



Lange Kleiweg 137
Postbus 45
2280 AA Rijswijk

www.tno.nl

T 015 284 30 00
F 015 284 39 91
Info-DenV@tno.nl

TNO-rapport

TNO-DV 2006 A477

**Rapportage POEMA-2 (Functie Faalanalyse,
Database, Elektronica en Afdichtingen)**

Datum	december 2006
Auteur(s)	ing. W.P.C. de Klerk drs. W. Colpa ir. M.N. Boers ing. G. Herder ing. A.C. Hordijk ing. J.J.T.G. Weijl
Rubricering rapport	Ongerubriceerd
Vastgesteld door	dr. ir. C.D. Sagel-Ransijn (LBB-ABWM)
Vastgesteld d.d.	9 november-2006 (Deze rubricering wijzigt niet)
Titel	Ongerubriceerd
Managementuittreksel	Ongerubriceerd
Samenvatting	Ongerubriceerd
Rapporttekst	Ongerubriceerd
Exemplaarnummer	8
Oplage	25
Aantal pagina's	128 (excl. RDP & distributielijst)
Aantal bijlagen	-

DISTRIBUTION STATEMENT A
Approved for Public Release
Distribution Unlimited

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

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

Rapportage POEMA-2 (Functie Faalanalyse, Database, Elektronica en Afdichtingen)

De levensduur van munitie hangt nauw samen met ondermeer het klimaat waarin de munitie wordt gebruikt en opgeslagen. De levensduur wordt mede bepaald door diverse componenten al dan niet energetisch, zoals afdichtingen en elektronica. Om de beschikbare informatie voor het bepalen van de levensduur toegankelijk te maken is een database opgezet. De database kan gebruikt worden voor het opzetten van periodiek onderzoek en de selectie van munitie voor missies.

Zeer waarschijnlijk tot zeker	3	2	1	1
Waarschijnlijk	3	2	1	1
Nu en dan	4	3	2	1
Gering	4	3	3	2
Zeer onwaarschijnlijk	4	3	3	3
	Gering	Belangrijk	Kritiek	Catastrofaal

Probleemstelling

Veiligheid en levensduur van munitie hangen nauw met elkaar samen. Niet alleen operationele belastingen, zoals temperatuur en vocht, hebben effect op de performance en de veiligheid van munitie, maar ook een langere periode van opslag onder gematigde omstandigheden kan het functioneren van de munitie negatief beïnvloeden. In het kader van de doel financieringsprojecten Levensduur van Munitie en Explosieve stoffen (LVMS) en Periodiek Onderzoek van Energetische materialen en artikelen (POEMA) besteedt TNO Defensie en Veiligheid al geruime tijd aandacht aan deze problematiek met als doel meer inzicht te krijgen in de levensduur van munitie om advies te geven ten behoeve van verwervingstrajecten en (aanpassing) van het periodiek onderzoek onder meer ten gevolge van bij verwerving nog niet voorziene *out-of-area*-operaties. Het

resultaat zorgt voor minimalisatie van de *life cycle costs*.

Beschrijving van de werkzaamheden

Binnen het project POEMA-2 zijn diverse aspecten aan de orde geweest, namelijk:

- opzetten en vullen van een database ter ondersteuning van de functie-faal-analyse (FFA);
- het uitvoeren van een FFA-studie op papier, waarbij de uitkomsten zijn vergeleken met de PO-strategie en resultaten bij Defensie (voor zover mogelijk);
- analyse van ongelukken met munitie welke met de kritische aspecten als input voor de database gebruikt kunnen worden;
- elektronica is een onderschat aspect in de levensduurbepaling. Door middel van een literatuurstudie is een overzicht opgezet van de kritische factoren en aspecten waar in de toekomst rekening mee dient te worden gehouden, onder andere tin-whiskers;
- de functionaliteit van een munitie-artikel wordt mede bepaald door de functionaliteit en resistentie van de gebruikte afdichtingen. In het project is een eerste inventarisatie uitgevoerd

naar de mogelijke schadelijke effecten (stoffen en omgeving) op de afdichtingen. Tevens is gekeken naar de functionaliteit van de afdichting van een 40 mm-lichtgranaat tegen vocht.

De database is gevuld met informatie uit voorgaande onderzoeken aangevuld met de resultaten van een beperkte literatuurstudie. Tevens is de database geschikt gemaakt voor de inschatting van de grootte van verschillende belastingen door zowel omgevingfactoren als 'voor de hand liggende' productiefouten.

Resultaten en conclusies

De database is opgezet en ingevuld met relevante informatie uit internationale literatuur, congressen en databases. De uitgevoerde FFA-studies met verschillende artikelen geven aan dat er bij de aanschaf en periodiek onderzoek op extra punten gelet dient te worden waar op voorhand niet aan wordt gedacht, onder andere fabricagefouten. Tevens is het mogelijk een voorspelling te doen op basis van kleinere-schaaltesten (laboratorium-testen), in combinatie met een reductie in het aantal functionele beproevingstesten (kostenreductie).

Van de veroudering van elektronica is weinig bekend, echter hogere temperaturen (bij *out-of-area*-missies tot 80 °C) kunnen

Rapportage POEMA-2 (Functie Faalanalyse, Database, Elektronica en Afdichtingen)

desastreuze schade aan componenten toebrengen (breken van verbindingen). Daarnaast vormt de overstap naar loodvrij solderen het risico van tin-whiskers. Deze dunne draadjes kunnen leiden tot ongewenst kortsluiten van elementen. Afdichtingen in de vorm van polymeren komen in diverse vormen en soorten voor. Een nadeel is dat van de meeste polymeren niet achterhaald kon worden wat de samenstelling is, danwel wat de resistentie is tegen chemische belastingen (ontledingsproducten vanuit het artikel).

Toepasbaarheid

De informatie in de database kan gebruikt worden bij de keuze van welke munitie het meest geschikt is voor *out-of-area*-activiteiten. De aspecten van de FFA onderbouwen de noodzaak van PO. Echter zijn aanvullingen voor sommige artikelen wenselijk. Voor wat betreft de elektronica en afdichtingen, is basiskennis opgebouwd die in het programma V405 'Munitie en explosieve stoffen: Kwaliteit en Veiligheid' verder geconcretiseerd kan worden.

