en waarbij de baanveiligheid uit het buislichaam was gesprongen, waarschijnlijk door trillingen tijdens transport.

5 Aanbevelingen

Voor de berekeningen van de temperatuur in de zeecontainer zijn voor de eigenschappen van de geometrie en samenstelling van de verf aannames gemaakt. Het model dat is gemaakt voor de berekeningen kan door middel van metingen geïkt worden. Dit kan door gebruik te maken van een gemeten temperatuurprofiel in de zeecontainer over een enkele dag. De temperatuursensor moet betrouwbaar zijn en de manier waarop de container is ingesloten en hoe deze wordt beschreven met zonlicht moet vergelijkbaar zijn met de situatie rond juli 2016. De container moet identiek zijn voor wat betreft stalen wanden en de gebruikte verf. Het is niet nodig om dezelfde buitentemperatuur te hebben als rond juli 2016; zonnig weer bij een zomerse temperatuur > 20 °C op een willekeurige dag is voldoende. Na ijking levert het gebruikte model een nauwkeuriger resultaat voor de berekende temperaturen.

Voor een nauwkeurigere berekening van de temperatuur van de mortiergranaten is de isolerende werking van de houten bekisting waarin de granaten zijn opgeslagen belangrijk. Naast een temperatuurprofiel in de zeecontainer zou daarom een temperatuurprofiel in een houten kist gemeten moeten worden.

De temperatuurvoorschriften met betrekking tot opslag en gebruik betreffen de omgevingslucht. Het lijkt daarom niet noodzakelijk om te onderzoeken hoe snel de explosieve vulling van de mortiergranaten de omgevingstemperatuur volgt. De relevante temperatuur lijkt echter de kerntemperatuur, en niet die van de lucht of van de mantel. Om die reden zou voor temperatuur kritisch geachte munitieartikelen overwogen kunnen worden om de verhouding tussen de temperatuur van de omgevingslucht en de explosieve vulling te bepalen.

Verificatie van het veiligheids- en wapeningsprincipe van de M6-N schokbuis kan worden uitgevoerd door middel van een explosieve train interruption test ("doorslag" test), zowel bij kamertemperatuur als bij verhoogde temperatuur. Hierbij moet de primer lading in een M6-N schokbuis in de veilige stand van buiten af worden geïnitieerd.

Verificatie van het optreden van koperazide en tetrazeen kan plaatsvinden door een M6-N schokbuis in een klimaatkast te onderwerpen aan een vochtige omgeving met hoge temperatuur.

6 Referenties

- AMCP, 1969
AMCP 706-210, Engineer design handbook, ammunition series, fuzes, 1969
- AOP-38, 2009
Specialist glossary of terms and definitions on ammunition safety, AOP-38, Edition 5, 2009
- Agrawal, 2010
High Energy Materials, Propellants, Explosives and Pyrotechnics, Jai Prakash Agrawal, Wiley, 2010
- Arsenal, 2017
<http://www.arsenal-bg.com/c/fuzes-for-mortar-bombs-155/af61m6-af62m-6naf64m52-b3-155,25-01-2017>
- Bezoek Arsenal, 2017
Vergadering bij Arsenal2000 JSC0 te Kazanlak, Bulgarije, 9 februari 2017. Aanwezig: S. Stanilov, First Deputy Director, Hoofd Kwaliteit, Hoofd Productie, Munitie-specialist, Ontwerpspecialist (Arsenal), C. van der Schors en E. Kroon (OVV).
- Bouma, Hooijmeijer, Kroon, 2017
Ongeval mortieroefening Mali: analyse van benodigde versnelling om schokbuis te wapenen, TNO 2017 R10160, februari 2017
- Bulcomersks, 2017
[http://bulcomersks.com/index.php/military-products/ammunition-components/50-ammunition-components/fuzes/488-fuze-af62-fpdsq2-m6n\(15-3-2017\)](http://bulcomersks.com/index.php/military-products/ammunition-components/50-ammunition-components/fuzes/488-fuze-af62-fpdsq2-m6n(15-3-2017))
- Corcione, 2007
Heat transfer correlations for free convection from upward-facing horizontal rectangular surfaces, WSEAS Transactions on HEAT and MASS Transfer, Issue 3, Volume 2, July 2007
- CvO, 2016
60 mm Mortier HE- 80, Kenniscentrum Wapensystemen en Munitie CvO, Documentnr 26240, december 2016
- Foltz, 2009
Aging of Pentaerythritol Tetranitrate (PETN), LLNL-TR-415057, M. F. Foltz, July 2017
- DGA
TNT Exudation can cause accident, J. Salmon, DGA, Ministère de la Defense, Direction Technique, datum onbekend

- DEF STAN 13-173, 1995
Cap composition EP 41, Interim Defence Standard 13-173/Issue 1, 27 January 1995
- DEF STAN 13-179, 1995
Initiator composition VH4/1, Interim Defence Standard 13-179/Issue 1, 15 March 1995
- Duvalois, 2017
Persoonlijke communicatie, W. Duvalois, TNO, 2017
- Elischer & Spear, 1984
A thermal stability test for primary explosive stab sensitizers: study of the thermal and hydrolytic stability of 2-picryl-5 nitrotetrazole, DSTO report MRL-R-918
- ESPI, 2016
Antimony Sulfide, Safety Data Sheet, ESPI, 2016
- Josseling de Jong, 1976
Onderzoek schokbuizen type V-9 en type V-19, fabricaat Hotchkiss-Brandt, TNO rapport TL 1976-15, 18 November 1976 [Confidentieel]
- Kabik & Urman, 1972
I. Kabik and S. Urman, Hazards of copper azide in fuzes. 14 explosives safety seminar (1972). Department of defense explosives safety board.
- Klaver, 2016
Verslag bezoek Munitiecomplex Camp Castor te Gao, Mali van Kap. P. Klaver, Kap. H. Leemans, Sgt1. A. van der Straeten, Kap. R. Peters, 11 juli 2016
- KMAR, 2016
KMAR Proces Verbaal, Dossiernr.: PL27QM/1680015, Augustus 2016
- Kroon, van Ham, 2012
Analyse en advies met betrekking tot potentiële WOII blindgangers in de Zwolse wijk Holtenbroek, TNO Rapport 2012 R10104 | 3, juli 2012
- Kroon, van Ham, Bouma, 2015
Inventarisatie van WOII vliegtuigbom ontstekers in NL bodem, TNO Rapport 2015 R10074, Oktober 2015
- Lamnevik, 1967
S. Lamnevik, Copper azide corrosion, Symposium on chemical problems connected with the stability of explosives. Stockholm, 22/23, May 1967.
- LCB, 2006
Levenscyclusbeschrijving CTG 60 mm High Explosive for mortar HB, Defensie Materieel Organisatie Landsystemen Afdeling Wapensystemen

en Munitie, Sectie Munitie, Gebruikende eenheden: KL ISAF Uruzgan Afghanistan en Korps Mariniers, 23 augustus, 2016

- Lloyd, J.R. and W.R. Moran, 1974
Natural Convection Adjacent to Horizontal Surface of Various Planforms, J. Heat Transfer 96, 443-447 (1974), DOI:10.1115/1.3450224
- Matyáš, Pachman, 2013
Primary explosives, R Matyáš, J Pachman, Springer Verlag, 2013
- Meyer, 2007
Explosives, Meyer et. al. Sixth, Completely Revised Edition, Germany, 2007
- Naval ordnance lab, 1959
The melting behaviour of TNT, Naval Ordnance Laboratory, USA, White Oak Maryland, 1959
- NAVSEA, 2002
PROCEEDINGS OF THE 3rd INTERNATIONAL HEAT FLOW CALORIMETRY SYMPOSTUNM FOR ENERGETIC MATERIALS, NAVSEA, Surface Warfare Center Division, USA, April 2002
- Oyler, *et.al.*, 2015
OVERVIEW OF EXPLOSIVE INITIATORS, Oyler, Mehta, Cheng, U.S. ARMY ARMAMENT RESEARCH, DEVELOPMENT AND ENGINEERING CENTER, November 2015
- Powell & Michels, 2000
Copper-Nickel for Seawater Corrosion Resistance and Antifouling: A State of the Art Review, Powell and Michels, Paper 00627; CORROSION/2000, ©NACE International
- Rosen *et al.*, 1959
The melting behavior of TNT, J.M. Rosen, D.V. Sickman, W.W. Morris, NAVORD report 6146, US Naval Ordnance Laboratory, White Oak, Maryland, 23 January 1959
- Shaneyfelt, 1984
Complexities of Lead Azide, W. Shaneyfelt, Presentation to the DDESB Explosives Safety Seminar, Houston, Texas, USA, 29 August 1984
- Weinheimer, 2002
Properties of Selected High Explosives, R. Weinheimer, PEP July 2002
- Yan *et al.*, 2014
Q-L Yan, S Zeman, J-G Zhang, P He, T Musil, M Bartoskova, Multi-stage decomposition of 5-aminotetrazole derivatives: kinetics and reaction channels for rate-limiting steps, Phys. Chem. Phys, 2014, 16, 24282-24291

Zhang & Weeks, 2010

A Device for Testing Thermal Impact Sensitivity of High Explosives,
Propellants Explos. Pyrotech. 2010, 35, 440–445, March 2010

7 Ondertekening

Rijswijk, 23-03-2017

TNO Technical Sciences

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'P. Hendriksen', enclosed within a light blue oval shape.

P. Hendriksen
Afdelingshoofd

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'P.A. Hooijmeijer', written in a cursive style.

P.A. Hooijmeijer
Projectleider

DOORSLAGTESTS M6-N SCHOKBUIS

Onderzoek aan de teruggevonden afsluitplaat van de schokbuis (Bijlage G) heeft sterke aanwijzingen opgeleverd dat de detonatie van de ongevalsgranaat is geïnitieerd vanuit het slagpijpje in de schokbuis, die evenwel in de ongewapende ('veilige') stand stond. Hieruit volgt dat de afsluitplaat niet heeft gefunctioneerd zoals deze bedoeld is, namelijk om doorslag naar de hoofdlading in het granaatlichaam te voorkomen.

In opdracht van de Onderzoeksraad heeft TNO een vijftal tests uitgevoerd met referentieschokbuizen in laboratoriumopstelling, om na te gaan of doorslag door de afsluitplaat met de schokbuis in ongewapende stand, inderdaad mogelijk is.

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 2017 R10363

**Ongeval mortieroefening Mali: Doorslagtesten
M6-N schokbuis**

Datum 5 april 2017
Auteur(s) E.J. Kroon, R.H.B. Bouma, P.A. Hooijmeijer
Titel Ongerubriceerd

Aantal pagina's 36 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen 3
Opdrachtgever Onderzoeksraad Voor Veiligheid
Projectnaam Fase 3 technische onderzoeksvragen
Projectnummer 060.27417

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2017 TNO

Samenvatting

Naar aanleiding van het dodelijk ongeval tijdens een mortiergranaatoefening in Mali op 6 juli 2016, heeft de Onderzoeksraad Voor Veiligheid (OVV) een aantal technische vragen geformuleerd en voorgelegd aan TNO. In fase 1 van het onderzoek is, op basis van de beschikbare informatie en restanten, geconcludeerd dat het ongeval is veroorzaakt door het in de schietbuis prematuur functioneren (detoneren) van de bij het ongeval geladen 60 mm High Explosive (HE 80) mortiergranaat. Nader onderzoek in fase 2 heeft een sterke aanwijzing opgeleverd dat het duplex slagpijpje van de bij het ongeval betrokken schokbuis zeer waarschijnlijk tot initiatie is gekomen in de ongewapende stand van de schokbuis. Omdat bij het ongeval de hoofdloading is gedetoneerd, lijkt het aannemelijk dat tijdens de lancering van de ongevalsgranaat het veiligheidsmechanisme heeft gefaald en er doorslag is opgetreden door de afsluitplaat met initiatie van de volledige detonatieketen.

In dit project zijn doorslagtesten uitgevoerd om experimenteel vast te stellen of doorslag van het duplex slagpijpje naar de overdrachtslading mogelijk is in een ongewapende M6-N schokbuis en of hierbij de detonatieketen volledig in gang wordt gezet.

M6-N schokbuizen zijn zodanig aangepast dat initiatie van het duplex slagpijpje in ongewapende stand kan worden gerealiseerd. Er zijn twee initiatiemethoden gebruikt: met een detonatiekoord of door mechanische initiatie met een slagpin. Vijf experimenten zijn uitgevoerd bij een temperatuur van ongeveer 12 °C; drie waarbij de schokversterker is vervangen door een aluminium dop en twee met een originele schokversterker.

Op basis van het experimentele onderzoek wordt geconcludeerd dat:

- In elk van de vijf doorslagtesten, initiatie van het duplex slagpijpje in de ongewapende stand leidt tot een reactie van de overdrachtslading, ongeacht de gebruikte initiatiemethode,
- In de twee testen met originele schokversterker, de overdrachtslading een uitwerking heeft gehad op de schokversterker, maar deze niet tot detonatie heeft gebracht.

Visuele inspectie van de afsluitplaten na de doorslagtesten levert:

- Een sterke gelijkenis in het schadebeeld van de bovenzijde van de afsluitplaat uit het ongeval en uit de experimenten,
- Vergelijkbare restanten van het cupje van de overdrachtslading in het centrale gat van de afsluitplaat uit het ongeval en de restanten die zijn achtergebleven in de explosieve lading van de schokversterker uit de experimenten.

Deze inspectie verifieert de hypothese dat het duplex slagpijpje ten tijde van het ongeval zeer waarschijnlijk in de ongewapende stand stond.

De testresultaten zijn vergeleken met de pass/fail criteria voor de "train interruption test" of doorslagtest volgens de Allied Ordnance Procedure (AOP) 20 conform de NATO Standardization Agreement (STANAG) 4157).

De experimenten resulteren in een NO PASS voor de afsluitplaat (als train interruptor) in de M6-N schokbuis op basis van de waargenomen (en volgens de AOP-20 niet toegestane):

- Reactie van de overdrachtslading,
- Lokale verkleuring van de booster springstof,
- Metalen fragmenten in de boosterspringstof.

In de twee testen met schokversterker in de ongewapende stand was de output van het duplex slagpijpe onvoldoende om de overdrachtslading tot een (volledige) detonatie te brengen die krachtig genoeg is om de schokversterker te initiëren. Vanwege het beperkte aantal testen en de geconstateerde variatie in de vorm en diepte van de afdruk in de afsluitplaat door de initiatie van het slagpijpe, kan niet worden geconcludeerd dat doorslag *met* initiatie van de schokversterker altijd en onder alle temperatuurcondities wordt voorkomen.

De in dit rapport beschreven doorslagtesten zijn uitgevoerd bij een temperatuur van ongeveer 12°C. Hoewel doorslag naar de overdrachtslading is geconstateerd in alle testen kan niet worden geconcludeerd dat het ontwerp van de schokbuis onveilig is omdat de schokversterker niet tot detonatie is gekomen bij initiatie van het duplex slagpijpe in de ongewapende stand. Mogelijk vindt doorslag *met* initiatie van de schokversterker wel plaats bij een verhoogde temperatuur, bijvoorbeeld boven de door de leverancier gespecificeerde maximale gebruikstemperatuur van 50 °C. Vervolgonderzoek naar de invloed van verhoogde temperatuur wordt geadviseerd.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	5
1.1	Achtergrond	5
1.2	Doelstelling	5
1.3	Opbouw rapport	5
2	Schokbuis doorslagtesten	6
2.1	Achtergrond	6
2.2	Initiatie van het duplex slagpijpje	9
2.3	Testprogramma	12
2.4	Testopstelling	12
3	Resultaten	15
3.1	Initiatie door detcord	15
3.2	Initiatie door slagpin	16
3.3	Analyse resultaten en discussie	19
4	Conclusies en aanbeveling	26
5	Referenties	28
6	Ondertekening	29
	Bijlage(n)	
	A Inleidende testen non-disruptive detonating cord	
	B Initiatietesten duplex slagpijpje	
	C Design principles	

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Naar aanleiding van het dodelijk ongeval tijdens een mortiergranaatoefening in Mali op 6 juli 2016, heeft de Onderzoeksraad Voor Veiligheid (OVV) een aantal technische vragen geformuleerd en voorgelegd aan TNO. In fase 1 van het onderzoek is, op basis van de beschikbare informatie en restanten, geconcludeerd dat het ongeval is veroorzaakt door het prematuur detoneren van de bij het ongeval geladen 60 mm High Explosive (HE 80) mortiergranaat [1].

In fase 2 van het onderzoek is bijzondere aandacht uitgegaan naar de versnellingen die nodig zijn om de schokbuis te wapenen. Uit dit onderzoek is geconcludeerd dat accidentele wapening van de schokbuis tijdens opslag en transport zeer onwaarschijnlijk is [2]. Ook heeft analyse van de klimatologische omstandigheden aangetoond dat de temperatuurbelasting op de munitie tijdens de missie in Mali mogelijk invloed heeft gehad op de energetische materialen in de schokbuis [3].

Tegelijk heeft microscopisch onderzoek in fase 2 naar de afsluitplaat van de bij het ongeval betrokken schokbuis, uitgewezen dat het slagpijpje de overdrachtslading heeft geïnitieerd en niet andersom. Lokale schade aan de bovenzijde van de afsluitplaat levert een sterke aanwijzing dat het duplex slagpijpje is gedetoneerd in de ongewapende stand van de schokbuis [4].

Op basis van de opgedane kennis is er voor gekozen in fase 3 van het onderzoek de mogelijkheid tot doorslag te bepalen van de energetische componenten in de M6-N schokbuis in ongewapende stand. Dit rapport beschrijft de aanpak en de resultaten van dit onderzoek.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van het onderzoek is om experimenteel vast te stellen of doorslag van het duplex slagpijpje naar de overdrachtslading mogelijk is in een ongewapende M6-N schokbuis.

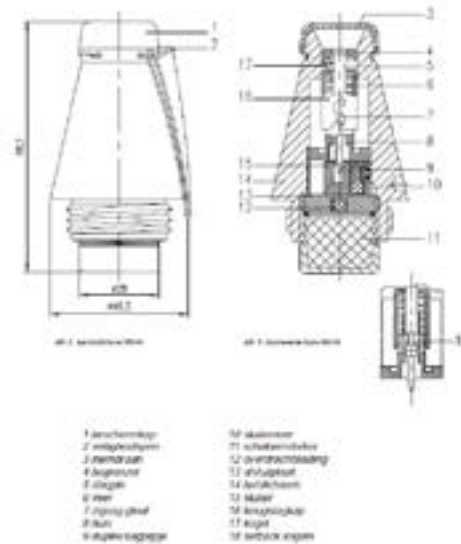
1.3 Opbouw rapport

Hoofdstuk 2 beschrijft enige achtergrond van de doorslagtesten en de opzet van het huidige testprogramma, in Hoofdstuk 3 worden de resultaten van het testprogramma gegeven en besproken. Hoofdstuk 4 bevat conclusies en aanbevelingen.

2 Schokbuis doorslagtesten

2.1 Achtergrond

Het veiligheidsmechanisme in schokbuis M6-N is zodanig ingericht dat in ongewapende stand het duplex slagpijpje (9) uit lijn staat, zie Figuur 1. Het is in dit geval onmogelijk dat de slagpin (5) het duplex slagpijpje raakt en initieert. Bij lancering van een mortiergranaat uit een schietbuis zorgt de versnelling voor wapening van de schokbuis waarbij het duplex slagpijpje in lijn wordt geplaatst met de slagpin en de overdrachtslading (12). Bij inslag op het doel initieert de slagpin het duplex slagpijpje die door (het dunne deel van) de afsluitplaat de overdrachtslading initieert, die de schokversterker (booster) initieert, die de hoofdlading initieert. Deze reeks van initiërende explosieve ladingen wordt aangeduid met "detonatieketen".



Figuur 1 Technische tekening van de M6-N schokbuis.

Door het in het ontwerp van de schokbuis opgenomen veiligheidsmechanisme zijn het duplex slagpijpje en de overdrachtslading van elkaar gescheiden door het staal van de afsluitplaat (13), zie Figuur 1. De horizontale afstand tussen de hartlijn van het duplex slagpijpje en het centrum van de afsluitplaat met overdrachtslading is ongeveer 6,8 mm. In fase 2 van het onderzoek naar de mogelijke oorzaak van het ongeval is aangetoond dat de schokbuis zeer waarschijnlijk heeft gefunctioneerd in ongewapende stand. Omdat bij het ongeval de hoofdlading is gedetoneerd, is het aannemelijk dat initiatie van het duplex slagpijpje de detonatieketen in gang heeft gezet in de ongewapende stand van de schokbuis. Het huidige onderzoek richt zich daarom op het veiligheidsmechanisme van de M6-N schokbuis.

2.1.1 STANAG 4187, 4157 en AOP-20

NATO landen hebben een aantal voorschriften opgesteld waaraan buizen moeten voldoen in het kader van de *Safety and Suitability for Service (S3) of Munitions, Explosives and Related Products*, d.w.z de geschiktheid en veiligheid in gebruik.

STANdardization AGreement STANAG 4187 [5] beschrijft ontwerp-eisen voor de veiligheid van buizen. STANAG 4157 [6] beschrijft de eisen aan buizen in de beoordeling van de *Safety and Suitability for Service*. Allied Ordnance Publication AOP-20 is de *Manual of Tests for the Safety Qualification of Fuzing Systems* [7]. Deze manual behoort direct bij STANAG 4157.

STANAG 4157 bevat een overzicht met zowel de verplicht uit te voeren testen aan buizen alsook aanbevolen testen. Er is een algemeen criterium opgenomen voor het voldoen aan STANAG 4157, namelijk: *"The general criterion for passing any of the mandatory and recommended tests is that an unsafe condition not be observed during the test or upon examination of the fuze after the test. Given the relative small sizes generally employed, one observed unsafe condition generally constitutes a failure. Depending upon the fuze or system design requirement, a small decrease in fuze performance may be acceptable, if safety is not affected; large degradations in fuze performance indicate that the fuze is not acceptable for service use. Pass/fail criteria are provided in AOP-20, where appropriate."* De verplichte testen staan weergegeven in Figuur 2. De schokbuis M6-N heeft een veiligheidsmechanisme en de *Explosive Train Interruption* is één van de verplichte testen.

MANDATORY TESTS		
1.	Explosive Train Interruption	For fuzes with interrupted explosive trains.
2.	No-Fire Threshold	For fuzes with electro-explosive devices.
3.	Safety Degressions Firing	For fuzes fitted to mortar and gun projectiles.
4.	Fuze Arming Distance	For fuzes for which an arming distance is required.
5.	Arming Delay Time	For fuzes for which an arming delay is required.
6.	Mortar Double-Loading	For all mortar fuzes, conducted on complete munition.
7.	Mortar Cook-Off	For gas-launched projectiles fitted to mortars.
8.	Electrostatic Discharge	For all fuzes with electro-explosive components, can be required for fuzes in both armed and unarmed configurations.
9.	RF Radiation	For all fuzes with electro-explosive components, can be required for fuzes in both armed and unarmed configurations.
10.	Jolt	For all portable fuzes transported separately.
11.	1.5 m Drop	For fuzes that are transported separately and for fuzes fitted to mortars in tactical configuration.
12.	12 m Drop	For fuzes or fuze assemblies, in logistic package configuration.
13.	Sequential Environmental Test Programs	See Para 7c of STANAG.
14.	Transportation Vibration	For base fuzes or fuzes installed in mortars, as defined by manufacturer for target scenarios.
15.	Transportation Vibration of Packaged Fuzes	
16.	Transportation Handling of Packaged Fuzes	

Note: The above tests are mandatory in the sense that they either must be performed, where applicable, or justification provided as to why they were not carried out.

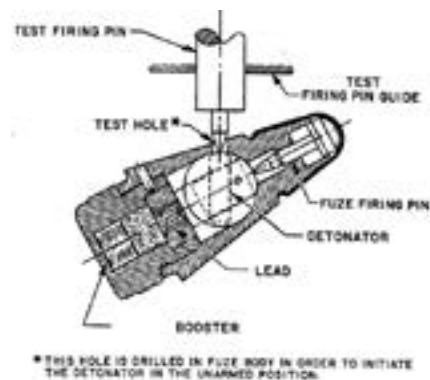
Figuur 2 Lijst met verplichte testen volgens STANAG 4157 ed. 2 [6].

Test D1 *Primary explosive component safety* in AOP-20 geeft de daadwerkelijk invulling aan de verplichte test voor explosive train interruption en wordt ook wel de train interruption test of doorslagtest genoemd. Deze test verifieert de werking van het veiligheidsmechanisme. Met andere woorden: bij deze test wordt het correct

onderbroken zijn van de detonatieketen van de buis in ongewapende stand, beproefd.

De criteria voor het passeren van de test zijn: *“There shall be no detonation, fragment penetration, perforation, burning, charring, scorching or melting of any explosive component after the explosive train interruption. There shall be no ejecta which could cause serious personnel injury or initiation of adjacent fuzes.”* [7].

Een typische testopstelling voor het uitvoeren van een doorslagtest staat in Figuur 3 afgebeeld. Een vergelijkbare opstelling is van toepassing op de schokbuis M6-N.



Figuur 3 Typische testopstelling voor een doorslagtest [7].

Aan de hand van de in AOP-20 voorgeschreven doorslagtest is voor de M6-N schokbuis een testprogramma opgesteld waarbij initiatie van het duplex slagpijpje in ongewapende stand in de M6-N schokbuis is gerealiseerd. De initiatie van het duplex slagpijpje, het testprogramma, en de beschrijving van de testopstelling, worden uiteengezet in paragrafen 2.2, 2.3 en 2.4.

2.1.2 Toepasbaarheid van de doorslagtest

Voor de toepasbaarheid van de doorslagtest uit de AOP-20 op de M6-N schokbuis in de Nederlandse situatie zijn een tweetal STANAG's van belang, zie Tabel 1. Voor de toepasbaarheid op de Nederlandse situatie moeten deze STANAG's geratificeerd zijn door Nederland, gepromulgeerd door de NATO, en uiteindelijk geïmplementeerd door Nederland¹.

Beide STANAG's zijn door Nederland in het begin van de jaren 2000 geïmplementeerd², al is de datum van implementatie van STANAG 4157 onbekend. Daarnaast zijn er twee eerdere edities van STANAG 4187 en een eerdere editie van STANAG 4157 in de loop van de vorige eeuw in werking getreden.

De AOP-20 is een *stand-alone* document, en wordt niet door individuele landen geratificeerd; de AOP-20 wordt gepromulgeerd met zijn cover STANAG 4157.

¹ Het standaardisatie proces binnen NATO staat beschreven in AAP-03 Production, Maintenance and Management of NATO Standardization Documents. De huidige versie is Edition J Version 3 van December 2015.

² Opgemerkt wordt dat Nederland voor STANAG 4157 'custodian' was; dit houdt in dat Nederland de leiding heeft gehad in het schrijven van de STANAG.

Tabel 1 Relevante STANAG's [5, 6] voor de doorslagtest, en ratificatie door Nederland.

STANAG	Editie	Titel	Van toepassing op	NLD per
4187	3 (2001)	Fuzing system – Safety design requirements	Ontwikkeling van nieuwe schokbuizen, waarbij de ontwikkeling is geïnitieerd na promulgatie	sep-01
4157	2 (2002)	Fuzing systems: Test requirements for the assessment of safety and suitability for service	Op schokbuizen waarvan de eisen van STANAG 4187 van toepassing zijn.	onbekend

De in de STANAG's vastgelegde *aim* en *agreement* zijn belangrijke paragrafen. Op het eerste gezicht lijken beide STANAG's niet relevant te zijn voor de schokbuis M6-N, omdat 1) STANAG 4187 met ontwerpeisen voor veiligheid van buizen van toepassing is op nieuw te ontwikkelen buizen na promulgatie van deze STANAG, en 2) de *aim* van STANAG 4157 is de beoordeling van buizen op welke de ontwerpeisen uit STANAG 4187 van toepassing zijn, te standaardiseren.

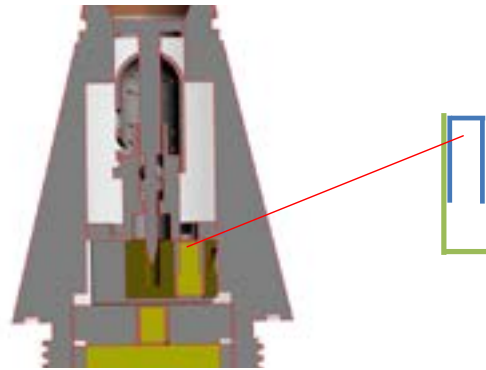
Echter, in de *agreement* van STANAG 4157 staat expliciet vermeld dat deze wordt toegepast op: "...the development and acquisition of fuzing systems commenced after promulgation..." [6].

Hieruit wordt geconcludeerd dat STANAG 4157 relevant is voor zowel de ontwikkeling als verwerving van buizen die gestart is na promulgatie van STANAG 4157.

De verwerving van de 60 mm mortier met de M6-N schokbuis is opgestart na promulgatie van STANAG 4157. Deze standaard lijkt daarom van toepassing op de verwerving van de schokbuizen M6-N op de 60 mm mortier, ook al is het ontwerp van de M6-N uit de vorige eeuw.

2.2 Initiatie van het duplex slagpijpje

Het duplex slagpijpje bestaat uit een tweetal kleine metalen hulsjes³ welke in elkaar zijn geschoven en waarvan het binnenste hulsje het mengsel met energetische materialen bevat, zie Figuur 4.



Figuur 4 Het duplex slagpijpje bestaat uit twee metalen hulsjes die in elkaar zijn geschoven.

³ Het binnenste hulsje dat de energetische materialen bevat bestaat uit aluminium. Het buitenste metalen hulsje is gemaakt van een koper-nikkel metaallegering (Melchior).

Om het duplex slagpijpe aan de bovenzijde te initiëren moet energie van buitenaf door een dun laagje metaal in het energetisch materiaal worden ingebracht. Er zijn in het testprogramma van vijf doorslagtesten twee methoden gebruikt om het duplex slagpijpe te initiëren.

2.2.1 *Initiatie door middel van non-disruptive detonating cord*

Voor de eerste twee experimenten is initiatie gerealiseerd m.b.v. een specifiek type slagsnoer, een *non-disruptive detonating cord* (detcord). Dit detcord bestaat uit een metalen buisje met een diameter van 2,3 mm gevuld met een explosieve stof. Aan het uiteinde van dit metalen buisje wordt een kleine booster (afm. 9,0 x 2,9 mm) geplaatst, zie Figuur 5, dat zorg draagt voor de uiteindelijke overdracht van energie en initiatie van het duplex slagpijpe.



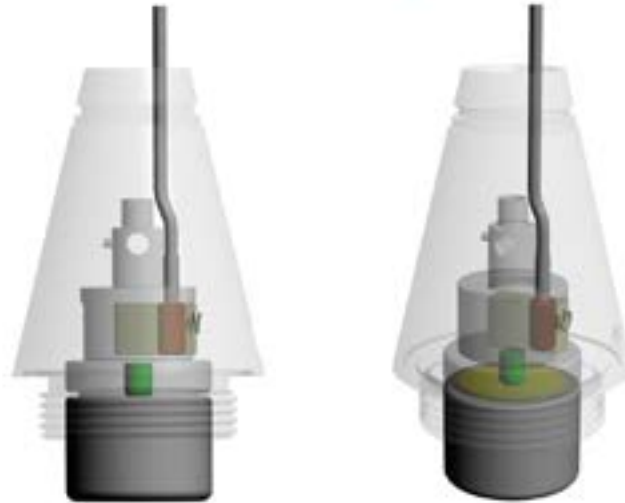
Figuur 5 Non-disruptive detonating cord (diameter 2,3 mm) met booster.

Een aantal voorbereidende experimenten is uitgevoerd om het correct initiëren van het duplex slagpijpe vast te stellen. Voor een juiste toepassing van dit detcord is het van belang dat de overgedragen energie enkel effect heeft op het duplex slagpijpe en niet op andere componenten in de schokbuis; een onbedoelde bijdrage aan de doorslag van de schokbuis in ongewapende stand moet worden voorkomen.

De voorbereidende experimenten hebben bevestigd dat de combinatie van het detcord en booster verwaarloosbare schade in radiële richting van het detcord veroorzaakt, en dat het detcord in staat is in axiale richting een duplex slagpijpe te initiëren. De combinatie van het detcord met booster wordt daarom geschikt geacht als initiatiebron bij de doorslagtesten. In Appendix A en B wordt in detail ingegaan op de voorbereidende experimenten.

Het detcord moet in de schokbuis worden gebracht met de booster gepositioneerd direct op de bovenzijde van het slagpijpe. Er is voor gekozen om het membraan (3), de slappin (5), veer (6) en terugslagkap (16) (zie Figuur 1) tijdens de eerste twee experimenten weg te laten. Hierdoor kan via de opening die daardoor aan de bovenzijde van de schokbuis ontstaat het detcord aangebracht worden tot boven het slagpijpe. De verwachting is dat het weglaten van deze onderdelen van de schokbuis het initiatiegedrag van het slagpijpe en de uitwerking daarvan op afsluitplaat en overdrachtslading niet zal beïnvloeden.

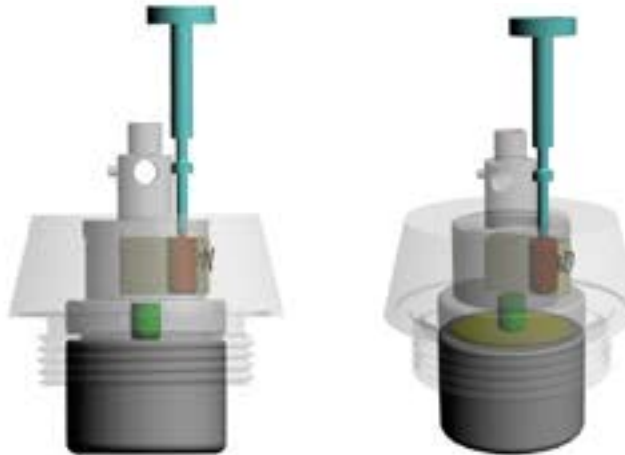
In het huis (8) is een klein gaatje aangebracht met een diameter gelijk aan de diameter van de booster van het detcord. De uiteindelijke positie van het detcord is in Figuur 6 weergegeven.



Figuur 6 Positionering van het detcord in de schokbuis M6-N (links: zijaanzicht, rechts: 3D beeld).

2.2.2 Mechanische initiatie door middel van slagpin

Bij normaal functioneren wordt het duplex slagpijpe geïnitieerd door inslag van de slagpin op de bovenzijde. Het indringen van de punt van de slagpin in het energetisch materiaal en de daarbij optredende wrijving, initiëren het slagpijpe. Er wordt geen (chemische) energie toegevoegd, zoals bij initiatie door het detcord wel het geval is.



Figuur 7 Geprepareerde schokbuis ten behoeve van mechanische initiatie (links: zijaanzicht, rechts: 3D beeld).

Voor uitvoering van de mechanische initiatie is naast het verwijderen van het membraan, de slagpin, veer en terugslagkap, ook het bovenste deel van de schokbuis behuizing weg gefreesd. De originele slagpin is vervolgens gebruikt voor initiatie van het slagpijpe door het in het huis aangebrachte gaatje, zie Figuur 7. De originele slagpin wordt gebruikt om een vergelijkbare vervormingsconditie van het duplex slagpijpe op te leggen als bij normaal functioneren van de granaat.

2.3 Testprogramma

TNO heeft de beschikking gekregen over 5 schokbuis behuizingen en de mechanische componenten van deze 5 schokbuizen. Daarnaast zijn in totaal 8 duplex slagpijpen, 8 overdrachtsladingen en 2 schokversterkers aangeleverd. Het testprogramma is weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2 Testprogramma doorslagtesten.

Test	Beschrijving	Initiatie	Overdrachtslading	Booster
-	Initiatietest duplex slagpijpe	Detcord	-	-
1	Doorslagtest	Detcord	Originele	Inert
2	Doorslagtest	Detcord	Originele	Inert
-	Initiatietest duplex slagpijpe	Slagpin	-	-
3	Doorslagtest	Slagpin	Originele	Inert
4	Doorslagtest	Slagpin	Originele	Originele
5	Doorslagtest	Slagpin	Originele	Originele

Twee slagpijpen zijn gebruikt ter verificatie dat initiatie van het slagpijpe wordt gerealiseerd door zowel het detcord als de slagpin met valgewicht (zie Appendices A en B). In totaal worden 5 daadwerkelijke doorslagtesten gedaan, waar experimenten 2 en 5 duplo's zijn van respectievelijk experimenten 1 en 4.

Alle testten zijn uitgevoerd bij omgevingstemperatuur. Opgemerkt wordt dat de experimenten in een bunker van TNO in Rijswijk zijn uitgevoerd in maart 2017. Temperaturen in de bunker zijn meestal rond de 12°C.

Om uit te sluiten dat het detcord bijdraagt aan doorslag van de schokbuis zijn de drie resterende experimenten uitgevoerd door een mechanische initiatie.

De laatste twee kolommen van Tabel 2 geven aan de aanwezigheid van een originele overdrachtslading bij de doorslagtesten en of er bij een originele dan wel inerte schokversterker (booster) is gebruikt. De inerte schokversterker bestaat uit een aluminium dop die op identieke wijze in de bodem van de schokbuis wordt geschroefd tegen de onderzijde van de afsluitplaat met overdrachtslading.

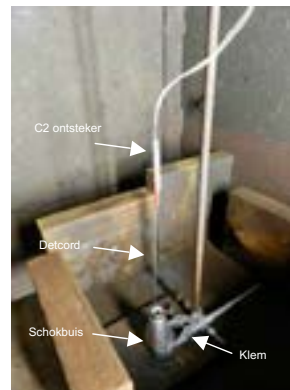
In eerste instantie is er gekozen voor een inerte schokversterker vanuit het oogpunt van veiligheid. Een tweede reden hiervoor is dat bij detonatie van de schokversterker zo'n 37 gram RDX detoneert; dit zal veel schade veroorzaken aan de schokbuis die belangrijke details (schadepatroon, vervorming etc.) kan maskeren. De aluminium dop kan ook dienen als getuige voor een mogelijke reactie van de overdrachtslading.

2.4 Testopstelling

Alle doorslagtesten zijn uitgevoerd in een bunker op het terrein van TNO in Rijswijk.

2.4.1 *Initiatie door middel van detcord*

In de werkplaats van de bunker worden de schokbuizen geassembleerd, zoals aangegeven in Figuur 6. Het detcord is 260 mm lang en steekt ruim uit boven de punt van de schokbuis. De schokbuis wordt in een laboratoriumklem vastgehouden op de schroefdraad waarmee de schokbuis normaliter in de hoofdflading wordt geschroefd. De schokbuis wordt in verticale positie geplaatst, met de punt naar boven wijzend. De bodem van de schokbuis staat op een stalen ondergrond. Ook op het uiteinde van het detcord dat uit de schokbuis steekt wordt een kleine booster geplaatst. Hierop wordt een elektrische ontsteker C2 met tape bevestigd. Deze C2 ontsteker is verbonden met een lange schietkabel die de schietmeester in staat stelt de C2 ontsteker buiten de bunker op afstand te ontsteken. Er is een eenvoudige camera opgesteld om van buiten de bunker het experiment te observeren.



Figuur 8 Testopstelling met initiatie door middel van een detcord.

2.4.2 *Initiatie door middel van slagpin*

Er is een eenvoudige testopstelling gemaakt om een valgewicht van ongeveer 1,7 kg te laten vallen bovenop de slagpin. De valhoogte die is gebruikt is ongeveer 1 m. Deze valhoogte levert de juiste snelheid van het valgewicht op het moment dat deze de slagpin raakt; de resulterende snelheid van de slagpin is dan vergelijkbaar met de snelheid die deze bereikt bij een val van de mortiergranaat in de schietbuis, waarvan bekend is dat het duplex slagpijpe initieert en leidt tot detonatie van de hoofdflading [9].

De opstelling is zodanig uitgevoerd dat het valgewicht door twee stalen blokken aan weerszijden van de schokbuis wordt afgevangen en de slagpin maximaal 9 mm naar beneden in het slagpijpe kan worden gedrukt. Deze afstand kan de slagpin bij normaal functioneren (in een gewapende schokbuis) ook afleggen.

Een metalen pen is door de bovenzijde van de koker gestoken en dient als beveiliging voor de val van het gewicht. Een lang touw is aan de metalen pen verbonden en stelt de schietmeester in staat om van buiten de bunker de pen uit de koker te trekken en hiermee het valgewicht door de koker naar beneden te laten vallen op de slagpin.



Figuur 9 Testopstelling met mechanische initiatie. Een valgewicht van ongeveer 1,7 kg valt na verwijderen van de veiligheidspin door een koker op de slaggpin.

Er is een eenvoudige camera opgesteld bij experiment 3. Bij experimenten 4 en 5 is een hogesnelheidscamera geplaatst met een framesnelheid, ingesteld op 5000 frames per seconde, om van buiten de bunker het experiment te kunnen observeren en vastleggen.

3 Resultaten

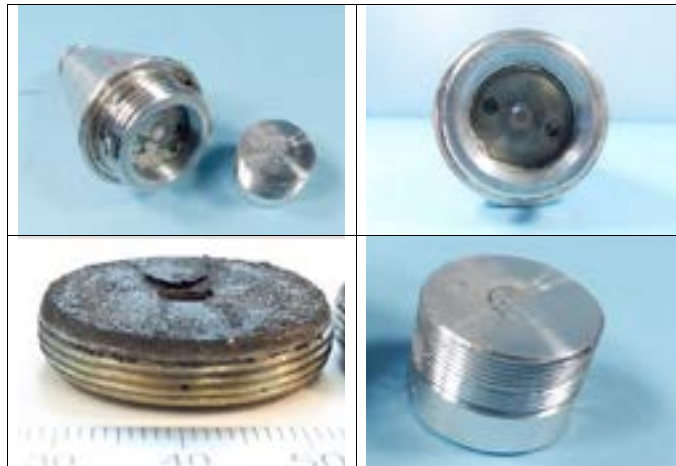
3.1 Initiatie door detcord

De eerste twee experimenten zijn uitgevoerd met een detcord. In beide experimenten is een inerte aluminium dop aanwezig op de plaats van de booster. De experimenten met initiatie door het detcord worden uitgevoerd met de in paragraaf 2.4.1 beschreven testopstelling.

Experiment 1

Na het experiment zit de schokbuis nog steeds ingeklemd in de testopstelling. Aan de buitenzijde van de schokbuis zijn geen beschadigingen te zien. De aluminium dop zit vastgeslagen in de schroefdraad van de buis, en moet met kracht worden gedemonteerd.

Na verwijderen van de dop wordt de onderzijde van de afsluitplaat zichtbaar. Deze vertoont sporen van expansiegassen. Op de positie van de overdrachtslading is enkel nog een dun, rond stukje metaal aanwezig. Dit blijkt de bodem van het cupje van de overdrachtslading te zijn. De explosieve lading van de overdrachtslading is verdwenen. Het metaal van de afsluitplaat boven de overdrachtslading is weggeslagen. Er heeft dus doorslag plaatsgevonden tussen het duplex slagpijpje en de overdrachtslading. De aluminium dop laat een lichte indeuking zien, veroorzaakt door de reactie van de overdrachtslading. In Figuur 10 zijn enkele foto's van de schokbuis na het experiment gegeven.



Figuur 10 Enkele foto's van experiment 1, van linksboven met de klok mee: schokbuis na het experiment en verwijderen van de aluminium dop; onderzijde afsluitplaat met restant cupje overdrachtslading; afdruk aluminium dop; doorgeslagen afsluitplaat met indeuking ter plaatse van duplex slagpijpje.

Na afloop van het experiment is de schokbuis verder gedemonteerd. De bovenzijde van de afsluitplaat laat een duidelijke afdruk zien ter plaatse van het uit lijn geplaatste duplex slagpijpje.

Experiment 2

Ook experiment 2 laat doorslag zien van het duplex slagpijpje naar de overdrachtslading. Deze doorslag is direct na het experiment duidelijk te zien. De schokbuisbehuizing is namelijk door initiatie uit de laboratoriumklem geslagen de bunker ruimte in. De kracht van initiatie en overdracht heeft er voor gezorgd dat de aluminium dop door de schroefdraad heen uit de behuizing is losgeslagen. De dop is op een andere plek in de bunker teruggevonden. De onderzijde van de afsluitplaat is direct zichtbaar en vertoont nu ook sporen van expansiegassen. Het centrale gat in de afsluitplaat is open, er bevinden zich geen restanten van de overdrachtslading meer in het gat en het metaal boven de overdrachtslading is weggeslagen. De bovenzijde van de afsluitplaat laat een duidelijke afdruk zien ter plaatse van het duplex slagpijpje. Ook nu laat de aluminium dop een lichte indeuking zien, veroorzaakt door de reactie van de overdrachtslading. Figuur 11 toont enkele foto's van de schokbuis na het experiment.



Figuur 11 Enkele foto's van experiment 2, van linksboven met de klok mee: schokbuis na het experiment; onderzijde afsluitplaat; afdruk aluminium dop; doorgeslagen afsluitplaat met indeuking ter plaatse van duplex slagpijpje.

3.2 Initiatie door slagpin

De experimenten met de mechanische initiatie met behulp van de slagpin worden uitgevoerd met de in paragraaf 2.4.2 beschreven testopstelling. In experiment 3 wordt de aluminium dop nog eenmaal gebruikt. Experimenten 4 en 5 worden met een originele schokversterker uitgevoerd.

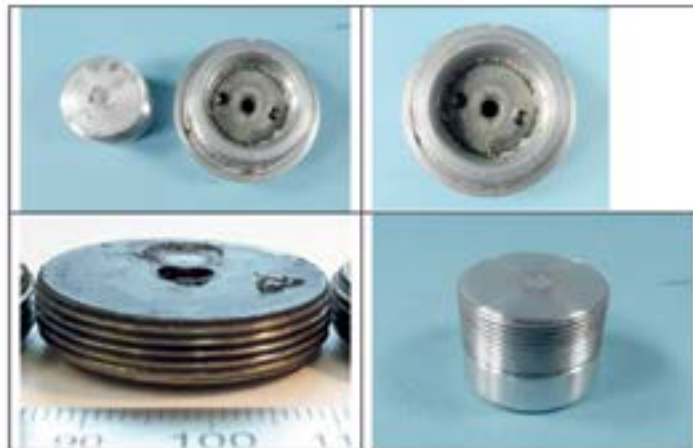
Experiment 3

Het eerste experiment met de mechanische initiatie en een inerte schokversterker levert een vergelijkbaar resultaat als experimenten 1 en 2. De aluminium dop zit na afloop van het experiment nog aan de behuizing van de schokbuis. De dop vertoont een lichte indeuking door reactie van de overdrachtslading.

Na verwijderen van de dop wordt de indeuking ter plaatse van het duplex slagpijpe zichtbaar en is doorslag geconstateerd tussen het duplex slagpijpe en de overdrachtslading.

In het centrale gat van de afsluitplaat worden geen restanten gevonden van de overdrachtslading en het metaal boven de overdrachtslading is weggeslagen.

Figuur 12 toont enkele foto's van de schokbuis na het experiment.



Figuur 12 Enkele foto's van experiment 3, van linksboven met de klok mee: schokbuis na het experiment; onderzijde afsluitplaat; afdruk aluminium dop; doorsgeslagen afsluitplaat met indeuking ter plaatse van duplex slagpijpe.

Experiment 4

In dit experiment wordt een originele schokversterker gebruikt. Doel van dit experiment is om vast te stellen of de doorslag tussen het duplex slagpijpe naar de overdrachtslading wordt opgevolgd met een reactie van de schokversterker. De schokversterker is immers de een na laatste stap in de detonatieketen die uiteindelijk (bij normaal functioneren) moet zorgdragen voor detonatie van de hoofdloading.

Na het experiment is vastgesteld dat de schokversterker niet tot detonatie is gekomen. De houder van de RDX lading is nog intact. De schokversterker zit nog verbonden aan de behuizing van de schokbuis. Na verwijderen van de schokversterker laat de bovenzijde van de schokversterker schade als gevolg van de reactie van de overdrachtslading zien, zie Figuur 13, rechtsonder. De bodem van het cupje van de overdrachtslading is in het RDX geslagen en is daar achtergebleven. Deze heeft een redelijke krater geslagen in het RDX. Op de bovenzijde van de schokversterker bevinden zich nog restanten van het (deels verbrande) stukje karton⁴ dat bij assemblage tussen schokversterker en afsluitplaat wordt geplaatst.

⁴ Een stukje karton bevindt zich standaard in een M6-N schokbuis, maar wordt niet vermeld in Figuur 1.

De overige componenten van de schokbuis vertonen vergelijkbare resultaten als bij experimenten 1 en 2. Er worden geen restanten van de overdrachtslading aangetroffen, de onderzijde van de afsluitplaat vertoont sporen van expansiegassen.

Ook is het metaal in de afsluitplaat boven de overdrachtslading door de doorslag tussen duplex slagpijpje en overdrachtslading weggeslagen. Figuur 13 toont enkele foto's van de schokbuis na het experiment.



Figuur 13 Enkele foto's van experiment 4, van linksboven met de klok mee: schokbuis na het experiment; onderzijde afsluitplaat met restant cupje overdrachtslading; afdruk bodem cupje overdrachtslading in schokversterker; doorgeslagen afsluitplaat met indeuking ter plaatse van duplex slagpijpje.

De high-speed video die van het experiment is gemaakt vertoont geen bijzonderheden. Zodra de slagpin wordt ingedrukt door het valgewicht initieert het duplex slagpijpje instantaan.

Experiment 5

Het resultaat van experiment 5 is vergelijkbaar met het resultaat van experiment 4. Er wordt geen detonatie van de schokversterker geconstateerd. De houder van de schokversterker is nog intact en de schokversterker zit nog aan de behuizing van de schokbuis verbonden. Na verwijderen vertoont de bovenzijde van de schokversterker schade als gevolg van de reactie van de overdrachtslading. Het karton is compleet verdwenen. De bodem van de overdrachtslading is ingeslagen op het RDX van de schokversterker, al is de indrukking beduidend kleiner dan bij experiment 4. De bodem van het cupje van de overdrachtslading is in het RDX achter gebleven, zie Figuur 14, rechtsonder.

Er is een duidelijke indeuking in de afsluitplaat ter plaatse van het duplex slagpijpje, maar de vorm is anders in vergelijking tot de andere experimenten. Doorslag van het duplex slagpijpje naar de overdrachtslading is wederom geconstateerd.

Op de beelden van de hogesnelheidscamera waren geen bijzonderheden te zien.



Figuur 14 Enkele foto's van experiment 5, van linksboven met de klok mee: schokbuis na het experiment; onderzijde afsluitplaat met restant cupje overdrachtslading; afdruk bodem cupje overdrachtslading in schokversterker; doorgeslagen afsluitplaat met indeuking ter plaatse van duplex slagpijpe.