Contact en rapportinformatie

TNO Defensie en Veiligheid
Lange Kleiweg 137
Postbus 45
2280 AA Rijswijk

T 015 284 30 00
F 015 284 39 91

Info-DenV@tno.nl

TNO-rapportnummer
TNO-DV 2006 A477

Opdrachtnummer
A00KL400

Datum
december 2006

Auteur(s)
ing. W.P.C. de Klerk
drs. W. Colpa
ir. M.N. Boers
ing. G. Herder
ing. A.C. Hordijk
ing. J.J.T.G. Weijl

Rubricering rapport
Ongerubriceerd

PROGRAMMA	PROJECT
Programmabegeleider ing. H. Hoeneveld, LBBKL	Projectbegeleider dr. ir. C.D. Sagel-Ransijn, Ministerie van Defensie, LBB-ABWM
Programmaleider ir. H.L.J. Keizers, TNO Defensie en Veiligheid, Bescherming Wapens en Munitie	Projectleider ing. W.P.C. de Klerk, TNO Defensie en Veiligheid, Bescherming Wapens en Munitie
Programmatitel Munitie: levensduur	Projecttitel POEMA II
Programmanummer V012	Projectnummer 014.15046
Programmaplanning Start 01 juli 2003 Gereed 30 juni 2006	Projectplanning Start 01 juli 2003 Gereed 30 juni 2006
Toezichthouder -	
Frequentie van overleg Met de programma/- projectbegeleider werd halfjaarlijks gesproken over de invulling en de voortgang van het onderzoek.	Projectteam ing. W.P.C. de Klerk, drs. W. Colpa ir. M.N. Boers, ing. G. Herder, ing. A.C. Hordijk en ing. J.J.T.G. Weijl

Inhoudsopgave

	Managementuittreksel	3
	Afkortingen	7
1	Inleiding.....	9
2	Functie Faal Analyse.....	11
2.1	Inleiding	11
2.2	Faalkans	11
2.3	Functie- en faalanalyse in LVMS en POEMA	14
2.4	Eigenschappen van munitiecomponenten.....	26
2.5	Effect van de omstandigheden	29
2.6	Database	30
2.7	Opzet van de database.....	31
2.8	Referenties	35
3	FFA aan 20 mm patroon	37
3.1	Inleiding	37
3.2	Beschrijving artikel.....	37
3.3	Resultaat beschikbare informatie	38
4	FFA aan 40 mm patroon	39
4.1	Inleiding	39
4.2	Werking.....	39
4.3	FFA van het lichtpatroon type 338.....	40
4.4	Voorgesteld vervolg: componenttesten	45
4.5	Advies.....	46
4.6	Conclusies	46
4.7	Vergelijk PO zoals uitgevoerd door ABWM en papieren studie TNO.....	47
5	Functie en Faalanalyse, KM-artikel: seinrook nr. 21	49
5.1	Inleiding	49
5.2	Technische gegevens	50
5.3	Operationele gegevens	50
5.4	Opbouw van het artikel.....	50
5.5	Werking.....	51
5.6	Advies.....	53
6	Functie en Faalanalyse, KL-artikel: rookhandgranaat fosfor nr. 23 met ontsteker nr 19C3/20	55
6.1	Inleiding	55
6.2	Technische gegevens	56
6.3	Opbouw en werking van het artikel.....	56
6.4	De oorzaken van falen zijn.....	57
6.5	Advies.....	59
6.6	Vergelijk PO zoals uitgevoerd door ABWM en papieren studie TNO.....	60

7	FFA aan rocket catapult (KLu-artikel)	63
7.1	Inleiding	63
7.2	Belangrijke doelstellingen Rocket Catapult	64
7.3	Uitgevoerde en lopende werkzaamheden (zie tabel 24).....	64
7.4	Vervolg werkzaamheden (zie tabel 24)	64
8	Analyse van ongelukken	67
8.1	Inleiding	67
8.2	Indeling van het NOSSA rapport - ordening van de ongelukken	68
9	Veroudering van elektronica.....	75
9.1	Inleiding	75
9.2	Elektronische componenten in munitieartikelen.....	77
9.3	Veroudering.....	80
9.4	Overigen (meerdere oorzaken of belastingen).....	88
9.5	Initiële studie naar verouderde elektronica.....	100
9.6	Conclusies	104
9.7	Conclusie en aanbevelingen.....	105
9.8	Referenties.....	108
10	Afdichtingen in munitie	109
10.1	Inleiding	109
10.2	Lichtpatroon nr. 338 van 40 mm voor granaatwerper.....	110
10.3	Beschrijving DMA-techniek	111
10.4	DMA aan rubberen O-ring, (on)verouderd.....	115
10.5	Waterdampdoorlaatbaarheid	117
10.6	Houder nr. 25 voor seingranaat nr. 65 - karakterisering O-ring (KM-artikel)	119
10.7	Retourmunitie	122
10.8	Overzicht gebruikstemperaturen en chemische belasting	123
10.9	Conclusie	125
11	Ondertekening	127

Afkortingen

AOP	Allied Operational Procedures
ADC	Analoog/Digitaal Convertor
AECTP	Allied Environmental Conditions and Test Publications
AMR	Absolute Maximum Ratings
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
DAC	Digitaal/Analoog Convertor
DAHCE	Drain Avalanche Hot Carrier Effect
DET	Detector
DMA	Dynamisch Mechanische Analyse
DSC	Differential Scanning Calorimeter
DSP	Digital Signal Processor
EED	Electro Explosive Device
ESD	ElectroStatic Discharge; electrostatische ontlading
EOS	Electrical OverStress
FFA	Functie- en faalanalyse
HCID	Hot Carrier Induced Degradation
IC	Integrated Circuit ('chip')
JTAG	Joint Test Action Group
KL	Koninklijke Landmacht
KLu	Koninklijke Luchtmacht
KM	Koninklijke Marine
LDO	Low Dropout Voltage Regulator
LF	Laag Frequent
LVDS	Low Voltage Differential Signaling
LVMS	Levensduur Voorspelling Munitie en explosieve Stoffen
MIL-HDBK	Military HandBook
MIL-STD	military standard
MOS	Metal Oxide Semiconductor n-type of p-type
MSIAC	new name for NIMIC = Munitions Safety Information Analysis Center
MTV	Magnesium Teflon Viton
NATO	North Atlantic Treaty Organisation
NIMIC	NATO Insensitive Munitions Information Centre
NINA	Nieuwe Nabijheidsbuis
NSWC	Naval Surface Warfare Centre
PCB	Printed Circuit Board ('printplaat')
POEMA	Periodiek Onderzoek Energetische Materialen en Artikelen
PPM	Parts Per Million
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Random Access Memory
D-RAM	Dynamic-RAM
RF	Radio Frequency
RH	Relative Humidity/Relatieve Luchtvochtigheid
RP	Red Phosphor
SoC	System on Chip
STANAG	STANDARD NATO AGREEMENT
TC	TemperatuursCoëfficiënt
TMA	Thermisch Mechanische Analyse
Trig	Trigger

TOW	Time Of Wetness
VDSM	Very Deep SubMicron

Symbolen

σ	(druk-/trek-) spanning
ε	Rek = dx/x_0
$\tan \delta$	Verliesfactor
β	Opwarm- of afkoelsnelheid
E	Elasticiteitsmodulus
E'	Opslagmodulus
E''	Verliesmodulus
E*	Young's modulus
G	Schuifmodulus

1 Inleiding

Veiligheid en levensduur van munitie hangen nauw met elkaar samen. Niet alleen operationele belastingen, zoals temperatuur en vocht, hebben veelal effect op de performance en de veiligheid van munitie, maar ook gematigde condities bij langdurige opslag.

TNO Defensie en Veiligheid besteedt al geruime tijd aandacht aan deze problematiek. Tijdens LVMS (Levensduur Voorspelling Munitie en explosieve Stoffen) en POEMA (Periodiek Onderzoek Energetische Materialen en Artikelen) is voor diverse artikelen een functie- en faalanalyse uitgevoerd. De functie- en faalanalyse bestaat net als elke risicoanalyse, globaal uit twee delen. De ernst en de kans. De ernst van het niet (adequaat) functioneren van een artikel is sterk afhankelijk van de gevolgen en zodoende van de toepassing. Een voorstel voor de indeling in categorieën is beschreven in het project POEMA. Een onderdeel van het vervolgproject 'POEMA II' is het nader definiëren van de kans en de toename van de kans op falen.

Als gevolg van recente veranderingen aangaande inzetgebieden, qua prestatie en veiligheid en langer operationeel gebruik alsmede de introductie van nieuwe energetische materialen is een adequate kennisopbouw noodzakelijk. Dit geeft aan dat er een zekere urgentie is ontstaan om de kennis op het gebied van levensduur van energetische materialen en munitie op het juiste niveau te brengen. Deze urgentie wordt veroorzaakt door de andere inzetgebieden (andere externe belastingen) en strengere eisen qua veiligheid en betrouwbaarheid. Levensduurkennis dient te worden opgebouwd om ook voor deze zwaardere belastingen en eisen de Krijgsmacht adequaat te kunnen adviseren en ondersteunen.

De levensduur van munitie en het wapensysteem heeft niet alleen gevolgen voor de inzetbaarheid (betrouwbaarheid en veiligheid), maar heeft ook gevolgen voor de materieelplanning (economische aspecten). Inzicht in het tijdstip waarop munitie of gehele wapensystemen vervangen moeten worden maakt planning mogelijk. Essentieel hierbij zijn de kosten voor eventuele levensduurverlenging en de kosten voor de instandhouding van een nieuw aan te schaffen wapensysteem.

Uit de literatuur is bekend dat de levensduur beperkt kan worden door uitwisseling van componenten uit diverse onderdelen en niet alleen gelimiteerd blijft tot de energetische materialen. Onder andere ook de elektronische componenten vertonen bij verhoogde temperatuur een verouderingskarakteristiek. In hoeverre deze kritisch wordt (op basis van de FFA), verdient een nader onderzoek.

Andere factoren die van belang zijn in het kader van levensduur zijn de veilige opslaglevensduur en de ballistische levensduur die door verschillende parameters worden beïnvloed.

Vanwege het brede aandachtsgebied en advisering naar de verschillende KMD'n toe, is er een aantal doelstellingen voor POEMA-2 gedefinieerd.

- verder ontwikkelen van de FFA, in combinatie met het opzetten van een database, waarbij aspecten voor de complete levensduur worden meegenomen;
- toetsen van FFA, middels het opzetten van twee PO-lijnen, één voorgesteld door TNO en één voorgesteld door Defensie;
- kennis vermeerdering/verbreding op het gebied van afdichtingen;
- kennis vermeerdering/verbreding op het gebied van elektronica in relatie tot de FFA. De temperatuur van elektronica bij missile systemen in een stand-by toestand kan oplopen tot 70 °C;
- kennis vermeerdering van additionele componenten die bij de FFA als kritisch naar voren komen, en waarvan nog geen kennis voor handen is;
- levensduurverlenging: moeten bepaalde artikelen afgestoten worden na bijvoorbeeld 10 jaar, omdat de gegarandeerde levensduur (van de fabrikant) verlopen is?

2 Functie Faal Analyse

2.1 Inleiding

Omdat de functie- en faalanalyses door de benodigde expertises door verschillende personen over verschillende afdelingen worden uitgevoerd is er behoefte ontstaan om informatie centraal beschikbaar te hebben om zo tot een efficiëntere en eenduidiger invulling van de analyse te komen. Om hieraan invulling te geven is besloten deze gegevens in een database op te nemen. Dit rapport beschrijft de opzet van deze database.

Het nader definiëren van de kans en de toename van de kans op falen wordt in dit hoofdstuk beschreven. Tevens is er een samenvatting van de kansen die gebruikt zijn voor de functie- en faalanalyses van artikelen onder LVMS en POEMA gegeven. Deze informatie, aangevuld met gegevens uit een beperkte literatuurstudie, is generiek verwoord en zal in de database worden ingevoerd. De omstandigheden en belastingen die leiden tot de toename van de kans op falen en een globaal overzicht van mogelijke testmethoden komen in paragraaf 2.5 en 2.6 aan de orde. De opzet en het gebruik van de database zal worden beschreven in paragraaf 2.7.