3.3 Analyse resultaten en discussie

3.3.1 Analyse afsluitplaten

Na afloop van de experimenten zijn de vijf schokbuizen gedemonteerd. De vijf afsluitplaten zijn naast elkaar geplaatst in Figuur 15. Deze vertonen heel duidelijk een afdruk veroorzaakt door de reactie van het duplex slagpijpe. Al is er een lichte variatie in de vorm en diepte van de afdruk te onderscheiden, vastgesteld wordt dat de wijze van initiatie (detcord vs. mechanisch) geen duidelijk verschil in indeuking veroorzaakt.

Figuur 15 toont ook duidelijk dat het metaal in het centrale gat bij elk van de vijf afsluitplaten is weggeslagen. Het duplex slagpijpe heeft in sommige gevallen ook vervorming veroorzaakt tot aan (de rand van) het centrale gat.



Figuur 15 Afsluitplaten van de vijf experimenten (v.l.n.r. experiment 1 t/m 5).

De experimenten maken het mogelijk om het schadebeeld te vergelijken tussen de afsluitplaten uit dit onderzoek en die uit de schokbuis van het ongeval. De schade aan deze afsluitplaat is eerder geanalyseerd in [4].

In Figuur 16 zijn de afsluitplaat van het ongeval (links) en die van experiment 3 (rechts) naast elkaar geplaatst. De afsluitplaat van het ongeval waarbij de volledige mortiergranaat is gedetoneerd, is niet perfect rond. De doorslagtesten zijn uitgevoerd met het duplex slagpijpje in de ongewapende stand. Nu een vergelijkbare indeuking in de afsluitplaat (A) is aangetoond, kan met zekerheid worden gesteld dat het duplex slagpijpje in de mortiergranaat van het ongeval een brisante uitwerking op de afsluitplaat heeft gehad. Opvallend is ook het effect van initiatie van het duplex slagpijpje op de rand van het centrale gat, daar is een kleine opstaande rand (B) te herkennen, zowel in de afsluitplaat van het ongeval als die van experiment 3.

Op basis van deze vergelijking is de hypothese in [4] dat het duplex slagpijpje ten tijde van het ongeval in ongewapende stand stond geverifieerd.



Figuur 16 Vergelijk tussen de afsluitplaat van de schokbuis van het ongeval (links) en de afsluitplaat uit de schokbuis van experiment 3 (rechts).

3.3.2 Analyse

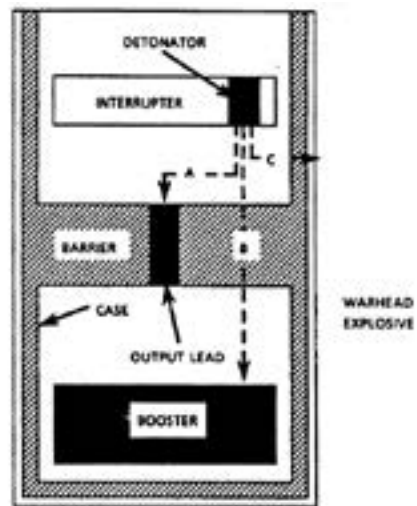
Experimenten zijn uitgevoerd met een drietal inerte en een tweetal originele schokversterkers, zie Figuur 17. De indeuking in het aluminium onder de overdrachtsslading duidt op de brisante werking van deze lading. Er is een variatie in indeuking zichtbaar met grootste indeuking bij experiment 2. Ook de indeuking van de originele schokversterker is duidelijk verschillend met grootste indeuking bij experiment 4.



Figuur 17 Uitwerking op boosters met van links naar rechts experiment 1 t/m 5. Drie aluminium doppen als inerte booster in linker foto en twee originele boosters in rechter foto.

Hoewel de uitwerking van zowel het duplex slagpijpe als van de overdrachtslading verschillend zijn in de experimenten, is het resultaat een cilindersymmetrische indeuking van de (inerte of originele) schokversterker.

De meest waarschijnlijke route van de ongewenste initiatie van de overdrachtslading lijkt daarom te zijn: overdracht van de schokgolf van het duplex slagpijpe door de afsluitplaat naar de overdrachtslading (route A in Figuur 18). De (kortste) afstand tussen duplex slagpijpe en overdrachtslading en/of dikte van het metaal boven de overdrachtslading zijn onvoldoende om een reactie van de overdrachtslading te voorkomen. Er heeft geen overdracht van de schokgolf van het duplex slagpijpe door de afsluitplaat naar de schokversterker plaatsgevonden (route B in Figuur 18). De dikte van de afsluitplaat lijkt voldoende te zijn om dit te voorkomen.



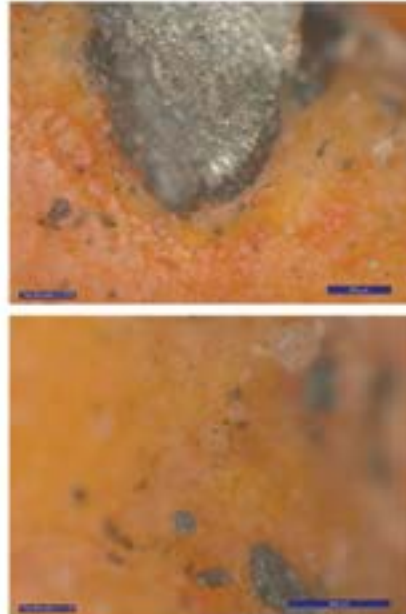
GAPS BETWEEN COMPONENTS ARE EXAGGERATED FOR CLARITY

Figuur 18 Drietal mogelijke routes voor schokgolfoverdracht van uit lijn geplaatste detonator. Route A is van detonator naar overdrachtslading (lead), route B is via afsluitplaat (barrier) naar schokversterker (booster), en route C is rechtstreeks van detonator naar hoofdvlading (en alleen van toepassing voor een in de hoofdvlading ingebouwde buis [6]).

Met lichtmicroscopie is naar het oppervlak van de schokversterker gekeken, zie Figuur 19. In de bovenste foto zijn lokale kleurverschillen⁵ aan de randen van de krater in de schokversterker zichtbaar en nabij de inslag van een relatief groot metallisch fragment.

Tevens zijn er bolvormige deeltjes aanwezig met een typische diameter van 150 tot 250 μm (Figuur 19, onder) met in het oppervlak minuscule metalen deeltjes. Dit zijn indicaties dat de schokversterker (lokaal) een thermische belasting heeft ondergaan.

⁵ RDX heeft geen oranje of rode kleur. Het gebruik van een was voor het persen van een granulaat tot booster met de gewenste dichtheid wordt verondersteld.



Figuur 19 Experiment 4; kleurverschillen in oppervlak booster nabij een metallisch fragment (boven), en bolvormige, redelijk transparante deeltjes met kleine metalische fragmenten in het oppervlak (onder).

De bodem van het cupje van de overdrachtsslading is in de schokversterker achtergebleven. In dit kader wordt nogmaals verwezen naar [4]. In het centrale gat van de afsluitplaat van het ongeval was de wand van het cupje van de overdrachtsslading nog aanwezig. De onderrand van dit restant toonde aan dat de bodem van het cupje naar beneden is weggeslagen, zie Figuur 20 links. De overeenkomst met het restant van de bodem van het cupje in de schokversterker is helder, zie Figuur 20 rechts.



Figuur 20 Links: centrale gat van afsluitplaat van het ongeval met restant cupje overdrachtsslading [4]. Rechts: restant van de bodem van het cupje van de overdrachtsslading in de booster na experiment 5.

3.3.3 Discussie

Bij normaal functioneren bestaat de initiatietrein in de M6-N schokbuis uit vier stappen, namelijk:

1. Initiatie en detonatie van het duplex slagpijpje,
2. Initiatie en detonatie van de overdrachtslading met overdracht naar de schokversterker,
3. Initiatie en detonatie van de schokversterker met versterking van de schok richting de hoofdloading,
4. Initiatie en detonatie van de hoofdloading.

De resultaten van de doorslagtesten tonen aan dat doorslag plaatsvindt tussen stap 1 en 2; ook in ongewapende stand initieert de overdrachtslading bij initiatie van het duplex slagpijpje. Tijdens de doorslag testen is initiatie van de originele schokversterker door reactie van de overdrachtslading niet opgetreden (en zou een gekoppelde hoofdloading niet tot detonatie zijn gekomen). In deze testen was de output van een uit lijn staand duplex slagpijpje dus onvoldoende om de overdrachtslading tot een (volledige) detonatie te brengen die krachtig genoeg is om de schokversterker te initiëren. Vanwege het beperkte aantal testen en de geconstateerde variatie in de vorm en diepte van de afdruk in de afsluitplaat door de initiatie van het slagpijpje, kan niet worden geconcludeerd dat doorslag *met* initiatie van de schokversterker onder alle condities wordt voorkomen. Met name het verschil in temperatuur van de energetische ladingen in de mortiergranaat tussen de experimenten en die tijdens het ongeval, maakt deze conclusie onmogelijk zonder additioneel onderzoek.

De resultaten van de doorslagtesten maken een vergelijking mogelijk met de criteria in AOP-20 D1.3.1 voor het passeren van de doorslag test: *“There shall be no detonation, fragment penetration, perforation, burning, charring, scorching, or melting of any explosive component after the explosive train interruption. There shall be no ejecta which could cause serious personnel injury or initiation of adjacent fuzes. Smudging of the surfaces or fragment penetration of the explosive components after the interrupter, as well as indentation of their containers, is not, in itself, a sufficient cause for stating that the fuze has failed”* [7].

Relevante delen uit dit criterium worden besproken.

- *“There shall be no detonation of any explosive component after the explosive train interruption”*
 - Er is geen detonatie van de schokversterker waargenomen,
 - Het type reactie van overdrachtslading is onbekend, er is in geen van de vijf experimenten een overdrachtslading teruggevonden. Wel is er een zekere indeuking in de aluminium doppen c.q. inslag in het RDX van de booster waargenomen. De indeuking in het aluminium duidt op een brisante werking door een explosieve stof (van de overdrachtslading) in de directe nabijheid.
- *“There shall be no fragment penetration of any explosive component after the explosive train interruption”*
 - Het metaal van de afsluitplaat boven de overdrachtslading is verdwenen en is mogelijk versneld in de overdrachtslading,
 - De onderzijde van het cupje van de overdrachtslading is versneld en in de schokversterker geslagen,

- Er zijn kleine fragmentdeeltjes zichtbaar in de schokversterker, met name bij experiment 4, de eerste test met originele booster. Ook bij experiment 5 is een metallisch fragment te zien in een radiale scheur in de originele schokversterker.
- *“There shall be no perforation of any explosive component after the explosive train interruption”*
 - Het metaal van de afsluitplaat boven de overdrachtslading is verdwenen en is mogelijk versneld in de overdrachtslading,
 - De onderzijde van het cupje van de overdrachtslading is versneld en in de schokversterker geslagen (penetratie). Maar perforatie heeft niet plaatsgevonden.
- *“There shall be no burning, scarring, scorching or melting of any explosive component after the explosive train interruption”*
 - In geen van de vijf experimenten is de explosieve lading van de overdrachtslading teruggevonden. De overdrachtslading heeft gereageerd, al is het precieze reactietype⁶ niet bekend,
 - De fel oranje verkleuring van het energetisch materiaal in de schokversterker bij experiment 4 duidt er mogelijk op dat de was is gesmolten. De schokversterker bestaat uit RDX, maar aangenomen wordt dat deze gemengd is met was. De was wordt verondersteld, omdat RDX wit of transparant is van kleur en de schokversterkers oranje kleuren.
- *“There shall be no ejecta which could cause serious personnel injury or initiation of adjacent fuzes”*
 - De schokbuis in experiment 2 is in zijn geheel gelanceerd. Resulterende initiatie van een aangrenzende schokbuis lijkt onwaarschijnlijk maar persoonlijk letsel kan niet worden uitgesloten.

De voorgaande beschouwing is samengevat in Tabel 3.

Tabel 3 Overzicht met PASS/FAIL voor de M6-N schokbuis volgens AOP-20 criteria.

	AOP-20 criterium (after the explosive train interruption)				
	<i>There shall be no detonation of any explosive component</i>	<i>There shall be no fragment penetration of any explosive component</i>	<i>There shall be no perforation of any explosive component</i>	<i>There shall be no burning, scarring, scorching or melting of any explosive component</i>	<i>There shall be no ejecta which could cause serious personnel injury or initiation of adjacent fuzes</i>
M6-N afsluitplaat					
Beoordeling	Inconclusive	Fail	Inconclusive	Fail	Inconclusive

⁶ De reactietypen kunnen variëren van detonatie, partiële detonatie, deflagratie, tot verbranding.

De experimenten resulteren in een NO PASS voor de afsluitplaat (als train interruptor) in de M6-N schokbuis op basis van de waargenomen (en volgens de AOP-20 niet toegestane):

- Reactie van de overdrachtslading,
- Lokale verkleuring van de booster springstof,
- Metalen fragmenten in de boosterspringstof.

4 Conclusies en aanbeveling

In dit project zijn doorslagtesten uitgevoerd om experimenteel vast te stellen of doorslag van het duplex slagpijpje naar de overdrachtslading mogelijk is in een ongewapende M6-N schokbuis en of hierbij de detonatieketen volledig in gang wordt gezet.

Op basis van het experimentele onderzoek wordt geconcludeerd dat:

- In elk van de vijf doorslagtesten, initiatie van het duplex slagpijpje in de ongewapende stand leidt tot een reactie van de overdrachtslading, ongeacht de gebruikte initiatiemethode,
- In de twee testen met originele schokversterker, de overdrachtslading een uitwerking heeft gehad op de schokversterker, maar deze niet tot detonatie heeft gebracht.

Visuele inspectie van de afsluitplaten na de doorslagtesten levert:

- Een sterke gelijkenis in het schadebeeld van de bovenzijde van de afsluitplaat uit het ongeval en uit de experimenten,
- Vergelijkbare restanten van het cupje van de overdrachtslading in het centrale gat van de afsluitplaat uit het ongeval en de restanten die zijn achtergebleven in de RDX schokversterker uit de experimenten.

Deze inspectie verifieert de hypothese dat het duplex slagpijpje ten tijde van het ongeval zeer waarschijnlijk in de ongewapende stand stond.

De testresultaten zijn vergeleken met de pass/fail criteria voor de "*train interruption test*" of doorslagtest volgens de Allied Ordnance Procedure (AOP) 20 conform de NATO Standardization Agreement (STANAG) 4157. De experimenten resulteren in een NO PASS voor de afsluitplaat (als train interruptor) in de M6-N schokbuis op basis van de waargenomen (en volgens de AOP-20 niet toegestane):

- Reactie van de overdrachtslading,
- Lokale verkleuring van de booster springstof,
- Metalen fragmenten in de boosterspringstof.

Het AOP-20 criterium *There shall be no detonation of any explosive component* kan niet worden getoetst omdat het reactietype van de overdrachtslading niet is vastgesteld. Het AOP-20 criterium *There shall be no perforation of any explosive component* kan niet worden getoetst omdat de richting van het weggeslagen metaal van de afsluitplaat onbekend is.

In de twee testen met schokversterker in de ongewapende stand was de output van het duplex slagpijpje onvoldoende om de overdrachtslading tot een (volledige) detonatie te brengen die krachtig genoeg is om de schokversterker te initiëren. Vanwege het beperkte aantal testen en de geconstateerde variatie in de vorm en diepte van de afdruk in de afsluitplaat door de initiatie van het slagpijpje, kan niet worden geconcludeerd dat doorslag *met* initiatie van de schokversterker altijd en onder alle temperatuurcondities wordt voorkomen.

De in dit rapport beschreven doorslagtesten zijn uitgevoerd bij een temperatuur van ongeveer 12°C. Hoewel doorslag naar de overdrachtslading is geconstateerd in alle testen, kan niet worden geconcludeerd dat het ontwerp van de schokbuis onveilig is omdat de schokversterker niet tot detonatie is gekomen bij initiatie van het duplex slagpijpje in de ongewapende stand.

Mogelijk vindt doorslag *met* initiatie van de schokversterker wel plaats bij een verhoogde temperatuur, bijvoorbeeld boven de door de leverancier gespecificeerde maximale gebruikstemperatuur van 50 °C.

De in dit rapport beschreven doorslagtesten zijn allemaal uitgevoerd bij een temperatuur rond de 12 °C. Aanbevolen wordt een aanzienlijke serie doorslagtesten uit te voeren op minimaal aangepaste schokbuizen in de veilige stand met schokversterker en bij verhoogde temperatuur tot 70 °C.

5 Referenties

1. E.J. Kroon, R.H.B. Bouma, P.A. Hooijmeijer, Ongeval mortieroefening Mali: Algemene technische onderzoeksvragen met betrekking tot de restanten, TNO 2016 R11512, 14 december 2016
2. R.H.B. Bouma, P.A. Hooijmeijer, E.J. Kroon, Ongeval mortieroefening Mali: Analyse van benodigde versnelling om schokbuis te wapenen, TNO 2017 R10160, 14 februari 2017
3. J.S. Henzing, E.J. Kroon, R.H.B. Bouma, P.A. Hooijmeijer, Ongeval mortieroefening Mali: Klimatologische omstandigheden en potentiële invloeden, TNO 2017 R10104, Maart 2017
4. P.A. Hooijmeijer, E.J. Kroon, R.H.B. Bouma, Microscopisch onderzoek afsluitplaat M6-N schokbuis, 17EM/0041, 27 januari 2017
5. STANAG 4187 PPS (Edition 3) Fuzing systems: Safety design requirements, NSA/1408-PPS/4187, 13 November 2001
6. STANAG 4157 PPS (Edition 2) Fuzing systems: test requirements for the assessment of safety and suitability for service, NSA/0514-PPS/4157, 13 May 2002
7. Allied Ordnance Publication AOP-20 edition 1, Manual of Tests for the Safety Qualification of Fuzing Systems, April 2002
8. F. Kienzler & K. Kautsch, High fuze reliability and safety today and in the future, 53rd Annual Fuze Conference, 2009
9. KCW&M, 2016 Projectrapport 60 mm mortier HE-80 CvO, KCW&M document nr 26240, versie d.d. 12-12-2016
10. AC/326 – CASG, The CNAD Ammunition Safety Group, P. Lamy, I. Carr, <http://imemg.org/wp-content/uploads/IM%20DAY%202013/session2-4-%20lan%20Carr.pdf>.
11. List of publicly available standards, NATO Standardization Documentation Database, <http://nso.nato.int/nso/nsdd/listpromulg.html>.

6 Ondertekening

Rijswijk, 5 april 2017

TNO Technical Sciences

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'P. Hendriksen', enclosed within a blue oval shape.

P. Hendriksen
Afdelingshoofd

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'P.A. Hooijmeijer', written in a cursive style.

P.A. Hooijmeijer
Projectleider

A Inleidende testen non-disruptive detonating cord

Inleiding

Enkele inleidende testen zijn gedaan voorafgaand aan de doorslag testen met non-disruptive detonating cord, met het doel vast te stellen dat het detcord geen ongewenste energie overdraagt aan de schokbuis en het resultaat van de doorslagtest niet negatief beïnvloedt. De inleidende testen beschouwen het effect van detonatie van het detcord in radiële richting, en het verschil van de uitwerking van detcord met en zonder booster. Verder dienen deze inleidende testen vast te stellen dat het detcord het duplex slagpijpe kan initiëren.

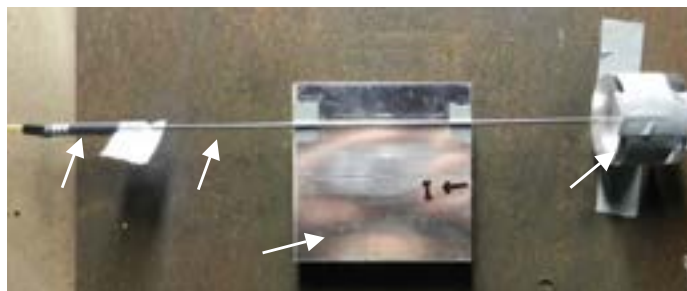
Experimenten

Het detcord⁷ bestaat uit een metalen pijpje met een lengte van 250 mm en een diameter van 2,3 mm. De soort explosieve lading in dit slagsnoer is onbekend. Op één uiteinde van het slagsnoer zit een kleine booster, een losse booster is beschikbaar om eventueel op het andere uiteinde te worden geplaatst. Deze boosters hebben een lengte van 9 mm en een diameter van 2,9 mm, zie Figuur 21.



Figuur 21 Booster aan het uiteinde van het non-disruptive detonating cord.

De uitwerking van het detcord in radiële richting, en het effect van het al dan niet gebruiken van een booster op het detcord, is in twee experimenten getest door het detcord tegen een aluminium plaatje te plakken en het uiteinde (één keer met en één keer zonder booster) tegen een PMMA cilinder te plaatsen, zie Figuur 22.



Figuur 22 Testopstelling om de uitwerking van het detcord te bepalen.

⁷ Miniature Non-Disruptive Detonating Cord, 40 lengths each 250 mm long 2.3 mm diameter. Batch 557 Manufactured DERA/FH. March 2000. Total NEC 3.0 gr.

De experimenten toonden aan dat de uitwerking van het detcord in radiële richting verwaarloosbaar klein is; het detcord laat een kleine groef achter op het oppervlak van het aluminium plaatje, het detcord zelf verscherft niet.

Figuur 23 toont de de uitwerking op een PMMA cilinder van het detcord met booster (links) en zonder booster (rechts). De uitwerking met booster is duidelijk krachtiger.



Figuur 23 Schade in PMMA cilinders als gevolg van ontsteken detcord met (links) en zonder (rechts) booster.

Dit verschil in uitwerking is tevens getest door het detcord met en zonder booster tegen de onderzijde van een C2 ontsteker te plaatsen, met de onderliggende gedachte dat het duplex slagpijpe te initiëren moet zijn. De bodemlading van het duplex slagpijpe zal "vergelijkbaar" zijn met de bodemlading van de C2 ontsteker; beide behoeven een voldoende schokgevoeligheid voor initiatie en een voldoende output voor het initiëren van een volgende lading in de detonatieketen. Het resultaat is weergegeven in Figuur 24. Het detcord zonder booster is slechts in staat de bodem van de C2 ontsteker te initiëren. De bodemlading van de C2 ontsteker detoneert niet, in tegenstelling tot het experiment waarbij het detcord met booster wordt gebruikt.



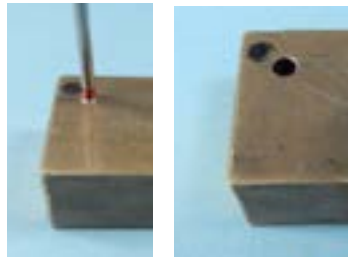
Figuur 24 Uitwerking van het detcord zonder booster (links) en met booster (rechts), geplaatst tegen de bodem van een C2 ontsteker.

Op basis van deze resultaten is besloten dat het detcord met booster een goede initiatiebron is om het duplex slagpijpe te initiëren, zonder daarbij ongewenste nevenschade te veroorzaken in de schokbuis.

B Initiatietesten duplex slagpijpe

De in Appendix A beschreven voorbereidende testen hebben geleid tot de selectie van het detcord met booster als initiatiebron voor het duplex slagpijpe. Voordat het detcord in een schokbuis is toegepast is initiatie van een duplex slagpijpe eerst los beproefd in een messing⁸ blokje.

Ter vergelijking is tevens de uitwerking van detcord met booster op het messing blokje bepaald. Een gaatje met de diameter van de booster van 2,9 mm en een diepte van 9 mm is in het messing blokje geboord, zie Figuur 25, links. Na afloop van het experiment is er geen vervorming zichtbaar. (N.B.: De afdruk linksboven het gat is veroorzaakt door het detcord dat door de uitwerking van de booster in het gat daarnaast op het oppervlak van het blokje tot stilstand is gekomen en daar wat verbrandingsproducten heeft achtergelaten.)



Figuur 25 Uitwerking detcord met booster verzonken in messing blokje; opstelling voor test (links) en resultaat na test (rechts).

Vervolgens is in het messing blokje een gat geboord met de afmetingen van het duplex slagpijpe. Het slagpijpe is in dit gat geplaatst en het detcord met booster is op de bovenzijde van het duplex slagpijpe geplaatst, zie Figuur 26.



Figuur 26 Detcord met booster geplaatst op de bovenzijde van het duplex slagpijpe dat verzonken is in messing blok.

⁸ Er is gekozen voor messing omdat de sluiters, waarin het duplex slagpijpe in de schokbuis is geplaatst, ook van messing is gemaakt.

Na detonatie van het detcord initieert het duplex slagpijpe. De uitwerking van het slagpijpe op het messing blokje is significant, zie Figuur 27. Daar waar de booster van het detcord geen vervorming liet zien van het gat waarin het in het messing blokje was geplaatst, vervormt het duplex slagpijpe het messing blokje substantieel en slaan er enkele fragmenten uit. Ook is de uitwerking in lengterichting van het slagpijpe duidelijk herkenbaar.

Op basis van een eenvoudige analyse op basis van het volume van het booster cupje van detcord in vergelijking tot het volume van het duplex slagpijpe wordt geschat dat de energieinhoud van de booster slechts 15% is van de energieinhoud van het duplex slagpijpe. Verwacht wordt dat de invloed van de uitwerking van de booster het resultaat van de doorslagtest niet negatief zal beïnvloeden.

Het detcord met booster aan het uiteinde is een goede initiatiebron van het duplex slagpijpe tijdens de doorslagtesten.



Figuur 27 Schade aan het messing blokje na detonatie van het duplex slagpijpe.

C Design principles

In STANAG 4187 [5] staan ontwerpeisen voor de veiligheid van buizen. Ook indien deze STANAG niet van toepassing is in de verwerving van een buis, wordt aanbevolen het ontwerp tegen de veiligheidseisen uit deze STANAG te houden. STANAG 4187 omschrijft namelijk een aantal veiligheidseisen welke van toepassing zijn op alle buizen. Specifiek voor moderne buizen is dat, waar mogelijk, van een tweetal omgevingsinvloeden in de wapeningscyclus van de buis gebruik wordt gemaakt. Deze omgevingsinvloeden dienen onafhankelijk van elkaar te zijn. In de M6-N schokbuis is er slechts één onafhankelijke omgevingsinvloed in gebruik en die is gebaseerd op versnelling/vertraging in de lengterichting van de mortiergranaat. Bij een getrokken loop is er de mogelijkheid om rotatie als andere en onafhankelijke omgevingsinvloed toe te passen. De 60 mm mortiergranaat wordt echter uit een gladde schietbuis verschoten, en rotatie lijkt niet aan de orde. Toch zijn er nieuwe munitieontwikkelingen gaande om ook voor buizen verschoten uit een gladde loop, te voorzien in een tweede, onafhankelijke omgevingsinvloed. Een recent voorbeeld hiervan is gegeven in [8], zie Figuur 28.

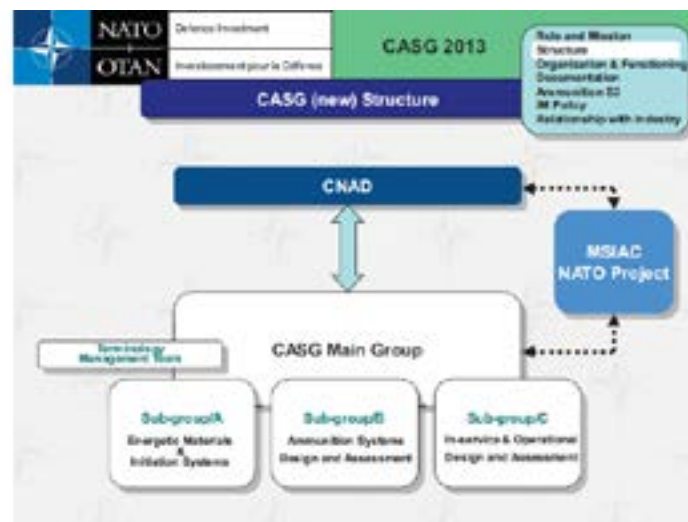


Figuur 28 Buis die slechts na het verkrijgen van snelheid in lucht een roterende beweging genereert, zie groene deel aan de bovenzijde van de buis met groeven geplaatst onder een hoek [8].

STANAG 4187 vereist ook de selectie van gekwalificeerde explosieve stoffen, waarbij specifiek naar de eisen voor lead en booster explosieven wordt verwezen. Voor zowel het primaire als booster explosief geldt dat de gevoeligheid gedurende de gehele levenscyclus niet significant mag toenemen voorbij het niveau waarvoor de toestemming voor operationeel gebruik is verkregen.

Specifiek voor buizen met een interrupted train benadrukt STANAG 4187, de effectiviteit te bepalen met *Explosive Train Interrupter Safety Tests* en *Progressive Arm Tests* uit STANAG 4157.

In paragraaf 2.1.1 is gerefereerd aan de *Safety and Suitability for Service (S3) of Munitions, Explosives and Related Products*. Binnen NATO valt de Safety and Suitability for Service onder AC/326, de Ammunition Safety Group van de Conference of National Armament Directors. De AC/326 stelt de standaarden op met eisen aan generieke munitie typen waaronder mortiergranaten, initiatiesystemen waaronder buizen, en energetische materialen, en stelt eveneens de standaarden op voor de uitvoering van testen, en de beoordeling van testen. Met name zijn van belang de documenten uit Sub-Group/B Ammunition Systems Design and Assessment, en SubGroup/A Energetic Materials & Initiation Systems, zie Figuur 29. Gepromulgeerde standaarden door NATO zijn te vinden op het publieke deel van de NATO website [11].



Figuur 29 Structuur van de CNAD Ammunition Safety Group [10].

Relevante en belangrijkste standaarden uit Subgroup B in relatie tot mortiergranaten zijn

- STANAG 4297, Edition 2, 2001, Guidance on the assessment of the safety and suitability for service of non-nuclear munitions for NATO armed forces.
- AOP-15, Edition 3, 2009, Guidance on the assessment of the safety and suitability for service of non-nuclear munitions for NATO armed forces.
- STANAG 4225, Edition 2, 2001, The safety evaluation of mortar bombs.
- STANAG 4433, Edition 1, 2001, Field mortar munitions, design safety requirements.

Relevante en belangrijkste standaarden uit Subgroup A, Initiation Systems team, in relatie tot mortiergranaten zijn

- STANAG 4187, Edition 4, 2006, Fuzing systems, safety design requirements.
- AOP-16, Edition 4, 2007, Fuzing systems: guidelines for STANAG 4187.

- STANAG 4157, Edition 3, 2017, Safety, arming and functioning (SAF) systems testing requirements.
- AOP-20, Edition B, Versions 1, 2017, Safety, arming and functioning systems manual of tests.
- STANAG 4363, Edition 3, 2013, Initiation systems: testing for the assessment of detonating explosive components.
- AOP-21, Edition 3, 2011, Initiation systems: characterization and safety test methods and procedures for detonating explosive components.

Relevante en belangrijkste standaarden uit Subgroup A, Energetic Materials team, in relatie tot mortiergranaten zijn

- STANAG 4170, Edition 3, 2008, Principles and methodology for the qualification of explosive materials for military use.
- AOP-7, Edition 2, 2003, Manual of data requirements and tests for the qualification of explosive materials for military use.
- STANAG 4147, Edition 2, 2001, Chemical compatibility of ammunition components with explosives (non-nuclear applications).

Naast NATO standaarden zijn er ook standaarden met design principles voor buizen in bijvoorbeeld de Verenigde Staten, o.a.

- MIL-STD-331, Fuze and fuze components, environmental and performance tests for
 - MIL-STD-1316, Fuze design, safety criteria for
- en Groot-Brittannië, o.a.
- DEF-STAN 13/131, Ordnance board safety guidelines for weapons and munitions.

ADDITIONEEL ONDERZOEK

TNO heeft in opdracht van de Onderzoeksraad een aantal tests en beknopte aanvullende onderzoeken uitgevoerd. Het doel was resterende vragen te beantwoorden en aanwijzingen te verzamelen die de plausibiliteit van diverse scenario's versterken dan wel ontkrachten.

Tot slot heeft literatuuronderzoek empirische gegevens opgeleverd waaruit blijkt dat vorming van koperazide onder invloed van vocht en warmte ook bij eerdere ongevallen met munitie een rol heeft gespeeld.

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 2017 R11053

**Ongeval mortieroefening Mali: additioneel
onderzoek**

Datum 12 september 2017
Auteur(s) E.J. Kroon, P.A. Hooijmeijer, R.H.B. Bouma, W. Duvalois

Aantal pagina's 44 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen 1
Opdrachtgever Onderzoeksraad voor Veiligheid
Projectnaam Oorzaak ongeval mortieroefening Mali
Projectnummer 060.29944

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

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.
© 2017 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	4
2	Doorslagtest bij 70 °C	5
2.1	Preparatie schokbuis	5
2.2	Testopstelling	5
2.3	Resultaat	6
2.4	Conclusie.....	7
3	Schokbuis test in gewapende stand.....	8
3.1	Testopstelling en - uitvoer	8
3.2	Schokbuis binnenwand	9
3.3	Slagpin	10
3.4	Sluiterhuis.....	10
3.5	Afsluitplaat.....	11
3.6	Conclusie.....	12
4	Alternatieve oorzaak van het ongeval	13
4.1	Chemische analyse	13
4.2	Speling op de slagpin	15
4.3	Conclusie.....	17
5	Zweet- en smelttesten TNT hoofdloading	18
5.1	Testopstelling	18
5.2	Resultaat	19
5.3	Conclusie.....	19
6	TNT exudaat test.....	20
6.1	Test uitvoer.....	20
6.2	Resultaat	22
6.3	Conclusie.....	23
7	Deflagratie tot Detonatie Transitie (DDT)	24
7.1	Resultaten	24
7.2	Conclusie.....	25
8	Degradatie/corrosie in M6-N schokbuis	26
8.1	Visuele inspectie schokbuis	26
8.2	SEM analyse	26
8.3	Conclusie.....	27
9	Temperatuurmetingen aan mortiergranaat	28
9.1	Uitvoering	28
9.2	Resultaat	29
9.3	Conclusie.....	29
10	Gevarenklasse HE80 mortiergranaat.....	30
10.1	Sympathische detonatie testen	30
10.2	Conclusie.....	31

11	Literatuuronderzoek	32
11.1	Typen koperaziden, kleur en detectie	32
11.2	Conditie voor de vorming van koperazide en gevoeligheid	32
11.3	Ongevallen als gevolg van koperazide.....	33
11.4	Conclusie.....	34
12	Referenties	35
13	Ondertekening	36
	Bijlage(n)	
	A Incidenten en ongevallen door koperazide	

1 Inleiding

In opdracht van de Onderzoeksraad voor Veiligheid (OVV) is door TNO aanvullend onderzoek uitgevoerd naar de oorzaak van het mortierongeval in Mali op 6 juli 2016. Dit rapport beschrijft de volgende (op zichzelf staande) onderwerpen van dit onderzoek:

- Doorslagtest M6-N schokbuis bij 70 °C;
- Schokbuis test in gewapende stand;
- Alternatieve oorzaak van het ongeval;
- Zweet- en smelttesten op de TNT hoofdflading;
- TNT exudaat test;
- Deflagratie tot Detonatie Transitie (DDT);
- Degradatie/corrosie in M6-N schokbuis;
- Temperatuurmetingen aan de mortiergranaat;
- Gevarenklasse HE80 mortier;
- Literatuuronderzoek.

2 Doorslagtest bij 70 °C

In [1] zijn resultaten van doorslagtesten bij 12 °C op de M6-N schokbuis gegeven in de ongewapende stand¹. Aangetoond is dat doorslag plaatsvindt van het duplex slagpijpje naar de overdrachtslading, maar niet naar de schokversterker. Deze wordt wel beschadigd.

Als vervolg op deze testen is één aanvullende doorslagtest uitgevoerd bij 70 °C. Doel is om vast te stellen of bij verhoogde temperatuur doorslag plaatsvindt tot en met de schokversterker.

2.1 Preparatie schokbuis

De schokbuis is zodanig geprepareerd dat het duplex slagpijpje in ongewapende stand kan worden geïnitieerd. In [1] zijn twee methoden getoond waarop dit kan worden gerealiseerd. Gekozen is voor initiatie met behulp van een metaal, met pentriet gevuld, detonatiekoord. Met deze methode wordt de samenstelling van de schokbuis het minst verstoord. In Figuur 1 is een doorsnede gegeven van de schokbuis met de wijze waarop het detonatiekoord tot direct op de bovenzijde van het duplex slagpijpje is gebracht. In tegenstelling tot [1] is het gehele safety and arming mechanism in de schokbuis aanwezig; om van buitenaf toegang te krijgen tot het slagpijpje is een gat van 4 mm aangebracht boven in de behuizing van de schokbuis en een gat van 3 mm in het huis, direct boven het duplex slagpijpje.



Figuur 1 Positionering van het detonatiekoord in de schokbuis M6-N.

Op beide uiteinden van het detonatiekoord is een booster geplaatst. Het detonatiekoord is met een C2 ontsteker geïnitieerd waardoor het duplex slagpijpje is geïnitieerd.

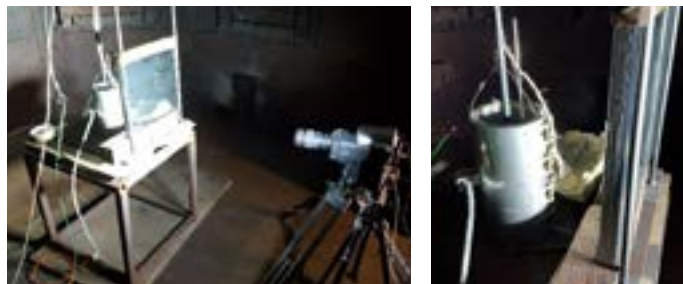
2.2 Testopstelling

Het experiment is uitgevoerd in een bunker op het terrein van TNO in Rijswijk. Om de schokbuis is een cilindrisch, elektrische oven geplaatst, zie Figuur 2. Deze oven is op afstand te bedienen.

¹ Deze schokbuis is gedemonteerd van een HE80 mortiergranaat die vanaf 2012 bij TNO lag opgeslagen.

De testopstelling is zodanig ingericht dat de oven, na opwarmen van de schokbuis tot de gewenste temperatuur, van buiten de bunker kan worden opgehesen. De opgewarmde schokbuis komt hierdoor in het zicht van een hogesnelheidscamera. De camera is achter pantserglas geplaatst en maakt filmbeelden met een snelheid van 5000 fps.

Om te controleren dat de schokbuis daadwerkelijk een temperatuur bereikt van 70 °C wordt een thermokoppel in de schokbuis ingebracht via het aangebrachte boorgat in de bovenzijde van de behuizing.



Figuur 2 Testopstelling doorslagtest bij 70 °C.

2.3 Resultaat

De schokbuis is in een tijdsbestek van enkele uren opgewarmd naar 70 °C. Na ophijzen van de oven is het slagpijpje geïnitieerd via het detonatiekoord. Op de beelden van de hogesnelheidscamera is te zien dat de schokversterker niet tot detonatie komt.

Na het experiment is de schokversterker verwijderd van de schokbuis. Geconstateerd is dat doorslag is opgetreden van het duplex slagpijpje naar de overdrachtslading. De overdrachtslading heeft een krater geslagen in de RDX/wax van de schokversterker en restanten van het cupje van de overdrachtslading zijn in de RDX/wax achtergebleven, zie Figuur 3.



Figuur 3 Foto's van de schokversterker die na de doorslagtest is gedemonteerd.

De krater in de RDX/wax is dieper dan bij de eerdere experimenten [1]. Dit is te verklaren door de verhoogde temperatuur die de wax in de schokversterker zachter maakt.

2.4 Conclusie

Er is geen initiatie vastgesteld van de schokversterker na doorslag in de M6-N schokbuis van het duplex slagpijpe naar de overdrachtslading in de ongewapende stand bij 70 °C.

Opgemerkt wordt dat slechts één experiment is uitgevoerd. De conclusie levert geen statistische onderbouwing dat doorslag naar de schokversterker bij verhoogde temperatuur altijd voorkomen wordt.

3 Schokbuis test in gewapende stand

3.1 Testopstelling en - uitvoer

Op dinsdag 5 september 2017 heeft TNO een test uitgevoerd op een M6-N schokbuis in de gewapende stand. Met uitzondering van het membraan en de drie setback kogels zijn alle onderdelen gebruikt tot en met de schokversterker. Tijdens assemblage is de sluiters zodanig gepositioneerd dat de energetische ladingen (slagpijpe – overdrachtslading – schokversterker) van de detonatieketen in lijn staan, zie Figuur 4.



Figuur 4 M6-N schokbuis met sluiters in gewapende stand.

Als laatste zijn de veer, terugslagkap en slagpin via de open punt van de schokbuis ingebracht, waarbij vrije beweging van de slagpin door het huis is geverifieerd. Om te voorkomen dat de slagpin door de veer uit de schokbuis wordt gedrukt is de slagpin met Ducttape op zijn plaats gehouden. Een stalen cilinder met gelijke diameter als de kop van de slagpin is bovenop de slagpin geplaatst zodat deze voldoende diep kan worden ingedrukt om met de punt de detonator te raken, zie

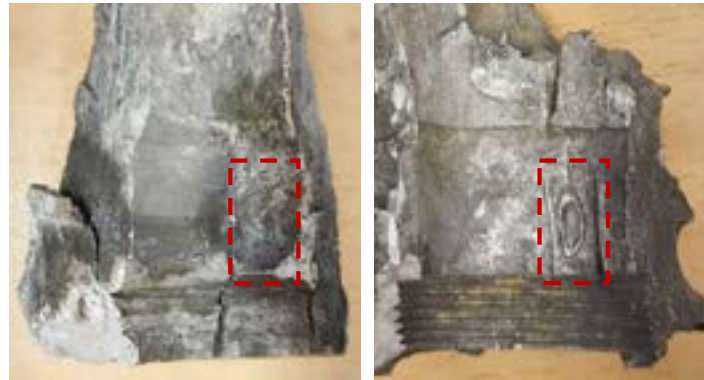
Figuur 5. Door een valgewicht van 1,7 kg via een verticale valbuis op de cilinder te laten vallen, is de slagpin in de detonator geslagen met initiatie van de volledige detonatieketen tot gevolg. De test is uitgevoerd in een bunker; door met een koord een stalen pin uit de bus te trekken is het valgewicht van buiten de bunker losgelaten. De gehele detonatieketen heeft gefunctioneerd, inclusief de schokversterker. De restanten van de schokbuis zijn vergeleken met die van het ongeval.



Figuur 5 M6-N schokbuis met schokversterker, vastgeplakte slagpin en cilinder, geplaatst onder de valbuis.

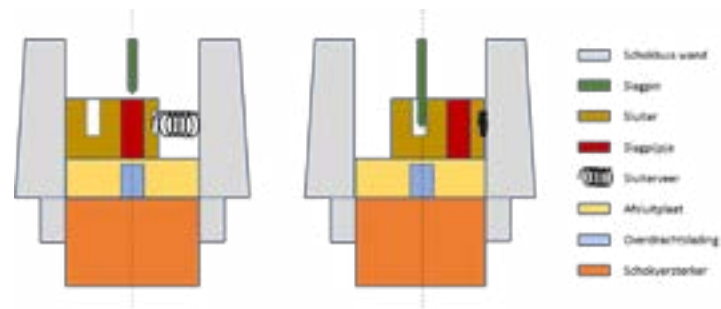
3.2 Schokbuis binnenwand

De afdruk van de sluiters en sluiterveer op de binnenwand van de geteste schokbuis in de gewapende stand is minder prominent dan de afdruk zoals waargenomen op de binnenwand van de schokbuis van de ongevalsgranaat, zie Figuur 6.



Figuur 6 Afdruk van de sluiters en sluiterveer op de binnenwand van de geteste schokbuis in de gewapende stand (links) en op de binnenwand van de schokbuis van de ongevalsgranaat (rechts).

Zie Figuur 7; bij detonatie van het slagpijpe wordt de sluiters in twee stukken gebroken; het deel links van het slagpijpe wordt naar links versneld en het deel rechts van het slagpijpe wordt naar rechts versneld. Omdat in de gewapende stand de sluiters en de sluiterveer op enige afstand staan van de binnenwand van de schokbuis, is bij detonatie van het slagpijpe de afdruk op de binnenwand van de schokbuis minder prominent dan in de ongewapende stand, waarbij de sluiters en sluiterveer reeds contact maken met deze binnenwand. Dit is een sterke indicatie dat de ongevalsgranaat is gedetoneerd in de ongewapende stand.



Figuur 7 Doorsnede van (een deel van) de schokbuis in gewapende stand (links) en ongewapende stand (rechts).

3.3 Slagpin

Bij detonatie van het slagpijpje in de ongewapende stand (rechts in Figuur 7) wordt het deel met de uitsparing voor de slagpin naar links versneld. De slagpin zal hierbij substantieel buigen of breken. Figuur 8 laat drie slagpinnen zien; een ongebruikte slagpin (links), de slagpin uit de test in gewapende stand (midden) en de slagpin uit de ongevalsgranaat (rechts). De laatste is afgebroken net beneden de onderste verdikking. Dit is een sterke indicatie dat de ongevalsgranaat is gedetoneerd in de ongewapende stand.



Figuur 8 Slagpin ongebruikt (links), uit de test in gewapende stand (midden) en uit het ongeval (rechts).

3.4 Sluiterhuis

De onderzijde van het sluitershuis is cirkelvormig met in het midden een rechthoekige uitsparing waarin de sluiters beweegt, zie Figuur 9 (links). Als het slagpijpje detoneert door inslag van de slagpin wordt het huis vervormd. In de gewapende stand wordt deze vervorming opgelegd vanuit het centrum van het huis. De vervorming is nagenoeg symmetrisch in radiale richting, zie Figuur 9 (midden).

De energetische materialen in het slagpijpje zetten vlamwerking in het bovenste deel van het pijpje om naar een detonatie in het onderste deel van het pijpje. Daarom is de vervorming het sterkst aan de onderzijde van het huis. De restanten van het huis van het ongeval vertonen ook een vervorming, zie Figuur 9 (rechts). Deze wijkt af van de symmetrische en gecentreerde vervorming die wordt gevonden voor de test in de gewapende stand. Dit is een indicatie dat de ongevalsgranaat is gedetoneerd in de ongewapende stand.



Figuur 9 Onderzijde van het huis ongebruikt (links), uit de test in gewapende stand (midden) en uit het ongeval (rechts).

3.5 Afsluitplaat

Het effect van een detonatie van het slagpijpje op de afsluitplaat verschilt met de positie van het slagpijpje op het moment van detonatie. In gewapende stand staat het slagpijpje boven het centrum van de afsluitplaat en in lijn met de overdrachtslading (zie Figuur 7 links). De schok afkomstig van het slagpijpje slaat door de afsluitplaat heen en initieert de overdrachtslading waarbij een groot centraal gat ontstaat in de afsluitplaat, zie Figuur 10 (links). In ongewapende stand bevindt het slagpijpje zich naast het centrum van de afsluitplaat (zie Figuur 7 rechts). Detonatie van het slagpijpje resulteert dan in een afdruk in de bovenzijde van de afsluitplaat. Als gevolg van doorslag door de afsluitplaat reageert de overdrachtslading en wordt het dunne metaal boven de overdrachtslading weggeslagen. Dit resulteert ook in een centraal gat, dat echter kleiner is dan in de gewapende stand. De afdruk en het relatief kleine centrale gat zijn waargenomen in een doorslagtest in ongewapende stand (Figuur 10 midden) waarbij de overdrachtslading heeft gereageerd zonder de schokversterker te initiëren. Een vergelijkbare afdruk en klein centraal gat zijn ook waargenomen in de afsluitplaat van de ongevalsgranaat (Figuur 10 rechts).

De *aanwezigheid* van een afdruk *naast* het centrum en de *afwezigheid* van een groot centraal gat *in* het centrum van de afsluitplaat, tonen aan dat de schokbuis van de ongevalsgranaat in de ongewapende stand stond op het moment van afvuren.



Figuur 10 Bovenzijde van de afsluitplaat uit de test in gewapende stand (links), uit een test in ongewapende stand (midden) en uit het ongeval (rechts). De afsluitplaat uit de test in gewapende stand is gebroken als gevolg van de detonatie, de afsluitplaat uit het ongeval is in zijn geheel teruggevonden, maar is doorgezaagd voor nader onderzoek.

Additioneel bewijs wordt geleverd door de variatie van de vervorming van het centrale gat over de dikte van de afsluitplaat. In de gewapende stand staat het slaggijpje in lijn met de overdrachtslading. Wanneer beide detoneren is de explosieve kracht op de afsluitplaat het grootst in het gebied waar beide ladingen het dichtst op elkaar zitten. Aan de bovenzijde van de afsluitplaat is daarom de radiale vervorming groter dan aan de onderzijde waar de vervorming alleen wordt bepaald door de overdrachtslading, zie Figuur 11 (links). Deze variatie van radiale vervorming over de dikte van de afsluitplaat wordt niet waargenomen in het centrale gat van de afsluitplaat uit de ongevalsgranaat, zie Figuur 11 (rechts); deze is opmerkelijk cilindrisch wat duidt op een reactie van alleen de overdrachtslading. Ook deze constatering toont aan dat de schokbuis van de ongevalsgranaat in de ongewapende stand stond op het moment van afvuren.



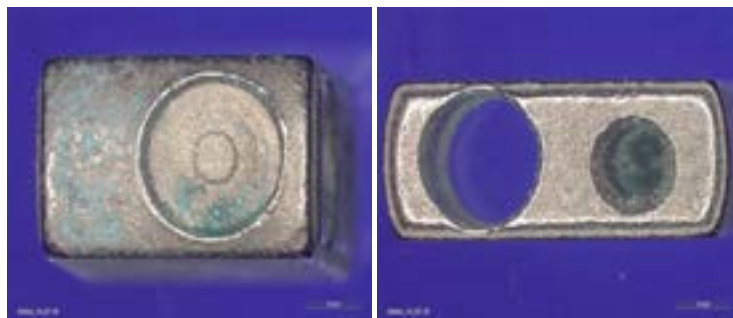
Figuur 11 Bovenzijde van de afsluitplaat uit de test in gewapende stand (links) en die van het ongeval (rechts). De afsluitplaat uit de test in gewapende stand is gebroken als gevolg van de detonatie, de afsluitplaat uit het ongeval is in zijn geheel teruggevonden, maar is doorgezaagd voor nader onderzoek.

3.6 Conclusie

Op basis van vergelijking van de restanten van de schokbuis die in de gewapende stand is getest en de restanten van de schokbuis uit de ongevalsgranaat, wordt geconcludeerd dat de schokbuis van de ongevalsgranaat in de ongewapende stand stond op het moment dat deze werd afgevuurd.

4 Alternatieve oorzaak van het ongeval

In [2] wordt na demontage van de fuze van twintig granaten gesteld dat “Bij de visuele inspectie zijn geen bijzonderheden waargenomen. Wel zat er lichte corrosie op de sluiters en het slagpijpje in de sluiters van granaat nummer 14”, en “granaat nummer 14 is afgevallen [voor testen, red] omdat het slagpijpje vastzat in de sluiters”. Figuur 12 toont twee lichtmicroscopie foto's van sluiters nummer 14 waarop de corrosieverschijnselen zichtbaar zijn.