2.2 Faalkans

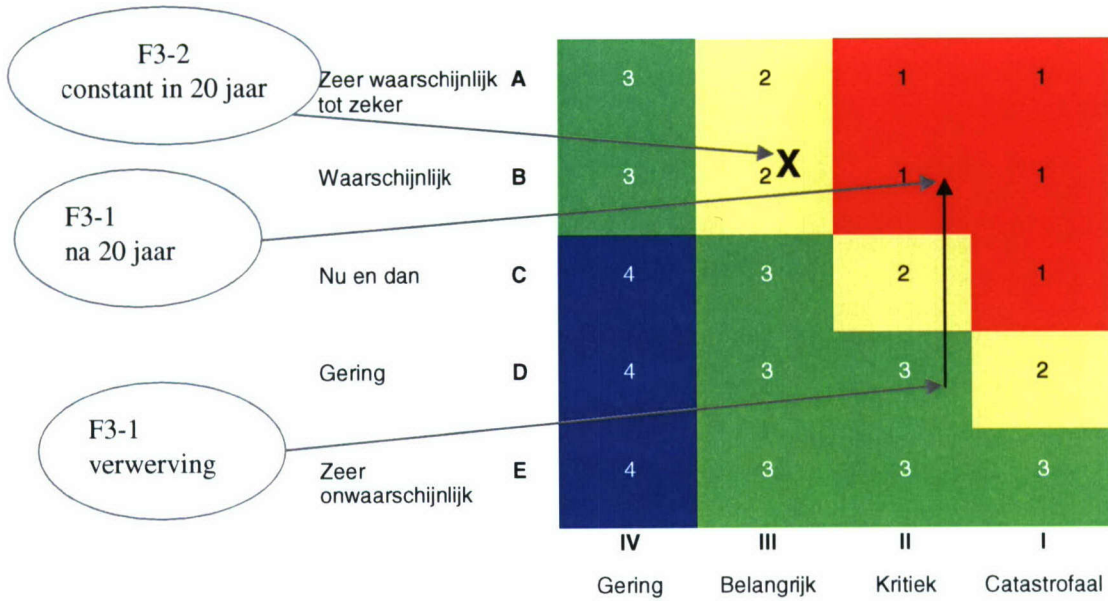
2.2.1 *Risicomatrix*

Risico bestaat uit kans en ernst. Om de kans en ernst samen te voegen tot een risico moet een link gemaakt worden tussen de kans op falen en de ernst van de gevolgen. In het rapport 'Evaluatie van de functie- en faalanalyse' [1] is een voorstel gedaan voor deze koppeling op basis van de risicomatrix (figuur 1).

Voor een artikel of een functie van onderdelen van een artikel kan op basis van de kans op en de ernst van falen op elk moment een positie in de risicomatrix gevonden worden. Voor het risicomangement wordt onderscheid gemaakt in vier categorieën. De kleur van het vak en het nummer erin geven een advies hoe met het risico om te springen:

- 1 een conditie die correctieve of preventieve actie vereist;
- 2 een conditie die een programma management review behoeft en een gedocumenteerde toestemming om ongecorrigeerd te blijven omdat operationele behoefte of programma beperkingen de gevaren onafwendbaar maken;
- 3 een toestand die acceptabel is bevonden door het veiligheidspersoneel en akkoord bevonden door het programma management;
- 4 een toestand die geen directe actie vereist. Hoe dan ook worden correctieve acties om het risico te elimineren aangemoedigd.

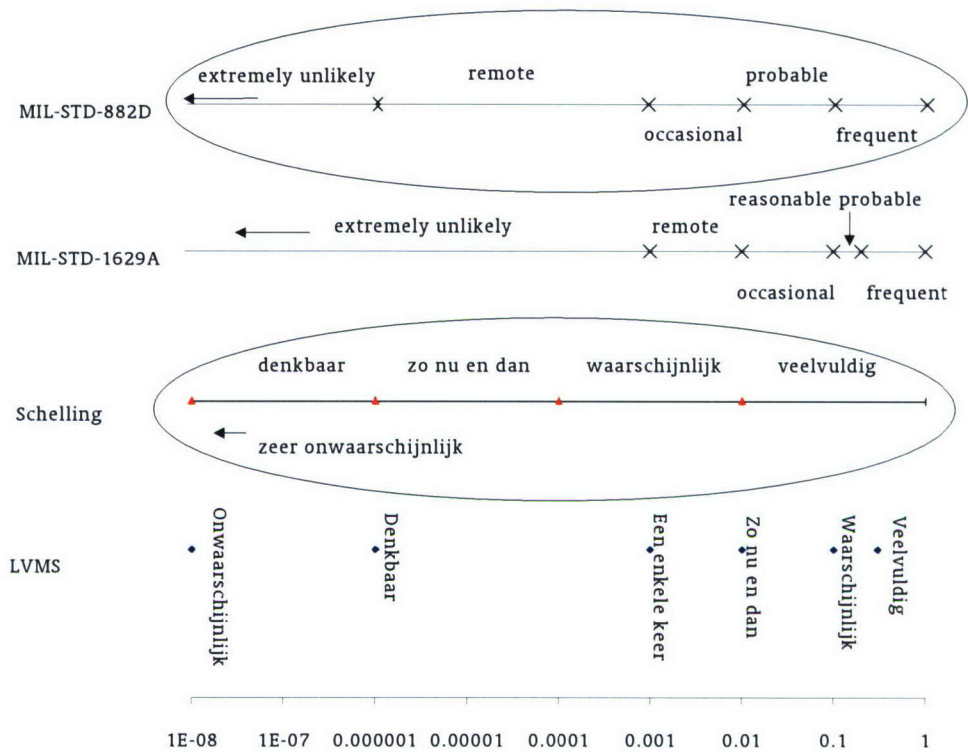
Om de risico's van het falen van delen van een artikel inzichtelijk te maken kan de toename van het risico worden weergegeven met een pijl. Het beginpunt van de pijl is de kans bij verwerving (of beginmoment voor uitvoering van de analyse), de punt van de pijl is de kans na een bepaalde periode. Als de kans niet toeneemt met de tijd maar wel voor de presentatie van belang is kan een kruisje in het betreffende vakje worden geplaatst.



Figuur 1 Grafische weergave van de risicoklassen zoals gebruikt zal worden voor de FFAPoEMA [1].

2.2.2 *Waarschijnlijkheidsniveaus*

Omzetten van een numerieke waarde voor kans naar een omschrijving als frequent en zelden is subjectief, wat leidt tot een verschil tussen de keuze die verschillende personen zullen maken. In figuur 2 staat een overzicht van de getallen die aan de omschrijving van kans worden verbonden.



Figuur 2 Overzicht van de waarden verbonden aan kans. Bij LVMS horen de omschrijvingen bij de punten, bij de andere drie horen de omschrijvingen bij het gebied tussen twee punten [1].

Voor de risicomatrix worden voor kans discrete ranges gebruikt, de waarschijnlijkheidsniveaus. Voor de waarschijnlijkheidsniveaus, zoals ze voor de functie- en faalanalyse volgens de POEMA-methode worden gebruikt (tabel 1) zijn geen discrete onder- en bovengrens gedefinieerd in tegenstelling tot de waarschijnlijkheidsniveaus gebruikt volgens de LVMS-methode. Het vaststellen van de range horend bij de niveaus kan in overleg met de opdrachtgever worden gedaan.

Tabel 1 Naamgeving voor de verschillende waarschijnlijkheidsniveaus.

Code	POEMA
A	Zeer waarschijnlijk tot zeker
B	Waarschijnlijk
C	Nu en dan
D	Gering
E	Zeer onwaarschijnlijk

Tabel 2 Factoren horend bij omstandigheden (environment). Vertienvoudigingstijd: tijd die nodig is om de kans op falen te vertienvoudigen. LVMS-methode.