Figuur 12 Lichtmicroscopie foto's van sluiters nummer 14. Corrosie is zichtbaar op de zijwand en in de uitsparing voor de sluiterveer (links) en op de bovenzijde, op de rand van het gat voor het slagpijpje en op de rand van het gat voor de slagpin (rechts).

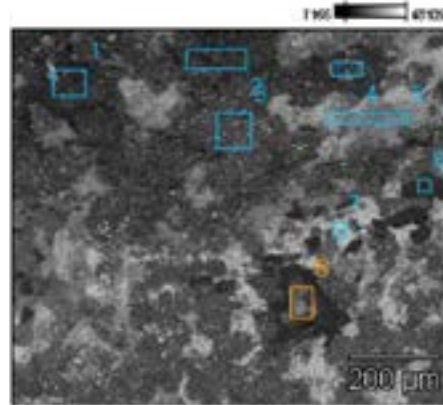
4.1 Chemische analyse

Sluiters nummer 14 is samen met sluiters nummers 11, 15 en 20 [2] onderzocht met behulp van een Scanning Electron Microscope (SEM) met Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDX).

De sluiters zijn op meerdere plaatsen onderzocht op chemische samenstelling van het sluiters lichaam en de corrosieverschijnselen. Het sluiters lichaam is van messing in de massaverhouding van 80% koper en 20% zink. De sluiters is vernikkeld. De vaak groene aanslag is koperoxide, dit is een corrosieproduct. Ook zinkoxides worden aangetoond. Het element natrium wordt op de meeste gecorrodeerde locaties aangetoond, vaak in relatief hoog gehalte². In de corrosie/aanslag worden in mindere maten de elementen zwavel en lood aangetoond. Aanvullende analyses aan de onderzijde van het sluiters lichaam (die rust op de stalen afsluitplaat), tonen aan dat er corrosie van de nikkel laag heeft plaatsgevonden waarbij deze dusdanig is aangetast dat koper uit de messing legering aan het oppervlak komt. Ook hier wordt steeds natrium aangetoond. De meeste corrosieproducten worden in de rand van het gat voor het slagpijpje waargenomen. Ter illustratie toont Figuur 13 een SEM foto die is genomen van de rand van het slagpin-gat van sluiters nummer 15. De bijbehorende resultaten van de elementenanalyse zijn weergegeven in Tabel 1.

² In een poging om de herkomst van het natrium te bepalen is een elementenanalyse uitgevoerd op de verpakkingsmaterialen die zich samen met de mortiergranaat in de transportkoker bevinden. De verpakkingsmaterialen bleken van organische aard en bevatten geen natriumhoudende verbindingen.

De volgende elementen zijn gemeten: koolstof (C), stikstof (N), zuurstof (O), natrium (Na), zwavel (S), nikkel (Ni), koper (Cu), zink (Zn) en lood (Pb).



Figuur 13 SEM foto met meetoppervlakken op de rand van het slagpin-gat van sluis nummer 15.

Tabel 1 Elementenanalyse (in gewichtspercentages) op de rand van het slagpin-gat van sluis nummer 15.

	C- K	N- K	O- K	Na- K	S- K	Ni- L	Cu- L	Zn- L	Pb- M
Sluis 15 rand slagpin(2)_pt1	14.4		40.9	31.0					9.7
Sluis 15 rand slagpin(2)_pt2	16.7		48.0	35.3					
Sluis 15 rand slagpin(2)_pt3	3.7		36.7		1.7		27.3	24.3	6.3
Sluis 15 rand slagpin(2)_pt4	17.7		46.6	35.7					
Sluis 15 rand slagpin(2)_pt5	6.4		23.9	6.8	1.1	10.1	8.5	6.9	35.2
Sluis 15 rand slagpin(2)_pt6	41.6	19.6	34.1	1.8			2.9		
Sluis 15 rand slagpin(2)_pt7	4.3		6.4			89.3			
Sluis 15 rand slagpin(2)_pt8	41.7	21.0	35.9	1.4					

Tabel 1 toont aan dat lood en stikstof voorkomen als elementen op de rand van het slagpin-gat van sluis nummer 15. Deze elementen werden ook aangetroffen op het oppervlak van sluis nummer 15 en op oppervlakken van sluis nummers 11, 14 en 20, zie Tabel 2 [3].

Tabel 2 Overzicht van locaties op sluis nummers 11, 14, 15 en 20 waarop het element lood en/of stikstof is aangetroffen.

Sluis nummer	Oppervlak	Gat voor slagpijpje	Gat voor slagpin
11		Lood	
14	Lood en stikstof		
15	Lood	Lood	Lood en stikstof
20			Lood

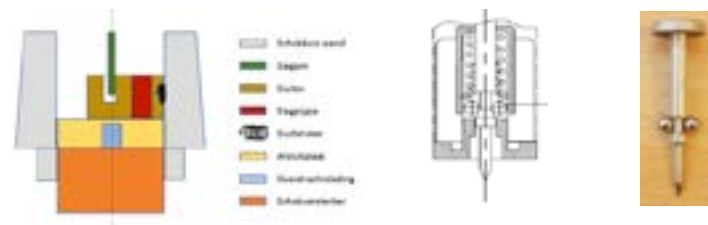
De combinatie van lood en stikstof komt alleen voor in de vorm van de moleculen loodzide en loodstijnaat (primaire explosieve stoffen), die beide aanwezig zijn in het duplex slagpijpje.

Op het gat voor het duplex slagpijpje in de sluitersluit, het buitenoppervlak van de sluitersluit, en het gat voor de borging van de slagpin wordt de combinatie van lood en stikstof niet verwacht. Het is daarom aannemelijk dat deze primaire springstoffen zijn gemigreerd naar het oppervlak van de sluitersluit vanuit het duplex slagpijpje.

In [4] wordt gesteld dat onder invloed van vocht (galvanische) corrosie kan optreden wat leidt tot degradatie van het slagpijpje. Tevens kan onder invloed van vocht waterstofazide ontstaan bij hydrolyse van loodazide. Het waterstofazide kan met het koper in de Melchior cup houder van het slagpijpje en met het koper in de messing sluitersluit reageren en het zeer gevoelige koperazide vormen. Volgens [5] is een koperazide laagdikte van slechts 0.40 mg/cm^2 aangeduid als de "kritische grens"; dikkere lagen zullen na initiatie tot een detonatie leiden.

4.2 Speling op de slagpin

Bij nauwkeurige bestudering van het veiligheids- en wapeningsmechaniek is een kleine speling van 1 à 2 mm waargenomen van de slagpin tussen de setback kogels in het huis. Zie links in Figuur 14; in ongewapende stand wordt de punt van slagpin geborgd in een gat van de sluitersluit. De veerspanning van de sluitersluitveer drukt de rechterzijwand van het gat tegen de punt van de slagpin. De slagpin wordt in verticale richting geborgd door twee setback kogels die "gevangen" zitten tussen de terugslagkap en de uitsparing in de slagpin, zie Figuur 14 midden [6]. Zoals blijkt uit de rechter afbeelding in Figuur 14 zit er een kleine speling van 1 à 2 mm tussen de kogels en de uitsparing in de slagpin. Door de druk van veer onder de terugslagkap (Figuur 14 midden) wordt de slagpin omhoog gedrukt en de setback kogels naar beneden; de slagpin bevindt zich dus in de bovenste positie en de twee kogels bevinden zich in de onderste positie.



Figuur 14 Doorsnede van een deel van de M6-N schokbuis in de ongewapende stand (links), doorsnede van het deel met terugslagkap, veer, setback kogels en slagpin (midden) en slagpin met setback kogels in uitsparing van de slagpin (rechts).

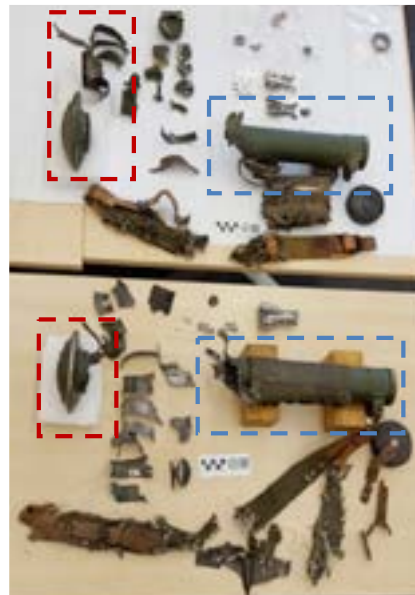
Op het moment dat de mortiergranaat wordt versneld bij de lancering zal niet alleen de terugslagkap naar beneden bewegen, maar ook de slagpin. Deze zal zich 1 à 2 mm naar beneden verplaatsen totdat de twee setback kogels de bovenste rand van de uitsparing bereiken (zoals in Figuur 14 rechts). Bij deze beweging wrijft de punt van de slagpin langs de rechter zijwand van de sluitersluit. Indien er op de rand van het slagpin-gat of op de wand van het slagpin-gat het zeer gevoelige koperazide aanwezig is dan kan dit door deze wrijving tot detonatie komen. In tegenstelling tot een voortijdig detonerend slagpijpje, bevindt een detonatie in het slagpin-gat zich recht boven de overdrachtslading en dus in lijn met de detonatieketen. Dit kan mogelijk leiden tot doorslag door de afsluitplaat met initiatie van de overdrachtslading, waarna ook de schokversterker en hoofddring zullen detoneren.

Tevens is mogelijk dat detonatie van het koperazide in het slagpin-gat het slagpijpe initieert en de combinatie van beide detonaties leidt tot doorslag naar de overdrachtslading.

Doorslagtesten met een voortijdig detonerend slagpijpe hebben niet geleid tot detonatie van de overdrachtslading in de ongewapende stand, ook niet bij verhoogde temperatuur. Omdat de hoofdlading van de ongevalsgranaat is gedetoneerd, heeft doorslag tijdens het ongeval zeker plaatsgevonden. De bovenstaande alternatieve oorzaak biedt een verklaring voor dit verschil.

Tevens wordt opgemerkt dat het schadebeeld tussen de mortier van het ongeval en de mortier die door het Kennis Centrum Wapens en Munitie (KCW&M) is gebruikt om een granaat met gewapende schokbuis af te vuren enigszins van elkaar verschilt [7]. Zie

Figuur 15; de langwerpige repen metaal bij de bodemplaat van de ongevalsmortier zijn langer dan die van de test door KCW&M met een gewapende schokbuis (rode omkadering), en de bovenzijde van de ongevalsmortier is korter (blauwe omkadering). Dit lijkt te duiden op een iets hoger detonatiepunt in de mortier van het ongeval ten opzichte van die uit de test van KCW&M. Deze verschillen kunnen verklaard worden met de alternatieve oorzaak; om de slagpin naar beneden te bewegen (en met de punt langs de wand van de sluitte te laten wrijven) is een sterke versnelling over een kleine afstand nodig die wordt verkregen door de gasdruk van de ontbrandende kruitlading. Een gewapende schokbuis daarentegen detoneert reeds op het moment dat de staart van de granaat de bodemplaat raakt, omdat de slagpin vrij kan bewegen en direct het slagpijpe initieert.



Figuur 15 Schadebeeld aan de mortier van het ongeval (boven) en aan de mortier na de test met schokbuis in gewapende stand door KCW&M (onder).

4.3 Conclusie

Corrosieverschijnselen zijn aangetroffen op meerdere messing sluiters. Ook zijn er indicaties voor migratie van explosieve stoffen uit de detonator naar locaties op de sluiters, onder andere naar het slagpin-gat dat zich direct boven de overdrachtslading bevindt, in lijn met de detonatieketen. Door speling op de slagpin kan deze tijdens lancering van de mortiergranaat potentieel gevormd koperazide in/rond het slagpin-gat initiëren wat mogelijk kan leiden tot doorslag door de afsluitplaat en voortijdige initiatie van het slappijpje in de ongewapende stand.

5 Zweet- en smelttesten TNT hoofdlading

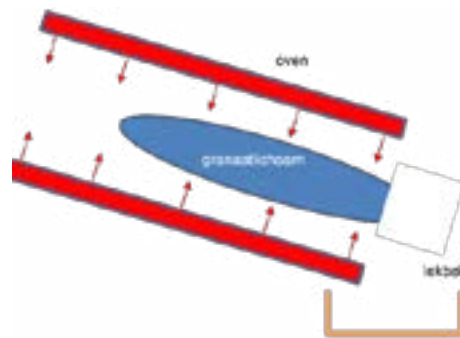
Na discussie met NATO MSIAC (Munition Safety Information and Analysis Center) is meer aandacht besteed aan de mogelijkheid van het optreden van TNT exudatie.

De hoofdlading van de HE80 mortier bestaat uit 200 gram TNT. Van TNT is bekend dat exudatie (uitzweeten) kan optreden, zie [4]. Uitzweten van TNT begint bij temperaturen rond de 70 °C. De temperatuur waarbij uitzweten begint is een maat voor de kwaliteit van het TNT. De aanwezigheid van andere stoffen/onzuiverheden in TNT, leidt tot een verlaging van het smeltpunt.

5.1 Testopstelling

In een bunker wordt een granaatlichaam van een HE80 mortier zonder schokbuis en zonder staartstuk onder een hoek opgesteld boven een tafel. Een cirkelvormige oven wordt om het granaatlichaam geplaatst, zodanig dat er voor de opening aan de voorkant van het granaatlichaam voldoende ruimte is dat gesmolten TNT uit de opening in een lekbak kan vloeien. In Figuur 16 is een schematische weergave gegeven van de testopstelling.

Om vast te stellen bij welke temperatuur het TNT gaat vloeien wordt een thermokoppel in het TNT aangebracht tegen de wand van het granaatlichaam. Om smelt vast te stellen is een webcam bij de testopstelling geplaatst, zodat het granaatlichaam van buiten de bunker kan worden geobserveerd. Gedurende het experiment is om veiligheidsredenen de bunker afgesloten en mag deze pas na uitvoerig ventileren worden betreden.



Figuur 16 Testopstelling lektest TNT.

Een foto van de testopstelling is weergegeven in Figuur 17.



Figuur 17 Foto testopstelling lekttest TNT.

5.2 Resultaat

Met behulp van het thermokoppel wordt vastgesteld dat bij 74 °C de TNT hoofdvlading begint te zweten. Bij 79 °C wordt het TNT vloeibaar en loopt het granaatlichaam leeg. Geconcludeerd wordt dat het TNT in deze mortiergranaten van goede kwaliteit is, aangezien het smeltpunt van zuiver TNT 80.8 °C is.

5.3 Conclusie

Aan de hand van de berekeningen is in [4] vastgesteld dat de 60 mm mortiergranaten, opgeslagen in de zeecontainer in Kidal, waarschijnlijk meerdere malen een temperatuur boven de 60 °C hebben bereikt. Ook is berekend dat buiten de opslag of tijdens gebruik, de stalen mantel en de TNT hoofdvlading door blootstelling aan zonlicht een temperatuur kunnen bereiken van 80 °C. Omdat de mortiergranaten met de blote hand werden geladen is het onwaarschijnlijk dat de granaten ook daadwerkelijk deze temperatuur hebben bereikt tijdens de oefening. Omdat de exacte temperaturen tijdens opslag of gebruik niet bekend zijn kan niet worden vastgesteld of exudatie en/of smelt in Kidal zijn opgetreden.

6 TNT exudaat test

In [4] wordt gesteld dat het onwaarschijnlijk is dat voorafgaand aan lancering de mortiergranaten een temperatuur hebben bereikt waarbij TNT exudaat kan optreden. Tevens wordt gesteld dat indien TNT exudaat toch is gevormd, ontbranding ervan tijdens de lancering waarschijnlijk niet leidt tot detonatie van de hoofdclading. Ter verificatie van de tweede stelling is een TNT exudaat test uitgevoerd.

6.1 Test uitvoer

Een "exudaat test" is uitgevoerd om te verifiëren of ontbranding van exudaat aan de buitenzijde van de mortiergranaat of tussen de schroefdraad van de schokbuis en de mortiergranaat kan leiden tot detonatie van de hoofdclading. TNT exudaat is gerealiseerd door een HE80 mortiergranaat op te warmen in een oven. De granaat is voorzien van een aluminium dummy (inerte) schokbuis zonder toepassing van een sealant of loctite tussen de schroefdraad, zie Figuur 18.



Figuur 18 HE80 mortiergranaat met aluminium dummy schokbuis.

Vanwege warmte verliezen aan de voor- en achterzijde van de oven (opstelling vergelijkbaar met die in Figuur 16) bleek de temperatuur van de mantel van de granaat moeilijk te controleren. Enkele opwarmcycli waren nodig om zichtbaar exudaat te realiseren, zie Tabel 3.

Tabel 3 Opwarm testen van HE80 mortiergranaat.

Test nr	Oven temperatuur [°C]	Granaat mantel temperatuur [°C]	Tijdsduur opwarming [uren]	Exudaat zichtbaar [N/J]
1	70	55	3	N
2	90	70	7	N
3	100	76	7	N
4	120	90	5	J

Exudaat aan de buitenzijde van de granaat is niet waargenomen tot een mantel temperatuur van 76 °C. De exacte temperatuur waarbij exudaat is ontstaan is onbekend maar ligt boven de 76 °C.

Figuur 19 toont de HE80 mortiergranaat. Exudaat is zichtbaar in de vorm van gerekristalliseerd TNT op en enkele centimeters naast de groeven aan de buitenzijde van de mantel, met fijne witte kristallen aan weerszijden van het TNT. Een dunne streep vanaf de scheiding tussen schokbuis en granaatlichaam markeert de locatie waarlangs het gesmolten TNT is uitgelopen (aan de onderzijde van de granaat tijdens de opwarming).



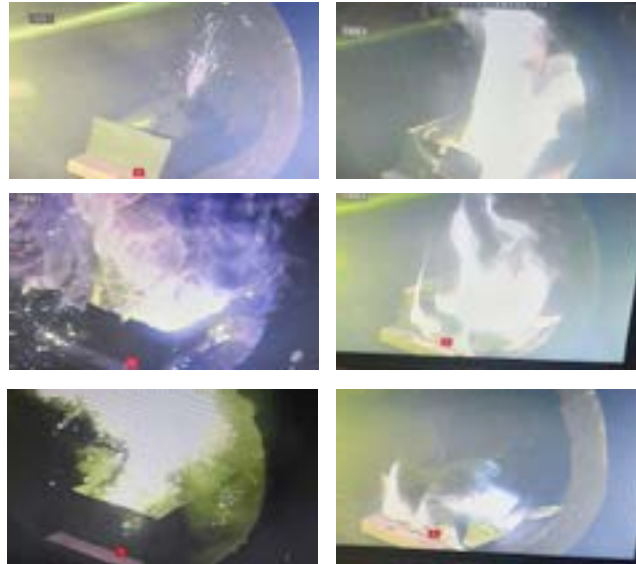
Figuur 19 HE80 mortiergranaat met TNT exudaat.

De mortiergranaat met exudaat is vervolgens in een bakje gelegd en bedekt met een op titanium/koolstof poeder (verhouding 4/1) gebaseerde thermietlading, zie Figuur 20. In een bunker is de thermietlading ontstoken met behulp van een vuurwerklont. Het brandproces is gemonitord via een real-time videoverbinding.



Figuur 20 Mortiergranaat met exudaat, bedekt met een thermietlading.

Figuur 21 toont snapshots van een opname die gemaakt is van het brandproces.



Figuur 21 HE80 granaat met exudaat in een brandende thermietlading; de linker kolom toont van boven naar onder de initiatie en ontbranding van de thermietlading; de rechter kolom toont het branden en uitdoven van de thermietlading.

6.2 Resultaat

Tijdens een brandduur van ongeveer een minuut is geen deflagratie of detonatie van de TNT hoofdlading opgetreden. Na de brandtest is de dummy schokbuis gedemonteerd van het granaatlichaam. Zie

Figuur 22; naar schatting 20% van de TNT hoofdlading is uitgetreden via de schroefdraad met de schokbuis. De kleur van het TNT aan bovenzijde van de hoofdlading is veranderd van geel/oranje (voor de test) naar bruin (na de test). Gerekristalliseerd TNT is aangetroffen op de schroefdraad en onderzijde van de aluminium dummy schokbuis.



Figuur 22 20% van de TNT hoofdlading is uitgetreden via de schroefdraadverbinding met de schokbuis (links); gerekristalliseerd TNT op onderzijde en schroefdaad van de aluminium dummy schokbuis (rechts).

6.3 Conclusie

De "exudaat test" demonstreert dat het zeer onwaarschijnlijk is dat TNT exudaat heeft geleid tot detonatie van de hoofdlading.

7 Deflagratie tot Detonatie Transitie (DDT)

In [7] is geconcludeerd dat de hoofdloading van de mortiergranaat is gedetoneerd. In deze paragraaf wordt aandacht gegeven aan de vraag of het mogelijk is dat in plaats van een 'detonatie' de hoofdloading van de ongevalsgranaat een Deflagratie tot Detonatie Transitie (DDT) heeft ondergaan. Bij een DDT gedraagt de explosieve stof zich anders dan bij een (volledige) detonatie. Bij een detonatie detoneert alle explosieve stof instantaan en treedt verscherving van de stalen mantel op met veel kleine fragmenten. Bij een DDT zal de explosieve stof in eerste instantie een snelle verbranding laten zien (deflagratie) en vervolgens overgaan in een detonatie. De opsluiting van de explosieve stof (bijvoorbeeld in de mantel van een granaatlichaam) speelt een belangrijke rol of en hoe een DDT zal optreden. Bij een DDT zullen naast kleine fragmenten ook grotere fragmenten worden teruggevonden uit het deel van het granaatlichaam waar deflagratie is opgetreden.

7.1 Resultaten

Indien exudaat aanwezig is, bijvoorbeeld aan de buitenzijde van de granaat, dan zou dit door ontbranding van de voortdrijvende lading kunnen worden aangestoken. Figuur 23 [8] laat zien dat vlammen en hete gassen van de voortdrijvende lading voorbij de granaat bewegen en uit de schietbuis komen, nog voordat de mortiergranaat de schietbuis verlaat. In het geval exudaat ook tussen het schroefdraad van de schokbuis zit kan deze vlamwerking de hoofdloading mogelijk bereiken³. Als de TNT hoofdloading vervolgens ontbrandt, kan deze overgaan van een Deflagratie naar een Detonatie door de volledige opsluiting van de hoofdloading in het granaatlichaam.



Figuur 23 Vlammen en hete gassen bewegen tot voorbij de mortiergranaat (foto links $t=0$ s) en komen uit de schietbuis, voordat de granaat de schietbuis verlaat (foto rechts $t=1$ s) [3].

KCW&M heeft de mogelijkheid van een DDT onderzocht. In plaats van vlamwerking op de hoofdloading via een exudaat is bij een tweetal proefnemingen een gat geboord (van resp. 2 en 5 mm, zie Figuur 24 [2]) in de mantel van de hoofdloading. Via deze weg kunnen de vlammen en verbrandingsgassen van de voortdrijvende lading in contact komen met de TNT hoofdloading.

Uit hogesnelheid filmbeelden van het experiment met de 2 mm aanboring is op te maken dat de granaat op normale wijze de schietbuis verlaat en is een detonatie na

³ Opgemerkt moet worden dat deze route onwaarschijnlijk wordt geacht, omdat de schokbuis met een sealant of een vorm van loctite op het granaatlichaam zit geschroefd.

inslag van de mortiergranaat in het veld waarneembaar. De 2 mm aanboring heeft dus geen effect op het functioneren van de mortiergranaat.

Uit de opnames met de 5 mm aanboring blijkt het optreden van een deflagratie van de mortiergranaat in de schietbuis, zie Figuur 25. De schietbuis raakt ontzet en het commandovizier springt los tijdens het afvuren door de opzwellen van de schietbuis onder hoge inwendige gasdruk. De mortiergranaat verscherft niet, waarschijnlijk omdat de opgebouwde gassen door de 5 mm aanboring ontsnappen en er onvoldoende druk wordt opgebouwd voor een detonatie. Omdat de mortiergranaat niet detoneert treedt er ook geen verscherving van de mortier op.

Deze testen illustreren dat bij de 5 mm aanboring het TNT wel voortijdig is ontbrand, maar dat er geen DDT van de hoofdloading heeft plaatsgevonden.



Figuur 24 Aangeboorde mortiergranaten met diameter 2 mm (links) en 5 mm (rechts) [2].



Figuur 25 Deflagratie bij lancering van de mortiergranaat met 5 mm aanboring in de mantel [2].

7.2 Conclusie

De opengescheurde schietbuis en de verscherving van de mortiergranaat bij het ongeval in kleine fragmenten maken het optreden van een DDT in het ongeval in Mali onwaarschijnlijk⁴.

⁴ Afgezien van het feit dat de schokbuis zeer vast op het granaatlichaam is bevestigd (waarschijnlijk met loctite of een vergelijkbare schroefdraadborging) wat uittreden van potentieel exudaat via de schroefdraad onwaarschijnlijk maakt.

8 Degradatie/corrosie in M6-N schokbuis

De M6-N schokbuis die gebruikt is voor de doorslagtest bij 70 °C is door TNO gedemonteerd. Deze is op afstand met speciale tooling van het granaatlichaam verwijderd, waarna ook de schokbuis zelf is gedemonteerd voor nader onderzoek.

8.1 Visuele inspectie schokbuis

Na verwijderen van de schokversterker en het cirkelvormige stukje karton werd een bruin/oranje gekleurde substantie gevonden aan de onderzijde van de afsluitplaat. Deze had zich ook afgezet op de bovenzijde van het stukje karton, zie Figuur 26. Ook de rubber O-ringen die zich in de schokbuis bevinden, vertoonden deze verkleuring. Figuur 26, rechts toont de onderzijde van de afsluitplaat met de bruin/oranje afzetting, ook rondom de bodem van de overdrachtslading.



Figuur 26 Verkleuring van O-ringen en karton (links) en afzetting op de onderzijde van de afsluitplaat (rechts) in de M6-N schokbuis gebruikt bij de 70 °C doorslagtest.

8.2 SEM analyse

Een analyse met behulp van Elektronenmicroscopie (SEM) en Röntgenanalyse (EDX) toont aan dat de afzetting op het oppervlakte van de afsluitplaat ligt. Op veel plaatsen is het uitgesmeerd, maar er worden ook enkele losse, meer 'uitgedroogde' deeltjes gevonden. Elementanalyse van de afzetting toont de aanwezigheid aan van koolstof(C) en zuurstof (O). Dit geeft aan dat deze afzetting zeker geen corrosieproduct (roest) is, maar dat het een organisch materiaal betreft. Er worden ook sporen van zink (Zn) en ijzer (Fe) aangetroffen die afkomstig zijn van de stalen afsluitplaat met een zinken coating. Er worden geen elementen (bijvoorbeeld stikstof (N)) aangetroffen van een explosieve stof.

De potentiële bron voor de afzetting is de wax (paraffine) van de schokversterker⁵. Waarschijnlijk migreert de wax door het karton naar het oppervlak van de afsluitplaat.

Bij verder demonteren van de schokbuis werd op de messing sluiters een groene afzetting aangetroffen, zoals ook op enkele van de sluiters gebruikt bij de testen in

⁵ Dit is een mengsel van kristallijne alkanen met 16 tot 57 koolstofatomen en lineaire ketens [9]. Een typische component van paraffine is C₃₁H₆₄ [10].

[1]. Messing bevat koper en de groene afzetting is met zekerheid koperoxide, zie ook [3]. Een lekttest op de schokbuis toont aan dat deze waterdicht is.

8.3 Conclusie

Bij demontage van een waterdichte schokbuis zijn degradatieverschijnselen waargenomen op de sluiters (koperoxide) en onder de afsluitplaat (waarschijnlijk gemigreerde wax uit de schokversterker).

9 Temperatuurmetingen aan mortiergranaat

In de maand juni 2017 zijn op de TNO locatie Rijswijk twee temperatuurmetingen uitgevoerd op een HE80 mortiergranaat in de originele houten transportkist. Tabel 4 geeft de details van de temperatuurmetingen en de samenstelling van de HE80 mortiergranaat.

Tabel 4 Details van de temperatuurmetingen en condities van de mortiergranaat.

Tijdstip	Weerscondities	Omgevings-temperatuur [°C]	Samenstelling HE80 mortiergranaat
Maandag 19 juni tussen 12:00 – 14:00 uur	Zonnig, geen bewolking en vrijwel windstil	29 – 30	Zonder schokbuis, zonder TNT lading, zonder staartstuk
Donderdag 22 juni tussen 13:15 – 14:15 uur	Zonnig, matige wind met sluierbewolking	28	Met inerte schokbuis, met TNT hoofdloading, met staartstuk

Tijdens de metingen is het effect van een combinatie van omgevingstemperatuur en directe zoninstraling op de stalen mantel en aluminium schokbuis vastgesteld.

9.1 Uitvoering

Temperatuurmetingen zijn uitgevoerd met thermokoppels. Met behulp van een handheld infrarood thermometer is de correcte temperatuurweergave van de thermokoppels geverifieerd. Voor de eerste meting op maandag 19 juni 2017 zijn thermokoppels aan de binnen- en buitenzijde van de lege stalen mantel bevestigd. Voor de tweede meting op donderdag 22 juni zijn de thermokoppels op de mantel en inerte originele M6-N aluminium schokbuis bevestigd, zie Figuur 27.



Figuur 27 Temperatuurmeting binnen- en buitenzijde lege stalen mantel (links) en op de TNT gevulde mantel en inerte schokbuis van de HE80 mortiergranaat (rechts).

9.2 Resultaat

Bij een omgevingstemperatuur van 29 a 30 °C warmt de stalen mantel van een lege HE80 mortiergranaat in ongeveer 15 tot 20 minuten op naar een maximum van 59 à 60 °C als gevolg van zinstraling met "Nederlandse intensiteit", niet gehinderd door bewolking. De temperatuur aan de binnen- en buitenzijde van de mantel is vrijwel gelijk.

Bij een omgevingstemperatuur van 28 °C warmt de stalen mantel van een TNT gevulde HE80 mortiergranaat in ongeveer 60 minuten op naar een maximum van ongeveer 42 °C als gevolg van zinstraling met "Nederlandse intensiteit", gehinderd door sluierbewolking. Er is vastgesteld dat onder deze condities de aluminium M6-N schokbuis ongeveer 5 °C voorloopt op de stalen mantel en na 60 minuten een temperatuur bereikt van ongeveer 47 °C.

Tijdens de metingen is geconstateerd dat door wind en/of toename van de bewolking de mantel- en schokbuis temperatuur met enkele graden terugloopt.

9.3 Conclusie

Door zinstraling warmt de stalen mantel van de HE80 mortiergranaat in korte tijd op. Dit geldt ook voor de aluminium schokbuis die enkele graden voorloopt op de mantel. Deze bevindingen sluiten aan bij de informatie uit [4]. De omgevingstemperatuur in Mali ten tijde van het ongeval ligt ongeveer 10 °C hoger dan tijdens de metingen in Rijswijk. Daarnaast is de intensiteit van de zinstraling groter. Geconcludeerd wordt dat de in [4] berekende temperatuur van de stalen HE80 mortiergranaatmantel en van de aluminium M6-N schokbuis onder invloed van de omgevingstemperatuur en zonlicht realistisch is.

10 Gevarenklasse HE80 mortiergranaat

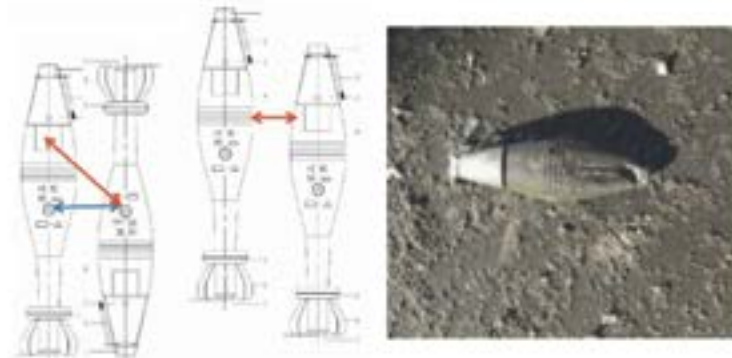
In 2012 is door TNO onderzoek gedaan naar de wijze waarop de overdracht van een accidentele detonatie van een munitieartikel naar naastliggende munitieartikelen (sympathische detonatie) kan worden voorkomen [11].

10.1 Sympathische detonatie testen

Door de fabrikant Arsenal2000JSCo is voor de HE80 mortiergranaat met M6-N schokbuis een gevarenklasse of Hazard Classification (HC) van 1.1F afgegeven. Deze classificatie is relevant voor opslag en transport in de bijbehorende houten transportkist. De aanduiding 1.1 betekent dat het artikel een massadetonatie kan voortbrengen. De aanduiding F betekent dat er een secundair detonerend explosief aanwezig is met een eigen initiatiemechanisme.

Bij de uitvoering van het onderzoek naar het optreden van sympathische detonatie zijn verschillende posities en oriëntaties van de granaten ten opzichte van elkaar zijn beproefd; de hoofdvlading van de ene granaat (donor) is uitgelijnd met de schokversterker en met de hoofdvlading van de naastliggende granaat (acceptor) (zie Figuur 28). In dit onderzoek bleek dat detonatie van een HE80 mortiergranaat op geen enkele wijze resulteerde in sympathische detonatie.

Deze resultaten geven aan dat de HE80 TNT hoofdvlading ongevoelig is en niet eenvoudig tot detonatie kan worden gebracht. Zelfs de schok- en fragmentwerking afkomstig van een detonerende naastgelegen HE80 granaat resulteert niet in een reactie van de hoofdvlading. Opgemerkt wordt dat Groot-Brittannië, de Verenigde Staten en Canada de 60 mm mortier een HC heeft van 1.2E. De aanduiding 1.2 betekent dat er uitworp ("projection") plaatsvindt maar geen massadetonatie. De aanduiding E betekent dat er een secundair detonerend explosief aanwezig zonder een eigen initiatiemechanisme. Gezien het feit dat er geen sympathische detonatie optreedt, lijkt dit een meer voor de hand liggende classificatie.



Figuur 28 Experimenten met de HE80 mortier: uitgelijnde hoofdvladingen en hoofdvlading uitgelijnd met schokversterker (links). Een naastgelegen HE80 granaat wordt ernstig vervormd maar sympathische detonatie treedt niet op (rechts) [11].

10.2 Conclusie

De TNT hoofdloading van een HE80 mortiergranaat is ongevoelig want deze is niet eenvoudig tot detonatie te brengen door een externe stimulans. De classificatie 1.1F voor massadetonatie lijkt onterecht.

11 Literatuuronderzoek

In de literatuur wordt melding gemaakt van de typen koperazide, de condities voor de vorming van koperazide en ongevallen als gevolg van koperazide, zie [12]. Relevante delen uit [12] worden hieronder gereproduceerd.

11.1 Typen koperaziden, kleur en detectie

Figuur 29 presenteert typen koperazide, bijbehorende kleur en een detectietechniek om de aanwezigheid van koperazide aan te tonen in corrosieproducten.

The lead azide-copper reaction has been known since 1913 (1). Lead azide will react with moisture to produce hydrazoic acid (HN_3). This volatile acid (b.p. 35°C) (2) attacks copper and copper-containing metals with the formation of sensitive explosive products on the metal surface. While attack is usually concentrated in the vicinity of the source of lead azide, diffusion of the vapor can occur and result in the formation of the corrosion products at some distance from the lead azide container.

The chemistry involved in the corrosion process is set forth in the equations of 1. Hydrazoic acid is formed by the action of moisture on the lead azide. The hydrazoic acid attacks copper to give cuprous azide, CuN_3 , which appears as a white film (3). Early literature reported the conversion of CuN_3 to normal cupric azide, $\text{Cu}(\text{N}_3)_2$, but recent work has proven that the cuprous azide is oxidized to monobasic cuprous azide $\text{Cu}(\text{N}_3)_2 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$, a yellow-brown compound. X-ray diffraction study of corrosion layers on copper and brass has revealed cuprous azide located at the layer nearest the metal surface, with an outer coating of basic cupric azide (3). Further corrosion products, depending on the construction of the system, are the di-, tri-, or octa-basic cupric azides, yellow-green to green to blue-green in color (Figure 2). The presence of light accelerates the transformation of cuprous azide to the various cupric forms. After a period of time in ventilated containers the corrosion products observed are the di- or tri-basic cupric azides. Thus the tendency is for the very sensitive forms to be oxidized to insensitive varieties. All phases must, however, be presumed to exist together so that their varying degrees of sensitiveness must be considered.

A simple test to confirm the presence of copper azide is to apply one drop of aqueous ferric chloride solution which develops into an intense red coloration if copper azide is present in the corrosion.

Figuur 29 Typen koperazide, bijbehorende kleur en een detectietechniek [12].

11.2 Condities voor de vorming van koperazide en gevoeligheid

Figuur 30 en Figuur 31 presenteren respectievelijk de condities voor de vorming van koperazide en de gevoeligheid.

Moisture for the hydrolysis of lead azide can come from inefficient drying of the lead azide itself, from the air, from direct exposure to water or water vapor, and from other fillings in the same weapon. Due to temperature changes, a fuse can "breathe" permitting ingress of moist air. There is also frequently sufficient moisture available from the N.E. fillings of conventional ammunition. Sometimes moisture can come from packing materials. The formation of copper azide is favored by high humidity. Temperature has less effect per se. At relative humidities higher than 90%, corrosion is quite rapid; at less than 80% RH the rate of corrosion is very slow. A bare copper strip will be corroded in 24 to 48 hours when hung above wet lead azide in a sealed beaker. When the strips are exposed to open flames, audible "pops" are heard. The rate of hydrolysis of lead azide is increased by traces of acidity. It has been shown that under adverse conditions of storage (120°F with added water), lead styphnate will increase the level of acidity and greatly accelerate the rate of hydrolysis of lead azide. Lead styphnate is commonly used with lead azide in priming mixtures and as an ignition charge in detonators.

Figuur 30 Condities voor de vorming van koperazide.

Studies have shown that the sensitiveness to impact and friction of copper azide deposits varies greatly. Lamsvik's (3) Impact and Friction data (Figure 3) indicate that cuprous azide is at least twice as sensitive as lead azide to both impact and friction. Monobasic cupric azide is twice as sensitive to impact but less sensitive to friction than is lead azide (3). The dibasic variety of cupric azide is however, less sensitive than lead azide to both impact and friction. Propagation from local ignition is more likely to occur during the initial stages of the corrosion cycle when cuprous and the monobasic cupric azide are present. Cuprous and monobasic cupric azide propagate in layers as thin as 0.85 mg/cm² (4). Copper azides are very sensitive to electrostatic discharge. A piece of foil corroded with copper azide has been fired consistently from a 40 volt -10 erg discharge and occasionally at energies as low as 1 erg. Various "dropping" and "slamming" tests have demonstrated the increase in sensitiveness of samples corroded with copper azide over those covered with lead azide crystals.

Figuur 31 Gevoeligheid van koperazide.

11.3 Ongevallen als gevolg van koperazide

Appendix A reproduceert een aantal incidenten en ongevallen uit [12] als gevolg van koperazide met aansluitend een discussie, conclusies en aanbevelingen.

Figuur 32 presenteert twee van deze ongevallen, die relevant zijn voor het mortiergranaat ongeval in Mali:

1. Voor de 3 inch fuze (gebruikt in Engelse munitie) wordt gesteld dat een goed ontworpen sluis een voortijdige detonatie van de hoofdading kan voorkomen wanneer de detonator voortijdig detoneert in de ongewapende stand. Testen hebben echter aangetoond dat voortijdige detonatie van de detonator tijdens de wapening kan leiden tot detonatie van de hoofdading.
2. Voor de M52A1B1 schokbuis (gebruikt in Amerikaanse 81 mm mortiergranaten) wordt gesteld dat het effect van hoge temperaturen en vocht op het loodazide in de M18 detonator kan leiden tot de vorming van waterstofazide resulterend in de vorming van koperazide op de messing sluis. Testen toonden aan dat het koperazide kan initiëren door wrijving tijdens de wapening.

3-Inch Fuse. Copper azide was found in 1959 in inservice 3-inch fuses manufactured in 1952 and 1954. The fuse has an out-of-line mechanism. It contains an upper lead azide-filled detonator, a delay pellet, and a lower lead azide-filled detonator. Both detonators are in copper containers. These fuses were involved in premature bursts. The rounds involved had been stored at Hong Kong. The investigation was started by breaking down 500 fuses available in the United Kingdom and 1000 fuses stored and present in Hong Kong. The Hong Kong investigation was started in April 1959. Copper azide was identified in 40% of the fuses examined in Hong Kong and corrosion was found in all but 65 rounds.* Examination of firing records of rounds stored at Hong Kong revealed that between 1 January 1959 and April 1959, 7100 rounds were fired; six premature and 265 duds were noted. Copper azide was found in 32% of the 500 fuses examined in the United Kingdom. Therefore, an experiment was arranged with 200 fuses known to be from groups contaminated with copper azide.** The fuses were modified, by removing the firing pins and all explosive components except the detonators and delay charge, and then were fired over water for recovery. Sixty-four fuses were found with both detonators fired and the delay charge burned. An additional 40 were found with evidence of partial burning. Approximately 1100 other tests for possible causes of prematures other than copper azide were performed all with negative results. It was concluded by the British Ordnance Board that "there is no doubt that copper azide corrosion of the detonator can be held responsible for the prematures and blinds.***" The results of these field type firing tests taken together with the results of the laboratory tests with the 40-mm fuse as cited above, indicate that a well-designed shutter can eliminate prematures of warheads if the fuse detonator should fire prematurely in the out-of-line condition. The tests also show, however, that if premature firing occurs during the arming cycle, the warhead may be detonated.

* While corrosion was not necessarily copper azide.

** From data presented above, one would presume that copper azide corrosion was present in 30 - 40% of the fuses tested.

***Blinds in British terminology is equivalent to duds in U.S. usage.

M52A1B1 Mortar Fuse. The M52A1B1 Mortar Fuse, used in 81-mm ammunition, was involved in a premature explosion in 1957 (8). Two sailors were killed in a training mission when a round exploded 25 feet from the mortar. No precise cause was found by the board of inquiry. However, subsequent laboratory tests revealed that the effects of high temperature and humidity on lead azide of the M18 detonator and the M52 fuse could cause formation of hydrazoic acid and result in copper azide formation on the brass fuse slider. The M18 detonator consists of lead azide priming mix, lead azide, and tetryl in an aluminum cup. The laboratory tests (9) revealed the feasibility of the copper azide formed on the slider being initiated by friction encountered in the arming cycle.

Figuur 32 Relevante ongevallen uit [12].

11.4 Conclusie

In de literatuur wordt gevonden dat een combinatie van loodazide en koperhoudende metalen delen, onder blootstelling aan vocht en verhoogde temperatuur, kan leiden tot een gevoelige vorm van koperazide. Onderzoek naar ongevallen als gevolg van koperazide toont aan dat koperazide kan:

- ontstaan op een messing sluis;
- initiëren door wrijving tijdens wapening van de schokbuis;
- leiden tot detonatie van de hoofdvlading.

12 Referenties

1. E.J. Kroon, R.H.B. Bouma, P.A. Hooijmeijer; *Ongeval mortieroefening Mali: Doorslagtesten M6-N schokbuis*; TNO 2017 R10363, 5 april 2017
2. 60 mm Mortier HE80, Kenniscentrum Wapensystemen en Munitie, CvO, Documentnr 26240, december 2016
3. W. Duvalois, *Onderzoek 60 mm mortier, analyse rapport*, 17EM/0182, 3 maart 2017
4. J.S. Henzing, E.J. Kroon, P.A. Hooijmeijer, R.H.B. Bouma, *Ongeval mortieroefening Mali: Klimatologische omstandigheden en potentiële invloeden*, TNO 2017 R10104, 23 maart 2017
5. PROCEEDINGS OF THE SYMPOSIUM ON LEAD AND COPPER AZIDES HELD ON 25TH-26TH OCTOBER 1966, Explosives Research and Development Establishment, Waltham Abbey, England, 26 October 1966
6. Voorschrift Geschut- en Mortiermunitie 20 mm – 84 mm, Defensie Materieel Organisatie, Ministerie van Defensie, juli 2016
7. E.J. Kroon, R.H.B. Bouma, P.A. Hooijmeijer; *Ongeval mortieroefening Mali: Algemene technische onderzoeksvragen met betrekking tot de restanten*, TNO 2016 R11512, 14 december 2016
8. Foto en video material Kenniscentrum Wapens & Munitie, 60 mm MR CP VII_Test001.wmv, Test002 en Test003, december 2016
9. <https://nl.wikipedia.org/wiki/Paraffine>
10. https://en.wikipedia.org/wiki/Paraffin_wax
11. M.M. van der Voort, P.A. Hooijmeijer, B. Meuken, J.H.G. Scholtes, J.M. Makkus, W.P.C. de Klerk, *Mitigation of ammunition effects by application of alternative packaging materials*, Parari 2013, 12 November 2013
12. AD-758 990, Minutes of the Explosive Safety Seminar (14th) held at Mariott Hotel, New Orleans, Louisiana, on 8-9-10 October 1972, Department of Defense Explosives Safety Board Washington, D.C., 12 February 1973

13 Ondertekening

Rijswijk, 12 september 2017

TNO Technical Sciences

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized 'A' followed by a long horizontal stroke.

A.E.D.M. van der Heijden
Senior Scientist

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'P' followed by a long horizontal stroke.

P.A. Hooijmeijer
Projectleider

A Incidenten en ongevallen door koperazide

In [12] worden een aantal incidenten en ongevallen gepresenteerd als gevolg van koperazide met aansluitend een discussie, conclusies en aanbevelingen. Deze zijn hieronder gereproduceerd.

A. U.S. Ordnance

British 20-mm Ammunition. The United Kingdom has had a number of incidents involving copper azide corrosion in 20-mm ammunition. Their troubles became apparent after WWII when ammunition was returned from storage overseas and later after storage in their country. The fuse involved in the British incidents was their fuse No. 254. The U.S. Mx 26 Mod 0 fuse was copied from it in WWII and is virtually identical. Fuse Mx 26 Mod 0 is shown in Figure 4. It can be seen from the figure that this fuse has no detonator safety. The sensitive primary explosive is not shuttered from the insensitive tetryl in the magazine. Thus the fuse is armed at all times, and, without benefit of a firing pin, detonates when target impact fires the detonator. The British fuse is constructed entirely of brass. The nose is closed with a brass disc, and the detonator cup is also made of brass. The fuse and detonator are unsealed and the detonator contains lead azide. The fuse contained in a 65-lb block can be dropped 30 feet without firing the detonator.

(a) RAF Swynnerton, 21 January 1948. Two men were killed from an explosion during the breakdown of 20-mm High Explosive Incendiary ammunition containing Fuse No. 254 (5). The "service operator" placed filled boxes, containing about 60 rounds each, on their sides on a felt covered table. The rounds were then spread over the felt to enable the operator feeding the breakdown machine to easily pick them up. After the machine separated the shell from the cartridge, the propellant powder was poured out of the cartridge into a hopper. Investigation of the accident revealed that a hole had been blown in the table top. This indicated that the explosion had occurred on or close to the table. Medical evidence revealed that the "feeding operator" had his arms outstretched and had half turned facing the service table. Involved in the accident was approximately two pounds of propellant in the propellant hopper and seven rounds of ammunition. Investigation showed that other rounds from the lots being broken down were badly corroded and that the cases containing the ammunition had been wet. The British concluded that the accident was caused by the presence of sensitive copper azide which fired when the "feeding operator" was in the act of feeding the breakdown machine. He had probably dropped a round only a few inches onto the felt covered table top. No attempt to actually identify the presence of copper azide in the corroded rounds was made. However, it is obvious from the fuse construction, i.e., the lack of a firing pin and no normally moveable parts, and from the normal insensitivity to impact of the round

that something had occurred to make the round supersensitive. The most logical explanation would be the formation of copper azide known to be easily capable of being formed in this ammunition.

(b) RAF Swynnerton, 4 May 1949. Four men were killed when a box of 30-mm HE Ammunition exploded while being loaded from a conveyor into a railway truck (6). The loading of the boxes, was carried out by six men. Two men lifted the box and placed it cornerwise on the conveyor. Two other men, one on either side of the conveyor, pushed the box up the inclined portion of the conveyor. Here it was held until the third pair of men lifted the box from the end of the conveyor and stacked it in the railway car. If the box was not immediately grasped by the last two men, one corner of the box could tilt over the edge of the conveyor and strike the bottom of the car or the top of the stack -- a maximum fall of six inches. Examination of the evidence showed that the box involved in the accident was at the top of the conveyor when the explosion occurred. The medical evidence showed that the middle two men still had their hands and arms close to the box. The last two men had not yet grasped the box and had their backs turned to it. The number of rounds exploding was less than the amount in a single box. It was probable that corroded rounds were present in the box which exploded. Other rounds being loaded were found in a corroded condition. The conclusion of the investigators of the accident was that the mishap was caused by one corner of the box of ammunition tilting over onto the floor of the van. This caused a detonator, over-sensitive because of copper azide corrosion, to fire. The detonation of one round then lead to the detonation of other rounds. No attempt was made to identify copper azide in the remaining rounds.

(c) RAF Swynnerton, 30 June 1952. A pile of 30-mm ammunition awaiting disposal exploded spontaneously. The ammunition was in extremely bad condition and many of the shells were heavily rusted. The most likely cause was attributed to the ignition of copper azide corrosion and the resultant firing of the detonator. The cause of the ignition was believed to be the high temperature of the day (7), which could have caused relative motion of parts by differential thermal expansion.

40-mm Ammunition at RAF Pembrey and Irvine. No accident occurred with this ammunition. However, copper azide corrosion was found and identified in the fuse. The fuse consists of the detonator, a lead azide filling separated by a shutter

from a lead of tetryl in brass. Investigations revealed that the risk of ignition by copper azide of the tetryl lead was remote (10). This was demonstrated by exposing shutter assemblies to hydrazoic acid. When the copper azide formed was ignited, it did not initiate the tetryl filling on the warhead side of the shutter.

3-Inch Fuse. Copper azide was found in 1959 in inservice 3-inch fuses manufactured in 1952 and 1954. The fuse has an out-of-line mechanism. It contains an upper lead azide-filled detonator, a delay pellet, and a lower lead azide-filled detonator. Both detonators are in copper containers. These fuses were involved in premature bursts. The rounds involved had been stored at Hong Kong. The investigation was started by breaking down 500 fuses available in the United Kingdom and 1000 fuses stored and present in Hong Kong. The Hong Kong investigation was started in April 1959. Copper azide was identified in 40% of the fuses examined in Hong Kong and corrosion was found in all but 65 rounds.* Examination of firing records of rounds stored at Hong Kong revealed that between 1 January 1959 and April 1959, 7100 rounds were fired; six premature and 265 duds were noted. Copper azide was found in 32% of the 500 fuses examined in the United Kingdom. Therefore, an experiment was arranged with 100 fuses known to be from groups contaminated with copper azide.** The fuses were modified, by removing the firing pins and all explosive components except the detonators and delay charge, and then were fired over water for recovery. Sixty-four fuses were found with both detonators fired and the delay charge burned. An additional 40 were found with evidence of partial burning. Approximately 1100 other tests for possible causes of premature other than copper azide were performed all with negative results. It was concluded by the British Ordnance Board that "there is no doubt that copper azide corrosion of the detonator can be held responsible for the premature and blinks.*** The results of these field type firing tests taken together with the results of the laboratory tests with the 40-mm fuse as cited above, indicate that a well-designed shutter can eliminate premature of warheads if the fuse detonator should fire prematurely in the out-of-line condition. The tests also show, however, that if premature firing occurs during the arming cycle, the warhead may be detonated.