Classificering (NL)	Factor [-]	Na 20 jaar O ¹	Vertienvoudigingstijd (jaar)
E norm	5,0	9,5·10 ¹³	1,43
G root	2,0	1,1·10 ⁶	3,32
R edelijk	1,6	1,2·10 ⁴	4,90
B eperkt	1,4	837	6,84
Z eer beperkt	1,3	190	8,78
V erwaarloosbaar	1,2	38	12,6

2.2.3 *Bepaling van de faalkans*

Voor de bepaling van het moment van afstoting of de start van het periodiek onderzoek is het nodig om de kans op falen te relateren aan de specificaties. Informatie over afwijkingen kan volgen uit het periodiek onderzoek of naar voren komen bij het gebruik. Op basis van expertise en ervaring (database) kan een schatting gemaakt worden voor de frequentie van het PO.

Het bepalen van de kans kan op verschillende manieren.

- Functioneringstest
- Berekening of schatting op basis van ervaring uit het verleden
- Een schatting van de veroudering door extrapolatie van versnelde veroudering kan met verschillende modellen [2]:
 - Inverse Power Law Acceleration Model
kan bijvoorbeeld gebruikt worden voor de schatting van de slijtage van banden als functie van de rijnsnelheid.
 - Arrhenius-model
veel gebruikt voor temperatuurgerelateerde faalmodes.
 - Miner's rule
een eenvoudig model voor berekening van vermoeiing.

Als de eisen en het gedrag en veroudering met hun verdeling (nauwkeurig) bekend zijn kan de faalkans eenvoudig worden uitgerekend [2, 18].

2.3 **Functie- en faalanalyse in LVMS en POEMA**

2.3.1 *Inleiding*

De functie- en faalanalyse (FFA) is ontwikkeld in het project LVMS (1996 – 1999). Tijdens het project POEMA (2000 – 2003, voorloper van POEMA II) is de analyse viermaal volgens deze methode uitgevoerd en aansluitend is de methode geëvalueerd [1]. Uit deze evaluatie zijn een aantal verbeterpunten naar voren gekomen die al tijdens het project POEMA zijn gebruikt bij de uitvoering van een volgende functie- en faalanalyse. Tabel 3 geeft een overzicht van de analyses die volgens de LVMS en POEMA-methode zijn uitgevoerd met de verkregen informatie van Defensie. De gebruikte belastingen zijn in samenspraak met Defensie bepaald, en omvatten niet altijd de volledige levenscyclus. De kritische omstandigheden welke als reëel werden ingeschat zijn in de analyse meegenomen. De gerelateerde projecten zijn als referentie weergegeven.

Tabel 3 Functie- en faalanalyses uitgevoerd tijdens LVMS en POEMA.

Artikel	Methode	Referentie
81 mm springrook	LVMS	[3]
CTG 35 mm HE LKD	LVMS	[4]
AIM-9L sidewinder	LVMS	[5]
CTG 76/62 HE-PFF W/Fuze NH7	LVMS	[6]
26,5 mm seinrook	POEMA	[7]

In de volgende paragrafen zal een kort overzicht gegeven worden van de inschattingen die gemaakt zijn voor de bepaling van de kans op falen bij het uitvoeren van de functie- en faalanalyse in de projecten LVMS en POEMA.

2.3.2 81 mm springrook

Op de 81 mm springrook is een functie en faalanalyse uitgevoerd [3]. In deze analyse zijn meegenomen.

- hoge temperatuur;
- lage temperatuur;
- hoge luchtvochtigheid;
- regen zoute mist;
- trillingen.

Deze omstandigheden zijn in relatie tot Mil-Std-810F en in lijn met de klimaatcondities van STANAG 2895 gekwantificeerd. Overige omstandigheden werden niet waarschijnlijk geacht.

Voor de uitvoering van de functie- en faalanalyse zijn de volgende overwegingen gebruikt:

- zwart buskruit is ongevoelig voor veroudering, tenzij er sprake is van een hoge (lucht)vochtigheid. Aangenomen wordt dat zwart buskruit niet slechter zal gaan functioneren door veroudering;
- witte fosfor heeft een relatief laag smeltpunt. Boven de 44 °C gaat de vaste fosfor over naar de vloeibare fase, deze overgang veroorzaakt verschuivingen van lading binnen in de granaat. De stabiliteit van de beweging van de granaat in de lucht wordt erdoor beïnvloed en hierdoor de baan van de granaat. Dit kan worden voorkomen door de granaat rechtop te bewaren. Het smelten is geen verouderingseffect, en is daarom bij deze analyse niet meegenomen;
- voor de aanvullingskardoezen bestaat de mogelijkheid dat ze bros worden door exudatie van de weekmaker (migratie naar het kruit);
- ook kan het kruit door migratie van de nitroglycerine/weekmaker naar de container minder energetisch en/of bros worden;
- de flegmatisator kan van de buitenkant van het kruit naar binnen migreren wat effect heeft op het brandgedrag;
- hoge temperatuur en luchtvochtigheid spelen bij de veroudering van chemische componenten wel een rol;
- door de veroudering kan de ontsteekbaarheid c.q. brandgedrag van de chemische composities beïnvloed worden. Een onderscheid is gemaakt tussen ontsteking en verbranding van de componenten. Bij ontsteking is gesteld dat deze niet 'te hoog' (te hoge brandsnelheid) kan zijn, dit in tegenstelling tot de verbranding;
- zoute mist speelt alleen een rol aan de buitenkant van de granaat die onder invloed hiervan kan corroderen;

- het lichaam van de granaat is zoveel mogelijk buiten beschouwing gelaten;
- uit de incidentenlijst komt naar voren dat vuil of resten van de vorige granaat in de loop kunnen leiden tot een weigeraar.
- de stelschroef voor het instellen van een vertraging kan onder invloed van regen/zoute mist corroderen. Dit kan tot problemen leiden als de schroef niet geheel gedraaid kan worden, waardoor de vlam uit het slaghoedje niet doorgegeven kan worden naar de inleilading;
- ontleding van de nitrocellulose.

Tabel 4 Kans op t=0 en toename van de kans als gevolg van veroudering voor subfuncties van F2 'bereiken doel'.
Kans: Veelvuldig, Waarschijnlijk, Zo nu en dan, Een enkele keer, Denkbaar, Onwaarschijnlijk.
Omstandigheden: Enorm, Groot, Redelijk, Beperkt, Zeer beperkt, Verwaarloosbaar.