* This corrosion was not necessarily copper azide.

** From data presented above, one would presume that copper azide corrosion was present in 30 - 40% of the fuses tested.

***Blinks in British terminology is equivalent to duds in U.S. usage.

U. S. Ordnance

Mk 77 Mod 2 Fire Bomb. Between 27 June and 15 September 1966, there occurred at least four explosive incidents involving the use of the M157 fuse and M15 igniter. These items are components of the Fire Bomb Mk 77 Mod 2. The M157 fuse (Figure 5) contains the M26 Stab Primer which has lead azide in a gilding metal cup. This primer initiates a black powder booster charge. A burster containing lead azide and tetryl is in the M15 igniter (see Figure 6). Loud noises, flashes, and arcs occurred when the igniter and fuse were being assembled to the bomb. The explosive devices of the fuse and igniter were still intact afterwards. Copper azide was found and positively identified on the primers but this did not satisfactorily explain the incidents nor why the explosive devices had not fired. On 29 September 1966, after some fire bombs had been assembled, a marine was picking up the expended arming wires and brass Fahnestock clips, which are part of the fuse, when one clip exploded in his hand and flew about 50 feet. Investigation revealed the presence of copper azide corrosion on the clips. (See Figure 7.) The copper azide resulted from the attack of the hydrazoic acid vapor generated from lead azide in the burster. It was concluded and verified experimentally that the "cracking and flashing" of the clips resulted from static or RF initiation of the copper azide.

M52A1B1 Mortar Fuse. The M52A1B1 Mortar Fuse, used in 81-mm ammunition, was involved in a premature explosion in 1971 (8). Two marines were killed in a training mission when a round exploded 25 feet from the mortar. No precise cause was found by the board of inquiry. However, subsequent laboratory tests revealed that the effects of high temperature and humidity on lead azide of the M18 Detonator and the M32 fuse could cause formation of hydrazoic acid and result in copper azide formation on the brass fuse slider. The M18 detonator consists of lead azide priming mix, lead azide, and tetryl in an aluminum cup. The laboratory tests (9) revealed the feasibility of the copper azide formed on the slider being initiated by friction encountered in the arming cycle.

20-mm - M40 McAlister. 25 January 1971. Three men were killed during the demilitarization process of 20-mm AA projectiles Mk 3 fused with the fuses Mk 26 Mods 0, 1, and 2. (See Figure 4.) The fuse Mk 26, as already noted, was adopted from the British fuse No. 254 and thus is very similar to it. A significant exception is that the detonator

containers are nickel-plated brass* in the Mod 0 version, and aluminum in the Mods 1 and 2. As in the 254 fuse, the detonators themselves are not hermetically sealed. The United States 20-mm round is manufactured to withstand a 40-foot drop. The demilitarization process normally involved six men. At the time of the explosion only three men were operating the equipment. One operator was taking projectiles from an open box and placing them on a belt feed conveyor which took the projectiles to the furnace. The projectiles had been previously separated from the cartridge cases and were repacked in metal boxes. Each box normally contained 600 rounds. The most probable cause of the explosion was a projectile, over sensitive with copper azide corrosion, firing when it was accidentally dropped. The exploding projectile set off adjacent boxes on the roller conveyor and then a pallet load of ten boxes (10). Copper azide was formed during storage of the unsealed projectiles in a humid atmosphere.

M60A2 Fuse - NAD Hawthorne, 25 May 1971. Three persons were killed on the renovation line of a 3.5-inch baroque round, the fuse of which has an in-line explosive train (11). In the fuse, lead azide is in a copper cup with a copper disc seal and a brass triangle with a copper strip and firing pin immediately above. (See Figure 1.) The most likely cause of the explosion was determined to be a reworked and improperly assembled rocket that fired when it was carelessly allowed to drop and impact against the bottom plug of the container into which it was being placed. Copper azide was only remotely suspected. Investigations revealed the presence on the copper parts of a blue discoloration which was believed to be the copper salt of a fatty acid (12).

IV. Discussion of Accidents and Incidents

Copper azides situated on moving parts can be initiated by friction. If present on exposed surfaces they can be initiated by static electricity as well. In weapons with in-line explosive trains this can cause catastrophic accidents during the handling process, or be a cause of premature detonations upon firing, for instance, within a gun barrel. A review of the accidents cited above reveals that fatalities

* Very early models used brass detonator cups that were not plated. Some fuses containing such detonator cups may still have been in the rounds for demilitarizing.

have occurred only in weapons incorporating uninterrupted explosive trains.* It is likely, in these accidents, that copper azide initiated the sensitive detonator and the complete explosive train, including the main charge filling, then functioned as it was designed to do. Fuses designed according to accepted safety principles, such as those of MIL-STD 1316, preclude in-line explosive trains. New in-line fuses should not get into military systems. It would seem wise to get rid of all in-line fusing systems now used by the services. Due caution should be used in any demilitarization program involving uninterrupted fuse trains.

The assessment of the effects of the corrosion on safety and proper functioning of explosive trains with interrupted systems is more complex. Since hydrazoic acid can be a gas under military storage conditions any copper-bearing material in a fuse in which hydrazoic acid is formed may be subject to attack; this attack is not limited to materials directly in contact with the lead azide. In fact, there have been incidents where corrosion has been found on shutters of fuses. That this corrosion can be ignited during the arming cycle has been demonstrated. Firing of copper azide in well-designed, shuttered fuses is not likely to lead to serious accidents from main charge firings but will lead to fails.** However, if the azide corrosion is ignited late in the arming cycle of the fuse, prematures could conceivably occur before safe separation*** and cause serious and even fatal accidents. The accident reported in reference (8) is a possible example.

Available evidence shows that copper azide corrosion does occur and that the most sensitive of the corrosion products occur early in the corrosion process. Later these are transformed to more insensitive compounds. The rate of formation and transformation will vary from item to item depending on the individual item's temperature and internal humidity. These facts may account for the difficulty often experienced in proving that items from the same lots involved in accidents show no evidence of supersensitivity.

* The accident with the mortar fuse NS1A181 might well be an exception to this but cannot be proved. It seems only fortuitous that the British did not have fatalities with the three-inch fuse involved in so many prematures, including muzzle bursts.

** In a well-designed fuse, safe separation between weapon and launcher occurs before the fuse explosive train can communicate detonation to the warhead.

*** i.e. with improper fuse design.

The use of lead azide in primers and detonators became wide-spread a few years after World War II. The incompatibility of lead azide with copper (and many other metals) was known at the time that it was first put into Navy systems. Thus, the Navy loaded lead azide only in cups of aluminum or stainless steel. These are metals with which lead azide is compatible. However, early designers of detonators and fuses containing lead azide did not appreciate the fact that one product of lead azide hydrolysis, namely hydrazoic acid, was gaseous well below normal storage temperatures. Because of this we find examples of detonators containing lead azide loaded in compatible cups but then inserted into unsealed systems containing copper, brass, and other high copper content metals. Such systems are potentially subject to copper azide formation because the gaseous hydrazoic acid can diffuse from the site of its formation and attack the copper.

When the gaseous nature of hydrazoic acid was understood Navy in-house designs of azide-containing explosive trains were accomplished, for the most part, without the use of copper or copper alloys. There are some recent designs of hermetically sealed Navy primers and detonators containing lead azide that have azide-compatible tin or silver plated copper containers. The plating and the solder seals are believed to be effective methods of avoiding copper azide corrosion.

Lead azide is the best initiating military explosive available. It has exceptional thermal stability, extremely rapid build up to detonation, high density, good flow properties, good priming ability, reasonable compatibility with other explosives and priming mixture ingredients, and is inexpensive and readily available. There is no suitable replacement material for it at present. That is why it is so widely used. The incompatibility problems with lead azide can be overcome by using only those construction materials with which it is compatible and/or by sealing it hermetically in its container so that moisture does not reach it and hydrazoic acid is not formed. The Navy is supporting effort on the hermetic sealing of nonelectric detonators by ultrasonic welding. Electric items are already being hermetically sealed by soldering and welding. These are effective techniques and are proving highly worthwhile. It is expected that the Navy will shortly issue an instruction prohibiting the use of lead azide in situations where copper azide could form unless the lead azide is hermetically sealed in its container. It is understood that the Army has recently prohibited the use of copper and copper alloys in fuses containing lead azide.

Other methods for preventing copper azide corrosion products have been investigated. These include non-metallic protective coatings such as varnishes, lacquers, and plastics, metallic platings such as tin, chemical inhibitors, sacrificial metals, and explosives other than lead azide. In general these methods have not lead to satisfactory explosive component, fuse train, and fuse designs.

V. Conclusions and Recommendations

This review has convinced us that copper azide formation in weapons does pose a threat and that consideration must be given to the prevention of copper azide in weapons.

Although copper azide has been the cause of many handling accidents, and although it must be considered a major suspect in accidents with unshuttered fuses where it can be formed, it is not the only possible cause of such accidents. Other mechanisms for accidental firings can be conceived, and each accident must be investigated for its own peculiar circumstances.

Based on our findings the following recommendations are made:

(a) The military should as rapidly as feasible remove from service all weapon fuses containing unshuttered explosive trains that employ primary explosives. If these trains contain lead azide and copper or copper-bearing metals they must be treated as being extremely hazardous.

(b) A review should be made of all in-service weapon fuses to identify those that have potential copper azide problems.

(c) A research program should be undertaken to develop a new primary explosive having the good attributes of lead azide (sensitivity, density, build-up rate, thermal stability, etc.) and, in addition, having compatibility with the usual materials of construction for fuses and explosive trains.

(d) Insofar as possible, fuse train explosive components (primers, detonators, delays, leads) should be designed to incorporate hermetic seals.

ALTERNATIEVE SCENARIO'S

Indien de oorzaak van een ongeval niet met volstrekte zekerheid is aan te tonen, is het geboden zoveel mogelijk alternatieve scenario's op te stellen en de waarschijnlijkheid te overwegen of deze zich daadwerkelijk kunnen hebben voorgedaan. Omwille van de beknoptheid van de hoofdtekst zijn scenario's die als (zeer) onwaarschijnlijk of als onmogelijk zijn te duiden, in deze bijlage opgenomen.

Scenario granaat niet passend bij mortier

Het is onwaarschijnlijk dat gebruik van een granaat die niet past bij de schietbuis heeft geleid tot het ongeval. Indien de diameter van de mortier te klein is zal de granaat of niet passen of blijven hangen in de mortier waardoor de benodigde versnelling voor wapening niet kan optreden. Bij een te grote diameter van de mortier, zal de gasdruk waarschijnlijk te laag zijn om de granaat voldoende te versnellen om wapening te bereiken (door het lekken van gas tussen de buitenwand van de granaat en de binnenwand van de mortier). Mocht de versnelling toch groot genoeg zijn, dan zal wapening pas optreden na het wegvallen van de versnelling, en dus na het verlaten van de mortier. Een detonatie kan in dat geval alleen optreden buiten de mortier en niet onderin de mortier zoals in Kidal is opgetreden.

Scenario sabotage/misdrijf

Het is theoretisch mogelijk het ontstekingsmechanisme (de schokbuis) van een mortiergranaat door manipulatie op scherp te stellen. In dit scenario neemt een kwaadwillend persoon een granaat uit de munitievoorraad weg. Met gedetailleerde kennis van zaken demonteert deze persoon de granaat en verwijdert uit de schokbuis de kogels die de vrije beweging van de slagpin blokkeren. Vervolgens drukt de saboteur de slagpin en terugslagklep terug in het buislichaam, schuift de sluiters met de gevoelige primerlading onder de gemobiliseerde slagpin en schroeft het geheel weer in elkaar. Dit is een gecompliceerde en riskante serie handelingen omdat de primerlading onder de slagpin moet worden geplaatst terwijl de slagpin onder veerspanning staat.

Ten slotte legt de saboteur de scherpgestelde granaat weer terug in de munitievoorraad. De waarschijnlijkheid van dit scenario is uiterst gering, omdat het de combinatie vereist van kwaadwillendheid, munitiedeskundigheid en toegang tot de munitievoorraad, verenigd in één persoon. Bovendien bestaat de kans dat een op scherp staande schokbuis tot een vroegtijdige detonatie leidt als gevolg van een schok of trilling tijdens transport. Ook het Openbaar Ministerie (OM) heeft tot op heden geen aanwijzingen gevonden voor sabotage of misdrijf.

Scenario disfunctioneren van de schietbuis

Op basis van de analyse van het beeldmateriaal van het ongeval is vastgesteld dat de fatale granaat een normale valbeweging heeft gemaakt naar de bodem van de schietbuis, waar de inslag van de slagpin de grondkardoes op normale wijze heeft ontstoken. Microscopische studie van het teruggevonden staartstuk van de granaat leidde tot dezelfde conclusie. Hieruit valt af te leiden dat er geen obstructie in de schietbuis geweest is die de lancering van de granaat heeft onderbroken. Als de granaat immers vrij in de buis kan vallen, zal een beweging in omgekeerde richting evenmin door de buis gehinderd worden. Het is om dezelfde reden niet waarschijnlijk dat sediment (aangekoekte verbrandingsproducten) aan de binnenzijde van schietbuis een rol heeft gespeeld. De buis is bovendien kort voor het ongeval nog door de schutters schoongemaakt. Bij optische inspectie van de binnenzijde van de restanten van de schietbuis zijn geen onregelmatigheden aangetroffen, anders dan veroorzaakt door de detonerende granaat. Ook hebben metingen aan de binnenzijde van de schietbuis geen afwijkingen van de cilindrische vorm opgeleverd.¹²

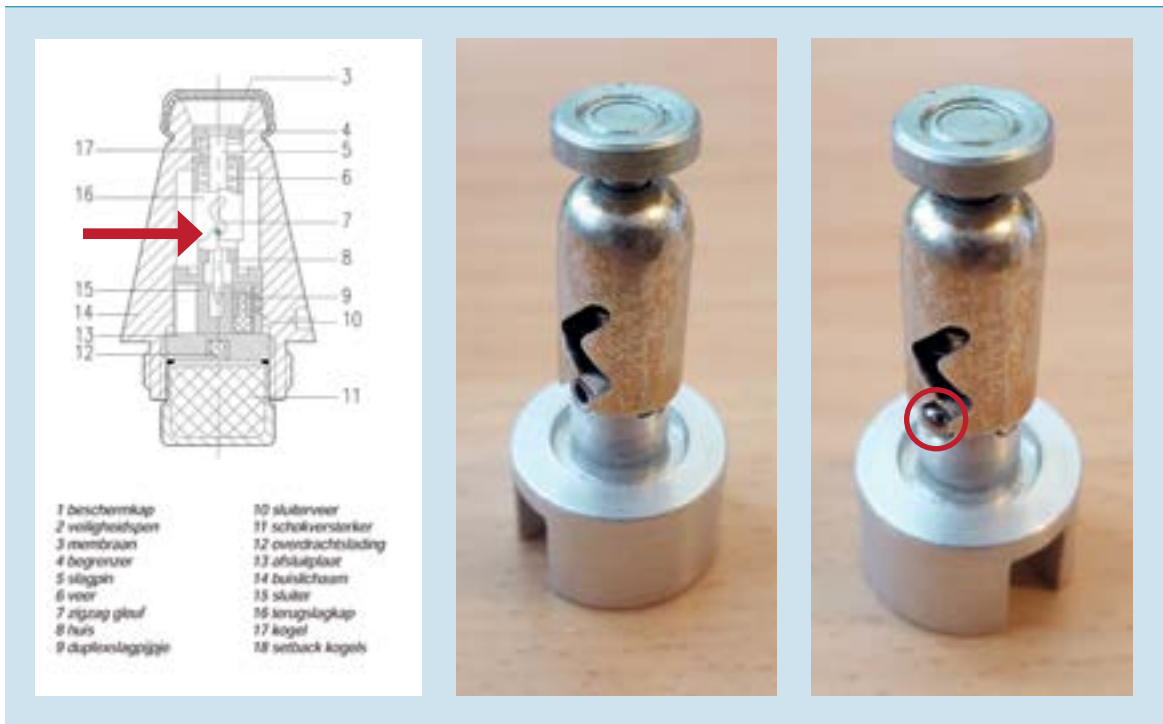
De conclusie luidt dat het ongeval niet is veroorzaakt door onregelmatigheden aan de schietbuis.

Scenario productiefout schokbuis

Voor het inschatten van de waarschijnlijkheid van een productiefout is het ontwerp van de schokbuis gedetailleerd bestudeerd. De schokbuis is in de Bulgaarse fabriek met de hand samengesteld waarbij gebruik gemaakt wordt van mechanisch gereedschap. Iedere schokbuis wordt visueel gecontroleerd tijdens het assemblageproces. Tevens worden er op ieder lot acceptatietesten uitgevoerd waarbij schokbuizen een tril- en valproef ondergaan, gevolgd door demontage en visuele inspectie (zie Bijlage L).¹³

¹² Zie Bijlage L: Schriftelijk antwoord producent op vragen Onderzoeksraad (brief directie Arsenal 2000 JSC, 20 april 2017).

¹³ Informatie over de productie van de schokbuis is verkregen tijdens bezoek aan de firma Arsenal 2000 in februari 2017 en nadien in de vorm van notities van de directie van de wapenfabriek.



Figuur K1: Links: schokbuis met dwarspin in de 'zigzag-gleuf' groen aangegeven. Rechts: onderste setback-kogel in positie onderaan de zigzag-uitsparing in de terugslagklep. (Bron: Defensie/TNO)

Potentiële fouten die tijdens de productie zouden kunnen ontstaan zijn gesimuleerd door de schokbuis bewust foutief te assembleren. Voor de onderstaande analyse wordt verwezen naar figuur K1. De volgende productiefouten zijn geanalyseerd:

- Ontbreken van de slagpin. Dit is uitgesloten; assemblage van de schokbuis is zonder slagpin niet mogelijk.
- Aanbrengen van een ondeugdelijke slagpin.
- Dit is zeer onwaarschijnlijk omdat het zichtbaar is tijdens assemblage. Indien de punt van een ondeugdelijke slagpin afbreekt door een schok of trilling (na corrosie) dan kan de sluitveer onder veerspanning "in lijn" komen. Initiatie van de detonator door een slagpin zonder punt is echter onmogelijk omdat de slagpin pas vrij kan bewegen na de traagheidskracht die optreedt bij afvuren. Ontbreken van de veer onder de terugslagklep. Dit is uitgesloten; assemblage van de schokbuis is zonder veer niet mogelijk.
- Aanbrengen van een ondeugdelijke veer onder de terugslagklep. Dit is zeer onwaarschijnlijk; dit valt op tijdens assemblage. In het onwaarschijnlijke geval dat de veer tijdens de levensduur bezwijkt (bijvoorbeeld door corrosie en onder de eigen veerspanning) en de terugslagklep daardoor voldoende kan bewegen door schok of trilling om de bovenste setback kogel vrij te laten vallen, kunnen ook de kogels onder de terugslagklep vrij vallen door schok of trilling. Hierna kan de slagpin vrij bewegen en de schokbuis "op scherp" komen te staan. Schok of trilling tijdens transport kan leiden tot initiatie van de primer doordat deze geraakt wordt door de slagpin. Om dit scenario te simuleren is een veer halverwege doorgeknijpt en onder de terugslagklep geplaatst. Vervolgens is de schokbuis geassembleerd; deze bleek niet op scherp te krijgen door handmatige schokken of door trillingen.

- Ontbreken van de terugslagklep. Dit is uitgesloten; assemblage van de schokbuis is zonder terugslagklep niet mogelijk.
- Ontbreken van de bovenste setback kogel (nr 17 in figuur K1). Dit is zeer onwaarschijnlijk omdat assemblage van de schokbuis vrijwel onmogelijk is.
- Ontbreken van de twee setback kogels onder de terugslagkap (nr 18 in figuur K1). Dit is mogelijk maar kan niet hebben geleid tot het ongeval; door de traagheidskracht zal de schokbuis scherpstellen na het verlaten van de schietbuis en niet in de schietbuis, ongeacht de aanwezigheid van deze kogels.
- Ontbreken van de sluiterveer. Dit is mogelijk maar kan niet hebben geleid tot het ongeval; de slagpin verlaat de sluiterspas bij het verlaten van de schietbuis waardoor de schokbuis niet op scherp komen te staan in de schietbuis.
- Ontbreken van de sluiterspas. Dit is zeer onwaarschijnlijk; het ontbreken van de sluiterspas valt op bij de assemblage. Zonder sluiterspas ontbreekt ook de primer.
- Verkeerd plaatsen van de sluiterspas. Dit is zeer onwaarschijnlijk; wanneer de sluiterspas (met of zonder sluiterveer) met de opening voor de primer onder de slagpin wordt geplaatst dan zal bij het plaatsen van de primer de punt van de slagpin in de primaire springstof worden gedrukt. Bij deze handeling kan de primer tot ontploffing komen. Mocht dit toch hebben plaatsgevonden zonder een explosie, dan kan de primer tot ontploffing komen door trillen of schokken tijdens transport.
- Ontbreken van de afsluiterspas. Dit is zeer onwaarschijnlijk; het ontbreken van de afsluiterspas valt op bij de assemblage. Zonder afsluiterspas ontbreekt ook de overdrachtslading; indien de sluiterspas met de primerlading vrij kan bewegen in de loze ruimte, is initiatie van de primerlading door de schok bij lancering niet krachtig genoeg om de booster te initiëren.
- Verwisseling van de primer en overdrachtslading. Dit is uitgesloten; de cupjes van beide ladingen hebben een andere afmeting. De primer past niet in de afsluiterspas en de overdrachtslading past niet in de sluiterspas.

In de categorie productiefouten in de schokbuis, verdient één scenario bijzondere aandacht, namelijk het ontbreken van de dwarspin in de 'zigzag-gleuf' van de terugslagkap. Het is gebleken dat het ontbreken van deze dwarspin kan leiden tot voortijdige wapening van de schokbuis door mechanische schokken.

De stalen dwarspin (groen in figuur K1), die vast gemonteerd is aan het aluminium sluitershuis in het centrum van de schokbuis, dient om weerstand te geven aan de op- en neergaande bewegingen van de terugslagkap en de slagpin. Deze weerstand geeft een vertraging in het wapeningsmechanisme van de schokbuis, wat er voor zorgt dat de granaat zich pas in de loop van zijn vlucht op scherp stelt (de zogenaamde maskerveiligheid). Ontbreekt de dwarspin, dan ondervindt de terugslagkap met de slagpin minder weerstand in zijn verticale bewegingen, waardoor de schokbuis gemakkelijker in de gewapende stand kan geraken.

De dwarspin is een cruciaal onderdeel van het veiligheidsmechanisme van de schokbuis. Valtests met een granaat waarvan de dwarspin uit de schokbuis is verwijderd, leveren op dat bij een valhoogte van ongeveer een meter de schokbuis zich wapent. Omdat bij het ontbreken van de dwarspin de terugslagkap vrij om zijn as kan draaien, kan het ook nog gebeuren dat door trillingen een van de onderste *setback-kogels* in positie komt

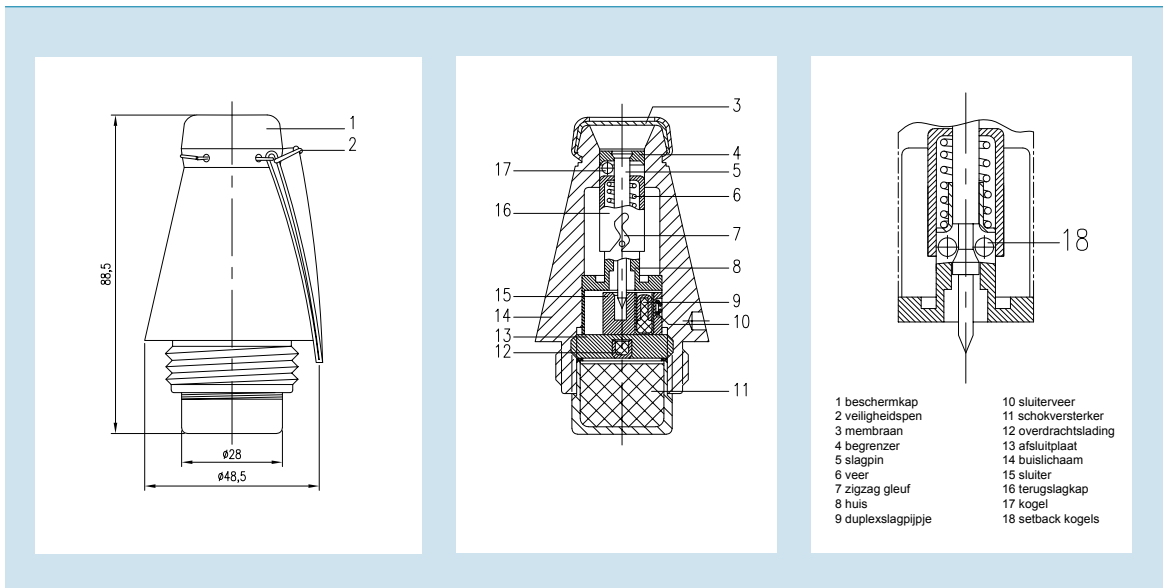
onderaan de zigzag-uitsparing in de terugslagkap (zoals op de rechter foto in figuur K1). In die situatie is experimenteel vastgesteld dat de schokbuis zich kan wapenen door een minimale schok in elke richting. Wapening door een val of door schokken tijdens transport is dan zeker mogelijk. Tevens is experimenteel vastgesteld dat voor een eenmaal gewapende schokbuis de slagpin het slagpijpje raakt bij een valhoogte van vijftien tot twintig centimeter, dus bij een aanzienlijk geringere schok dan nodig is om wapening te realiseren voor een schokbuis zonder dwarspin. Het lijkt daarom onwaarschijnlijk dat een mortiergranaat met een eenmaal gewapende schokbuis een transport kan doorstaan zonder dat deze onderweg detoneert.

Afwezigheid van de dwarspin zou dus een uiterst gevaarlijke schokbuis opleveren, maar het is onwaarschijnlijk dat het ontbreken van een dwarspin door een productiefout zou ontstaan. Het staat vast dat de dwarspin tijdens de fabricage machinaal in het aluminium sluitershuis (centraal in de schokbuis) wordt geperst,¹⁴ waarna lokaal het aluminium rondom de dwarspin wordt vervormd (gekrompen) zodat een zeer sterke verbinding ontstaat. Als het al mogelijk is dat deze stap in het productieproces wordt overgeslagen, dan nog is het onwaarschijnlijk dat een ontbrekende dwarspin tijdens de assemblage van de schokbuis niet wordt opgemerkt. Die assemblage gebeurt namelijk met de hand¹⁵, waarbij de monteur de terugslagkap zodanig in positie moet brengen dat de dwarspin in de zigzag-uitsparing valt. De monteur moet dus naar de dwarspin 'zoeken' en zal het daarom opmerken indien het onderdeel ontbreekt. Ter verificatie is een dwarspin mechanisch verwijderd. De daarvoor benodigde kracht bleek dermate groot dat (ook na potentiële corrosie) breken of lostrillen van de dwarspin onmogelijk wordt geacht. Het ontbreken van de dwarspin als oorzaak van het ongeval kan, evenals andere productiefouten, derhalve als onwaarschijnlijk worden aangemerkt.

De samenvattende conclusie luidt dat het zeer onwaarschijnlijk is dat het ongeval is veroorzaakt door een productiefout bij de fabricage van de schokbuis.

¹⁴ Zie Bijlage L: Schriftelijk antwoord producent op vragen Onderzoeksraad (brief directie Arsenal 2000 JSC, 20 april 2017).

¹⁵ Zie Bijlage L: Schriftelijk antwoord producent op vragen Onderzoeksraad (brief directie Arsenal 2000 JSC, 20 april 2017).



Figuur K2: 60 mm mortiergranaat HE80 (links) en M6-N schokbuis (rechts). (Bron: Defensie)

Scenario scherpstellen van de schokbuis door schok en/of trilling bij een val of transport
 In Mali werden de mortiergranaten van Gao naar Kidal vervoerd per vrachtwagen.¹⁶ Tijdens deze drie dagen durende rit over onverharde wegen werden de granaten blootgesteld aan hevig schokken en trillen. De Raad heeft onderzocht of de granaten hierdoor mogelijk op scherp zijn komen te staan. Dit onderzoek wijst uit dat het scherpstellen van de M6-N buis door schok of trilling zeer onwaarschijnlijk is om de volgende redenen:

- Onderzoek door de Commissie van Onderzoek (CvO) heeft uitgewezen dat: “ondanks de grootte van de toegediende krachten als gevolg van de grootst mogelijke omgevingsbelastingen die dit artikel tijdens zijn levenscyclus kan ondergaan, de tijdsduur van deze krachten niet voldoende is voor externe wapening”.¹⁷ Dit onderzoek is door TNO gevalideerd.
- Röntgeninspectie van 41 mortiergranaten, waaronder minimaal 10 stuks uit hetzelfde lot als die van het ongeval (04/07 A11), heeft met zekerheid uitgewezen dat er in Kidal, Mali geen enkele schokbuis in de gewapende stand aanwezig was. Figuur K2 geeft ter illustratie een röntgenfoto van een schokbuis in de veilige stand; de drie setback kogels zitten in de veilige positie, de terugslagklep en begrenzer van de slagpin drukken niet tegen het membraan, de holte rechts van de sluitter is vrij en de punt van de slagpin steekt in de sluitter.
- Uit een theoretische analyse¹⁸ van de benodigde versnelling voor wapening volgt dat wapening niet optreedt (zie Bijlage F) bij een val van een hoogte van 1 m, en onwaarschijnlijk is voor valhoogtes tussen 1 en 4,5 m. Ook door schokken en trillingen volgens testprotocol¹⁹ treedt geen wapening op.

¹⁶ Granaten werden soms ook per helikopter vervoerd.

¹⁷ Intern onderzoek Defensie.

¹⁸ R.H.B. Bouma, P.A. Hooijmeijer, E. Kroon, TNO 2017 R10160 Ongeval mortieroefening Mali: analyse van benodigde versnelling om schokbuis te wapenen, Februari 2017.

¹⁹ Het gaat om de volgende tests: de loose cargo test, een schok vergelijkbaar met de half-sine pulse classical waveform, een trilling met sinus-sweep en een trilling voor tactical wheeled vehicle – all terrain. Allied Environmental Conditions Testing Publication (AECTP) 400, Edition 3, Mechanical environment test, 2006.



Figuur K3: Röntgenfoto van de schokbuis in de veilige stand. (Foto: Defensie)

Tijdens een bezoek van de Onderzoeksraad aan de firma Arsenal JSCo op 9 februari 2017 werd meegedeeld dat Arsenal een veilige valhoogte ("safe drop height") garandeert van drie meter voor de M6-N schokbuis. Daarop is door de Raad ter verificatie een valtest uitgevoerd vanaf een hoogte van ongeveer 4,5 meter. Het wapeningsmechanisme bleek na deze test niet op scherp te staan.²⁰

De conclusie luidt dat zowel uit experimentele waarnemingen als uit theoretische analyse blijkt dat het zeer onwaarschijnlijk is dat de fatale granaat op scherp stond door een schok of een trilling. Röntgenbeelden van het restant granaten in Mali, dat dezelfde mechanische belasting heeft meegemaakt als de ongevalsgranaat, bevestigen deze conclusie.

²⁰ Dit gold ook voor een aantal valtests met dezelfde oriëntatie van het granaatlichaam vanaf een hoogte van ongeveer twee meter op een houten, aluminium en stalen ondergrond.

ANTWOORDEN ARSENAL

To: Dutch Safety Board – The Netherlands

In reply to your e-mails dated April 3 and April 10, 2017 we would like to submit you the following information regarding Fuze M6-N:

In the attached picture one of the mechanisms of Fuze M6-N is shown – the **Piercing mechanism** – non-armed and thereto are added Slider (Primer carrier) non-armed, Sleeve of the lead charge and Spring – separately.

This mechanism ensures the Fuze safety during handling, storing, transportation, drop from a height of 3 meters and its reliable functioning after the shot is fired.

Assembling of the mechanism is carried out manually with mechanized operation positions, requiring applying of pressure through specialized equipment – driving- in and crimping of the striker and driving-in of the pin into the sleeve with force.

We emphasize on the fact that the Piercing mechanism is individual assembled unit, the assembly and subsequent use of which **cannot be achieved in the absence of any of the components**.

The In-process control operations during the assembling processes, which control the requirements for reliable operation and safety, are carried out manually and are executed on 100% of the manufactured assemblies.

Before the assembling of the membrane to the body, the free spring-loaded motion of the Piercing mechanism is 100% controlled, which ensures the assembling correctness and its operational reliability.

Further, in the acceptance process of each lot, the following tests are carried out:

1. Jolting Test – inspection of Fuze safety (non-arming of the mechanisms) when subjected to mechanical stresses through jolting from height H=100mm with frequency 60 strokes/min on a specialized stand –followed by a subsequent disassembly and visual inspection.
2. Drop Test – Inspection of Fuze safety (non-arming of the mechanisms) when attached to a dimensional-and-weight replica of mortar bomb, upon drop from 3m height on a cast-iron plate - followed by a subsequent disassembly and visual inspection.

During the tests 1 and 2 non-compliance with the Technical documentation is not allowed.

Question 1: How is the pin inserted in the housing during production?

Reply: During the production the pin is inserted with pressing force in the Setback cap (it is a press fit assembly), and then it is additionally crimped along the circumference (See Figure 1). This operation is performed manually in a special pressing device. Shaking and rotation of the pin is not permitted. This requirement is 100% controlled.



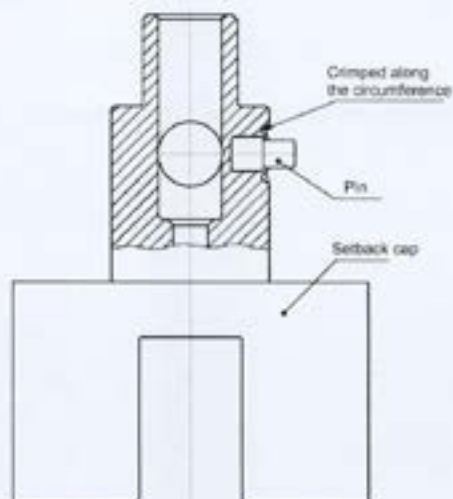


Figure 1

Question 2: *Were the housing, spring, setback cap and balls assembled manually or with an automated process (at the time of production around 2006)?*

Reply: The assembly of the impact-safety mechanism (housing, spring, setback cap, balls and striker) was fulfilled manually.

Question 3: *Was the assembly visually controlled or by an automated process (at the time of production around 2006)?*

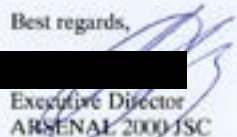
Reply: The impact-safety mechanism (housing, spring, setback cap, balls and striker) was subjected to 100% control with regard to the smooth movement (reciprocating movement) of the setback cap.

Question 4: *Have you ever encountered a missing pin during the production or quality control process?*

Reply: We have never so far encountered such a case of a missing pin during the production. Shaking or rotation of the pin is not permitted. This requirement is 100% controlled. (See the reply to Question 1).

We hope the submitted information will be useful for you.

Best regards,


Executive Director
ARSENAL 2000 JSC

EERDERE VOORVALLEN MET MORTIERGRANATEN

De Raad heeft literatuuronderzoek gedaan naar eerdere voorvallen met mortiergranaten. Hij heeft daarbij gebruik gemaakt van de database van het *Munitions Safety Information Analysis Center (MSIAC)* van de NAVO en van openbare informatiebronnen. De resultaten zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Datum	Voorval	Locatie	Oorzaak
1971	Opgeblazen mortier leidt tot twee doden en een gewonde.	Paratroops in Ghana.	Onbekend.
18-03-1982	Voorval resulterend in drie doden of gewonden tijdens een oefening waar met scherp geschoten werd.	Otterburn Ranges in Northumberland.	Onbekend.
09-12-1997	Mortier explosie, vijf gewonden.	Training, Kilworth Camp, Cork.	Dubbellader.
18-06-2007	81 mm mortiergranaat detoneert in schietbuis, een dode bij de NL Luchtmobiele Brigade, drie gewonden bij de NL Landmacht.	Chora, Afghanistan.	Waarschijnlijk dubbellader.
11-06-2010	Detonatie van mortiergranaat in de mortier tijdens Deense schietoefening met 60 mm granaat van fabrikant Expal. Twee doden en twee gewonden.	Denemarken, Oxbøl Camp nabij Varde.	Gewapende schokbuis.
18-03- 2013	Explosie van 60 mm mortiergranaat, zeven marines gedood.	Nevada's Hawthorne Army Depot.	Dubbellader.
2013	Explosie mortiergranaat in de mortier. https://www.youtube.com/watch?v=dstGdAHGL30	Onbekend.	Onbekend.

Datum	Voorval	Locatie	Oorzaak
02-07-2013	<p>Tijdens een oefening van het Afghaanse leger is een mortiergranaat gedetoneerd in de mortier. Bij het ongeval zijn drie Afghaanse militairen om het leven gekomen en een informatiespecialist van het Amerikaanse leger, daarnaast waren er elf gewonden.</p> <p>Dit ongeval is geregistreerd in de NATO MSIAC database zonder vermelding van type granaat en schokbuis.</p> <p>Navraag van de Raad bij de US-Army Combat Readiness Center wijst uit dat het, net als bij het ongeval in Mali, gaat om een 60mm HE80 granaat met M6-N-fuze van de firma Arsenal.</p>	Qaraghahi, Afghanistan.	<p>De in de MSIAC-database geregistreerde oorzaak (mismatch tussen granaat en mortier) blijkt bij navraag niet correct.</p> <p>Amerikaans onderzoek stelt: "The HE80 is compatible with the M224 system however, the HE80 round does not have an approved safety release for use by U.S. forces due to the fuzes most commonly associated with the HE80. The M6H fuze has not been certified by the U.S. Army fuze safety review board for use. The concern is premature detonation of the round before it leaves the tube."</p>

BEOORDELINGEN TOGOLESE ROLE-2

Deze bijlage bevat een samenvatting van de verschillende Nederlandse beoordelingen van de Togolese *role-2* in de periode 2014-2016. De eindconclusies uit de rapportages zijn letterlijk weergegeven in een kader.

Eerste bezoek oktober 2014

Dit bezoek op locatie Mopti vond plaats om een algemeen beeld te krijgen van de kwaliteit van de *role-2* faciliteit. In het verslag valt te lezen dat de faciliteit door loslatende plafondplaten een rommelige eerste indruk maakt. Bij de inspectie van de SEH valt op dat er geen traumaprotocollen zichtbaar zijn en de opvang geschiedt op "gewone ziekenhuisbedden" en niet op speciale traumakamerbedden. De OK is ingericht met twee operatietafels. De traumachirurg blijkt te zijn opgeleid in het Franse leger. De IC omvat twee bedden en er kan zuurstof worden toegediend. Het bloed (veertig zakken vol bloed) wordt bewaard in de koelkast van de apotheek. De ziekenzaal, het laboratorium en de spreekkamer van de arts zijn ondergebracht in losse tenten die jaren geleden geschonken zijn door het Amerikaanse leger. De tenten zijn niet met elkaar verbonden.

Letterlijke weergave conclusie Defensie

Indien de level2 van Togo in het gebied zou blijven, kan dit worden gebruikt worden door Nederlanders. Het is niet optimaal, maar voor eerste chirurgische opvang voldoet het. Bij het wegvallen van de Togolese level 2 kan alleen worden teruggevallen op het lokale ziekenhuis. Hiermee zijn door de VN nog geen afspraken gemaakt, vooralsnog dient men contant te betalen. Op medisch gebied zijn de nodige vraagtekens te zetten bij de bezetting en kunde van het personeel van dit ziekenhuis. De capaciteiten en ruimtes zijn prima. Op veiligheidsgebied maakt Mopti een andere indruk. Het risico op trauma is daar lager dan een stad als bijvoorbeeld Gao of Kidal. Het risico van een "matig" ziekenhuis zal dus moeten worden afgewogen tegen de kans op trauma in een relatief veilig gebied.

Tweede bezoek maart 2015

Dit is het eerste bezoek na de verplaatsing naar Kidal. De ontvangst door de commandant (kolonel-arts) is gastvrij en het team wordt door de anesthesist rondgeleid. De staf is zowel Frans- als Engelstalig en omvat verder een algemeen chirurg en een traumachirurg/orthopeed. Het hospitaal is nog niet operationeel vanwege gebrek aan water, waardoor men niet hygiënisch kan werken en er niet kan worden gesteriliseerd. Ook is er geen bloed aanwezig, maar men rekent op tien zakken bloed afkomstig van Sanquin uit

Nederland. De SEH is direct voor ambulances bereikbaar en bestaat uit twee ziekenhuisbedden, die met het hoofdeinde tegen de wand zijn geplaatst. Hierdoor is het hoofd van de patiënt niet van achteren benaderbaar voor bijvoorbeeld beademing. Elk bed beschikt over een monitor (Propaq), AED (Zoll) en uitzuigapparatuur (Laerdall) en is voorzien van een eigen zuurstoffles met maskerballon. Verder staat er een infuuspomp, beademingsapparatuur en een *crashcar* met onder andere een intubatieset. De IC, die tevens dienst doet als uitslaapkamer, is voorzien van dezelfde apparatuur. De inrichting en uitrusting van de OK zijn hetzelfde als in Mopti. De afdeling radiologie beschikt over één verrijdbaar en één draagbaar röntgenapparaat. Verder zijn er twee echografie-apparaten. De apotheek beschikt over een aparte koelkast voor het bloed.

Letterlijke weergave conclusie Defensie

Een werkbezoek met een rondleiding en de mogelijkheid tot stellen van vragen geeft een goed beeld van de Infra, aanwezige apparatuur en personele bezetting van de MTF. Echter het blijft een indruk en het is onmogelijk om bijvoorbeeld vast te stellen of alle apparatuur werkt, iedereen weet hoe het werkt, wat de exacte opleiding en eventuele nascholing van het personeel is, hoeveel ervaring er in het team is etc.

Wij adviseren om de MINUSMA (TOG) MTF Level 2 te KIDAL, zodra deze FOC is, te gebruiken als Role 2 capaciteit in de planning voor de geneeskundige afvoerketen van NLD militairen binnen deze missie. Wij hebben de indruk dat de basis kwaliteit voor Damage Control Surgery aanwezig is. Afhankelijk van de specifieke medische situatie van een gewonde/zieke NLD militair zal bekeken moeten worden hoe de verdere routing moet gaan. Wij adviseren om altijd een AMA, als het niet mogelijk is een AMV, mee sturen en bij de gewonde/zieke te laten tot aan medical stratevac.

Derde bezoek mei 2015

Dit bezoek wordt afgelegd vanwege de wisselende terugkoppelingen bij eerdere bezoeken. Het bezoek wordt een half uur van tevoren aangekondigd zodat een goed beeld ontstaat van de dagelijkse praktijk. De bezoekers zijn zeer welkom. De faciliteiten beoordelen zij als overzichtelijk en ruim opgezet en de meeste apparatuur is nieuw en ruim voorradig aanwezig. De hygiëne is, voor zover waarneembaar, goed in orde. Daarnaast zijn er afspraken gemaakt dat AMV-ers bij afwezigheid van de eigen arts terecht kunnen in het hospitaal voor een consult.

Letterlijke weergave conclusie Defensie

De role twee van TOGO is een zeer goed toegeruste role 2 met enthousiast en vooral trots personeel. Men is zeer toegankelijk en wil graag helpen waar nodig. Problemen uit het verleden zijn allemaal adequaat opgelost. Men kan nu zelf ruim water zuiveren en elektriciteit genereren. Er kan prima op terug gevallen worden wanneer dat nodig is.

Vierde bezoek oktober 2015

Dit bezoek vond plaats in oktober 2015 omdat men zich zorgen maakte over de inzetbaarheid van het hospitaal. Er bleken problemen te bestaan met laboratoriummaterialen en medicijnen. Bij het bezoek blijkt de apparatuur op de SEH conform het eerdere bezoek, maar de *crashcar* oogt weinig georganiseerd. Zuurstof is beperkt voorradig: er zijn vijf gevulde flessen beschikbaar. In de apotheek blijkt de bloedkoelkast gevuld met van Sanquin afkomstige "O neg. packed cells" en zakken "vol bloed". De temperatuurcontrole van het bloed blijkt onvolledig en baart de controleurs zorgen. De OK lijkt op orde en er kan met de aanwezige chirurg open worden gesproken over de te leveren traumazorg. Het team concludeert dat het hospitaal weliswaar acceptabel is voor DSC, maar slaat de Franse *Role 2* in Gao duidelijk hoger aan. Daarom adviseert men aanvullende maatregelen te nemen in de vorm van gegarandeerde *forward aeromedevac* capaciteit en dat bij gebruik van het hospitaal altijd Nederlands geneeskundig personeel aanwezig moet zijn.

Letterlijke weergave conclusie Defensie

Conclusion

Judging on the current inspection and previous visits, there is not a changed situation on which the view that the TOGO level 2 is acceptable at the minimal level for Damage Control Surgery is sustainable. All equipment is in place, there is some worry about the storage condition of the blood, personal is in place and there are no objective reasons to judge the TOGO 2 would not be able to do DCS at a basic level. Though it is defiantly wiser to think about an "stop the bleeding" approach and consider safer (R2 Barkhane, which proved repeatedly dependable for priority alpha) as the preferred option. Even though I support the DCS qualification, I disapprove of putting the TOGO 2 on the same level with the FRA R2, and object to planning depending heavily on TOGO 2 DCS for higher risk operations with more and more personal without the option (no RW MEDEVAC pre-staged) to fly to Barkane R2.

In conclusion with the SWE recce and advice, I therefore do advice the following safety parameters:

Since the minimal level of acceptability of the TOGO level 2, every stay in Kidal should be planned in cooperation with the medplanner and be handled as an operation. I advice in the light of this the following guidelines:

- I advise to consider the option of not allowing any OPS in the region KIDAL without an NLD RW MEDEVAC pre-staged on kidal. This does limit the availability of night OPS, unless the MEDEVAC can be pre-staged overnight. This would always give the option of Tac-evac to GAO BARKANE in the event of an casualty. This pre-staging might not always be feasible, in which case we have to judge on a case to case basis wether the risk is acceptable. In case we accept this we should put this in option of dispensation, following the same lines we use to get dispensation for the SF medic coverage in relation to the combat nurse.*
- When NLD personal moves outside the 1 hour POI- DCS timeline, there has to be an NLD RW MEDEVAC present to perform FORWARD AE with the guideline to fly preferably to GAO ROLE2 BARKHANE. The call is to be made by the AE DOCTOR on board at the pickup point.*
- If there is NLD personnel treated in the TOGO level 2, for example DCS, NLD medical staff has to be present. This means no movement is possible without medical staff (minimally Nurse) present in the vicinity of KIDAL.*
- Before deployments and on a regular basis, available personnel, drug storage and blood supply(including safety) has to be checked. This has to be at least a nurse, problem here might be that the UN does not allow one nation to inspect another officially, and will object.*
- In the event of an incident around KIDAL without an NLD doctor or NLD RW MEDEVAC present, it is advisable to first do resuscitation at the LEVEL 1 BARKHANE (1hour timeline). This is according to local arrangements, but should also be a matter of concern to discuss if a new TA will be drafted to include all FRA BARKANE medical assets to be allowed to be used in extremis and fall under re-imburement of the Netherlands.*

I advice to strongly reconsider enlarging the footprint in KIDAL without the abovementioned safety parameters, as the Damage Control Surgery of TOGO level 2 MTF is allowed in my view, but not preferred over different options for NLD Personal. The pre-staging of RW AE MEDEVAC during any OPS will mitigate the risks and provide the option to fly to GAO BARKANE R2 even though this might often be slightly over the 2hr timeline, in case faster Damage control surgery is needed, direct flight to the level 2 TOGO can be made.

Vijfde bezoek mei 2016

Bij het laatste bezoek voor het ongeval wordt gemeld dat er problemen met de communicatie zijn en in tegenstelling tot voorgaande bezoeken wordt het verboden om foto's te nemen. De bevindingen op de SEH en OK duiden op een status quo met

voorgaande bezoeken, hoewel de sterilisatie en zuurstofvoorziening beter op orde zijn. In het laboratorium treft men in de koelkast zes zakken O neg. bloed aan. Ze komen uit Nederland, maar het is onduidelijk hoe het met vervoer en opslag is gesteld. De kwaliteit van de chirurgen is niet te beoordelen, maar van de Franse *Senior Medical Officer* hebben de beoordelaars gehoord dat de anesthesist twee jaar stage heeft gelopen in Frankrijk. Het oordeel blijft dat het ziekenhuis bruikbaar is voor DCS. Gezien de slechte kwaliteit van de verpleegafdeling is het naar hun oordeel essentieel om een patiënt na DCS zo spoedig mogelijk te verplaatsen naar de Franse *role-2* in Gao: "Dit maakt dat we slechts *in extremis* gebruik willen maken van de Togo level-2". Ten slotte adviseren zij om per rotatie een *friendly visit* te brengen om de kwaliteit te blijven monitoren.

Letterlijke weergave conclusie Defensie

Naar ons oordeel is de TOGO LEVEL 2 bruikbaar voor Damage Control Surgery. De kwaliteit van de chirurgen is niet te beoordelen, echter uit overlevering van de FRA SMO hoorden we dat de anesthesioloog twee jaar stage in Frankrijk gelopen heeft. De SEH arts is opgeleid in de hoofdstad van Togo. De materialen en hygiëne zijn van acceptabel niveau. Gezien de slechte kwaliteit van de verpleegafdeling is het naar ons oordeel essentieel om na de eerste levensreddende chirurgie NLD patiënt zsm te verplaatsen naar FRA R2 middels AE CH-47D. Dit maakt dat we als NLD slechts in extremis gebruik willen maken van de TOGO LEVEL 2.

Medplanner en SMO zullen op navolgende rotatie overdragen dat het ziekenhuis tot nader order inzetbaar is, echter dat het zeer wenselijk is om per rotatie een 'friendly visit' te brengen ten einde inzetbaarheid en kwaliteit te monitoren. In het geval van (combined) attack of andere omstandigheden die van invloed op de kwaliteit kan zijn zal deze noodzaak hoger zijn.



Bezoekadres

Lange Voorhout 9
2514 EA Den Haag
T 070 333 70 00
F 070 333 70 77

Postadres

Postbus 95404
2509 CK Den Haag

www.onderzoeksraad.nl