Subfunctie	Beschrijving	Componenten	Te laag			Te hoog			Niet		
			kans (t0)	hoge T	hoge RV	kans (t0)	hoge T	hoge RV	kans (t0)	hoge T	hoge RV
F2-1	Afleggen van de baan	Granaatlichaam, vinnen	O	V	V	O	V	V	O	V	V
F2-2	Gasafdichting door de centreerband	Centreerband	O	V	Z	O	V	V	O	V	Z
F2-3	Verbranden van het kruit in de aanvullingskardoes	Rookzwak buskruit	D	G	R	D	G	V	D	G	R
F2-4	Ontsteken van het kruit in de aanvullingskardoes	Rookzwak buskruit, vlamkanaal	D	R	B	O	V	V	D	R	B
F2-5	Verbranden van het kruit in de grondkardoes	Rookzwak buskruit	D	G	R	D	G	V	D	G	R
F2-6	Ontsteken van het kruit in de grondkardoes	Brandgaten, rookzwak buskruit	D	R	B	O	V	V	D	R	B
F2-7	Verbranden van aanvuurlading	Rook zwak buskruit	D	Z	R	D	Z	V	D	Z	R
F2-8	Ontsteken van aanvuurlading	Rook zwak buskruit	D	V	R	O	V	V	D	V	R
F2-9	Functioneren van het slaghoedje	Slagsas	D	Z	Z	O	V	V	D	Z	Z

Tabel 5 Kans op t=0 en toename van de kans als gevolg van veroudering voor subfuncties van F1, 'leggen rookscherm'.
Kans: **Veelvuldig, Waarschijnlijk, Zo nu en dan, Een enkele keer, Denkbaar, Onwaarschijnlijk.**
Omstandigheden: **Enorm, Groot, Redelijk, Beperkt, Zeer beperkt, Verwaarloosbaar.**

Sub-functie	Beschrijving	Componenten	Te laag			Te hoog			Niet		
			kans (t0)	hoge T	hoge RV	kans (t0)	hoge T	hoge RV	kans (t0)	hoge T	hoge RV
F1-1	Witte fosfor verbrandt	Witte fosfor	O	V	V	O	V	V	O	V	V
F1-2	Witte fosfor verspreidt zich	Witte fosfor	D	V	V	O	V	V	O	V	V
F1-3	Granaat gaat 'springen'	Granaatlichaam	O	V	V	O	V	V	O	V	V
F1-4	Inleiding + detonatie van de verspreidings-springlading	Hexogeen	O	V	V	O	V	V	O	V	V
F1-5	Inleiding + detonatie van de schokversterker	Kruit	O	V	V	O	V	V	O	V	V
F1-6	Inleiding + detonatie inleilading	Tetryl	O	V	V	O	V	V	D/O	V	V
F1-7	Inleiding + detonatie inleilading in afsluiter	Inleilading in afsluiter	O	V	V	O	V	V	O	V	V
F1-8	Ontsteking + verbr. Vertraagsas	Zb	-	Z	R	-	Z	V	-	Z	R
F1-9	Instelling eventuele vertraging	Instelschroef	-	V	V	-	V	V	-	V	R
F1-10	Functioneren slaghoedje(vlam)	Slagsas	-	Z	Z	-	V	V	-	Z	Z

Voor de schroef is veroudering hoge RH op redelijk gesteld voor niet en te laag functioneren, net als zwart buskruit en gewoon kruit.

Een overzicht van de meest kritisch punten is opgenomen in tabel 16.

Tabel 6 Rangschikken van kritische condities voor de meest kritische sub-functies.

Sub-functie	Beschrijving	Componenten	'Kritische' condities
F2-3	Verbranden van het kruit in de aanvullingskardoes	Rookzwak buskruit (wijziging van samenstelling door migratie), container	Hoge temperatuur hoge luchtvochtigheid
F2-5	Verbranden van het kruit in de grondkardoes	Rookzwak buskruit	Hoge temperatuur hoge luchtvochtigheid
F1-9	Instelling eventuele vertraging	Instelschroef	Hoge luchtvochtigheid regen, zoute mist
F1-8	Ontsteking & verbranding vertraagsas	ZB in afsluiter	Hoge temperatuur hoge luchtvochtigheid
F1-10	Functioneren slaghoedje	Slagsas	Hoge temperatuur* lage temperatuur* hoge luchtvochtigheid* regen, zoute mist* trillingen*

* Elk van deze condities draagt bij aan de toename van het risico in de tijd, echter in beperkte mate.

2.3.3 CTG 35 mm HE LKD

Voor de CTG 35 mm HE LKD is in 2000 een functie en faalanalyse uitgevoerd [4].

In deze analyse zijn:

- hoge temperatuur;
- hoge luchtvochtigheid;
- trillingen meegenomen. De overige omstandigheden worden niet waarschijnlijk geacht.

Voor de uitvoering van de analyse zijn de volgende overwegingen gebruikt:

- niet functioneren van mechanische delen voor het wapenen van de granaat wordt als denkbaar geschat;
- voor het verbreken van de wurgverbinding, de vorming van de nokken en het afleggen van de baan (F3-1 tot en met F3-3) is aangenomen dat het effect van hoge temperatuur, hoge relatieve vochtigheid en trillingen verwaarloosbaar is;
- voor de chemische componenten, subfunctie F3-4 tot en met F3-8, is in overleg met Chris van Driel [8] gekozen voor een beperkt effect van de relatieve vochtigheid en een groot effect van hoge temperatuur op de veroudering. De invloed van trilling wordt ingeschat als verwaarloosbaar;
- voor de chemische componenten (F1-2 tot en met F1-4) geldt dat de kans bestaat dat zij onder invloed van hoge temperatuur of luchtvochtigheid door veroudering te langzaam of slechts deels zouden kunnen detoneren. Aangenomen wordt dat de componenten in ieder geval functioneren;
- alle subfuncties van de hoofdfunctie 2 zijn mechanisch van aard. Effecten die bij veroudering te verwachten zijn, zijn veroudering van de (smeer)olie en eventueel roestvorming¹ als gevolg van hoge temperatuur of luchtvochtigheid en vervorming of uitslijten van onderdelen als gevolg van trilling;
- degradatie van de sassen in het slagpijpje is redelijk onder invloed van vocht, niet of slechte werking van de mechanische delen van de buis door corrosie wordt ingeschat als denkbaar maar niet erg waarschijnlijk. Dit is vertaald in beperkt [10].

¹ Volgens Van Harmelen is uitharden van de olie een belangrijkere reden dan roestvorming [9].

Tabel 7 Kans op t=0 en toename van de kans als gevolg van veroudering voor subfuncties van F3, 'bereiken doel'.
 Kans: Veelvuldig, Waarschijnlijk, Zo nu en dan, Een enkele keer, Denkbaar, Onwaarschijnlijk.
 Omstandigheden: Enorm, Groot, Redelijk, Beperkt, Zeer beperkt, Verwaarloosbaar.

Sub-functie	Beschrijving	Componenten	Te laag			Te hoog			Niet					
			kans (t0)	hoge T	hoge RV	trilling	kans (t0)	hoge T	hoge RV	trilling	kans (t0)	hoge T	hoge RV	trilling
F3-1	Afleggen baan	Vorm granaat	D	V	V	V	O	V	V	V	O	V	V	V
F3-2	Vorming van nokken	Esinterde stalen band	D	V	V	V	O	V	V	V	O	V	V	V
F3-3	Verbreken wurgverbinding	Wurgverbinding	D	V	V	V	D	V	V	V	O	V	V	V
F3-4	Branden voortdrijvende lading	Voortdrijvende lading	D	G	B	V	D	G	B	V	D	G	B	V
F3-5	Ontsteking van de voortdrijvende lading	Afdekschijfje	D	G	B	V	O	G	B	V	D	G	B	V
F3-6	Branden aanvuurlading	Aanvuurlading	D	G	B	V	D	G	B	V	D	G	B	V
F3-7	Ontsteking aanvuurlading	Aanvuurlading	D	G	B	V	O	G	B	V	D	G	B	V
F3-8	Functioneren slagsas in ontsteekdop	Ontsteekmechanisme	D	G	B	V	D	G	B	V	D	G	B	V
F3-9	Laden	Schakelband, vorm artikel	D	Z	Z	Z	O	V	V	V	D	V	Z	V

Tabel 8 Kans op t=0 en toename van de kans als gevolg van veroudering voor subfuncties van F2, 'wapenen van de granaat'.

Kans: Veelvuldig, **Waarschijnlijk**, **Zo nu en dan**, **Een enkele keer**, **Denkbaar**, **Onwaarschijnlijk**.
Omstandigheden: **Enorm**, **Groot**, **Redelijk**, **Beperkt**, **Zeer beperkt**, **Verwaarloosbaar**.

Sub-functie	Beschrijving	Componenten	Te laag				Te hoog				Niet			
			kans (t0)	hoge T	hoge RV	trilling	kans (t0)	hoge T	hoge RV	trilling	kans (t0)	hoge T	hoge RV	trilling
F2-1	Naar buiten zwaaien afstandssegmenten	Afstandssegmenten	D	R	R	V	D	V	V	B	D	R	R	B
F2-2	Afwikkelen wapeningsspiraalveer	Veiligheidsveer (rotatie granaat)	D	R	R	V	D	V	V	B	D	R	R	B
F2-3	Borgen slagpenhuis	Borgkogels, slagpenhuis (rotatie granaat)	D	R	R	V	D	V	V	B	D	R	R	B
F2-4	Sluiter in gewapende stand	Sluiter	D	R	R	V	D	V	V	B	D	R	R	B
F2-5	Vrijgeven sluiter	Sluiterborgpen en sluiterborgveer (rotatie granaat)	D	R	R	V	D	V	V	B	D	R	R	B

Tabel 9 Kans op t=0 en toename van de kans als gevolg van veroudering voor subfuncties van F1, 'uitwerking op doel'.

Kans: Veelvuldig, **Waarschijnlijk**, **Zo nu en dan**, **Een enkele keer**, **Denkbaar**, **Onwaarschijnlijk**.
Omstandigheden: **Enorm**, **Groot**, **Redelijk**, **Beperkt**, **Zeer beperkt**, **Verwaarloosbaar**.

Sub-functie	Beschrijving	Componenten	Te laag				Te hoog				Niet			
			kans (t0)	hoge T	hoge RV	trilling	kans (t0)	hoge T	hoge RV	trilling	kans (t0)	hoge T	hoge RV	trilling
F1-1	Verscherven granaatlichaam	Granaatlichaam	O	V	V	V	O	V	V	V	O	V	V	V
F1-2	Detonatie springlading	Springlading	D	Z	Z	Z	O	V	V	V	D	V	V	V
F1-3	Detonatie overdrachtslading	Overdrachtslading	D	Z	Z	Z	O	V	V	V	D	V	V	V
F1-4	Functioneren slagpijpje	Slagpijpje	D	Z	Z	Z	O	V	V	V	D	V	V	V
F1-5	Inslaan van slagpen	Slagpen	D	R	R	V	O	V	V	B	D	R	R	B
F1-6	Functioneren drukstuk	Drukstuk	D	R	R	V	O	V	V	B	D	R	R	B
F1-7	Zelfdestructie (parallel functioneren drukstuk)	Slagpinveer, kogels	D	R	R	V	D	V	V	B	D	R	R	B

Als kritische componenten komen de volgende functies naar voren:

- de verbranding van de voortdrijvende lading;
- verbreken van de wurgverbinding;
- de vorming van de nokken;
- het zelfvernietigingsmechanisme.

2.3.4 CTG 76/62 HE-PFF W/fuze NH-7

Op de CTG 76/62 HE-PFF W/fuze NH-7 is een functie- en faalanalyse uitgevoerd [6]. In deze analyse zijn meegenomen.

- hoge temperatuur;
- hoge luchtvochtigheid;
- trilling.

De overige omstandigheden werden niet waarschijnlijk geacht.

Voor de uitvoering van de analyse zijn de volgende overwegingen gemaakt:

- Voor de chemische componenten, subfunctie F3-4 tot en met F3-8, is gekozen voor een beperkt effect van de relatieve vochtigheid en een groot effect van hoge temperatuur op de veroudering [8].
- Uit het eindverslag van de ontwikkeling van de NH-9-buis [11] blijkt dat de chemische batterij vervangen is door een lithiumbatterij om de levensduur te verlengen en dat de behuizing van de ASIC (application specific integrated circuit) van plastic werd. De plastic behuizing die in het kader van het productieproces en de schotbestendigheid te prefereren is, levert waarschijnlijk problemen op onder invloed van temperatuureffecten. In de temperatuurcyclus volgens MIL-STD-331 zijn enkele behuizingen gescheurd [12].
- Niet functioneren van mechanische en elektronische componenten wordt als t0 waarden denkbaar genomen.
- Omdat de buis hermetisch gesloten is wordt aangenomen dat vocht niet binnendringt en de invloed dus verwaarloosbaar is.
- Bij de veroudering van chroomzuur batterijen kunnen problemen optreden. Als de stabilisator is verbruikt stroomt het zuur minder makkelijk tussen de platen en zal er niet voldoende spanning worden opgebouwd [13]. Dit is zeer waarschijnlijk een effect van temperatuur.
- Voor de chemische componenten (F1-2 tot en met F1-7) geldt dat de kans bestaat dat zij onder invloed van hoge temperatuur of luchtvochtigheid door veroudering niet optimaal detoneren. Aangenomen wordt dat de componenten in ieder geval functioneren [14].

Tabel 10 Kans op $t=0$ en toename van de kans als gevolg van veroudering voor subfuncties van F3, 'bereiken doel'.
 Kans: Veelvuldig, Waarschijnlijk, Zo nu en dan, Een enkele keer, Denkbaar, Onwaarschijnlijk.
 Omstandigheden: Enorm, Groot, Redelijk, Beperkt, Zeer beperkt, Verwaarloosbaar.

Sub-functie	Beschrijving	Componenten	Te laag			Te hoog			Niet					
			kans (t0)	hoge T	hoge RV	trilling	kans (t0)	hoge T	hoge RV	trilling	kans (t0)	hoge T	hoge RV	trilling
F3-1	Afleggen baan	Centreer gedeelte	D	V	V	V	O	V	V	V	O	V	V	V
F3-2	Vorming van nokken	Draaiingsband	D	V	V	V	O	V	V	V	O	V	V	V
F3-3	Persen van de hals tegen de kamerwand	Huls	D	V	V	V	D	V	V	V	O	V	V	V
F3-4	Branden voortdrijvende lading	Voortdrijvende lading	D	G	B	V	D	G	B	V	D	G	B	V
F3-5	Ontsteking van de voortdrijvende lading	Voortdrijvende lading	D	G	B	V	O	G	B	V	D	G	B	V
F3-6	Branden vlamversterker	Aanvuurlading	D	G	B	V	D	G	B	V	D	G	V	V
F3-7	Ontsteking vlamversterker	Aanvuurlading	D	G	B	V	O	G	B	V	D	G	V	V
F3-8	Functioneren slagsas in ontsteekdop	Ontsteekmechanisme, slagsas	D	G	B	V	D	G	B	V	D	G	B	V
F3-9	Laden	Vorm artikel	D	Z	Z	Z	O	V	V	V	D	V	Z	V

Tabel 11 Kans op t=0 en toename van de kans als gevolg van veroudering voor subfuncties van F2, 'initiatie'.
 Kans: Veelvuldig, Waarschijnlijk, Zo nu en dan, Een enkele keer, Denkbaar, Onwaarschijnlijk.
 Omstandigheden: Enorm, Groot, Redelijk, Beperkt, Zeer beperkt, Verwaarloosbaar.

Sub-functie	Beschrijving	Componenten	Te laag				Te hoog				Niet			
			kans (t0)	hoge T	hoge RV	trilling	kans (t0)	hoge T	hoge RV	trilling	kans (t0)	hoge T	hoge RV	trilling
F2-1	Nabijheidswerking	Zend-ontvanggedeelte, condensator	D	B	V	B	D	V	V	V	D	B	V	B
F2-2	Activeren tijdschakelaar	Batterij	D	B	V	B	D	V	V	V	D	B	V	B
F2-3	Activeren zend- en ontvanggedeelte	Zend- en ontvanggedeelte, signaalverwerkings-eenheid	D	B	V	B	D	V	V	V	D	B	V	B
F2-4	Regelen gevoeligheid	Sea State Sensing circuit	D	B	V	B	D	V	V	V	D	B	V	B
F2-5	Sluiten schakelaar door schok	Aanslagschakelaar	D	R	V	V	D	V	V	B	D	R	V	B
F2-6	Uitschakelen ontvanggedeelte	Doorbrand-mechanisme	O	B	V	B	O	V	V	V	O	B	V	B
F2-7	Opladen condensator	Batterij, condensator, (verbroken) kortsluitverbinding	D	B	V	B	D	V	V	V	D	B	V	B
F2-8	Aansluiten condensator op afvuurcircuit/verbrek en kortsluitverbinding	Kortsluitschakelaar	D	B	V	B	D	V	V	V	D	B	V	B
F2-9	Vertraging sluiters	Tandwielmechanisme	D	R	V	V	D	V	V	B	D	R	V	B
F2-10	Zuur uit ampul tussen platen	Ampul, rotatie	D	R	V	B	D	V	V	V	D	R	V	B
F2-11	Sluiter ontborgen	Borgpen, wapeningssamenstel, versnelling	D	R	V	V	D	V	V	B	D	R	V	B

Tabel 12 Kans op t=0 en toename van de kans als gevolg van veroudering voor subfuncties van F1, 'uitwerking op doel'.
 Kans: Veelvuldig, Waarschijnlijk, Zo nu en dan, Een enkele keer, Denkbaar, Onwaarschijnlijk.
 Omstandigheden: Enorm, Groot, Redelijk, Beperkt, Zeer beperkt, Verwaarloosbaar.

Sub-functie	Beschrijving	Componenten	Te laag			Te hoog			Niet					
			kans (t0)	hoge T	hoge RV	trilling	kans (t0)	hoge T	hoge RV	trilling	kans (t0)	hoge T	hoge RV	Trilling
F1-1	Verscherven granaatlichaam	Granaatlichaam, kogels	O	V	V	V	O	V	V	V	O	V	V	V
F1-2	Detonatie springlading	Springlading	D	Z	Z	Z	D	V	V	V	D	V	V	V
F1-3	Detonatie schokversterker granaat	Schokversterker	D	Z	Z	Z	D	V	V	V	D	V	V	V
F1-4	Detonatie overdrachtslading	Overdrachtslading	D	Z	Z	Z	D	V	V	V	D	V	V	V
F1-5	Detonatie schokversterker	Schokversterker	D	Z	Z	Z	D	V	V	V	D	V	V	V
F1-6	Detonatie slaghoedje	Slaghoedje	D	Z	Z	Z	D	V	V	V	D	V	V	V
F1-7	Detonatie elektrische detonator	Elektrische detonator, condensator	D	Z	Z	Z	D	V	V	V	D	V	V	V

Als meest kritische component van de functie- en faalanalyse komt de voortdrijvende lading naar voren. De NH-7-buis wordt uitgefaseerd en vervangen door de NH-9 buis. Een van de aanpassingen bij de NH-9 ten opzichte van de NH-7 is de batterij. Deze is vanwege de beperkte levensduur vervangen door een lithium batterij. Bij de ontwikkeling van de NH-9-buis kwam de omhulling van de ASIC als kritisch naar voren.

2.3.5 26.5 mm seinpatroon

Op de 26.5 mm seinpatroon is in 2002 een functie- en faalanalyse uitgevoerd.

Voor de beginwaarden is aangenomen dat bij de verwerving alles goed functioneerde, de kans valt dan in categorie 'E'.

Voor de uitvoering van de functie- en faalanalyse zijn de volgende afwegingen gemaakt:

- Branden en ontsteken van sassen die gebaseerd zijn op magnesium-nitrat composities wordt ingeschat in waarschijnlijkheids categorie 'E'.
- Zwart buskruit is ongevoelig voor veroudering, tenzij er sprake is van een hoge (lucht)vochtigheid.
- Pyrotechnische composities zijn over het algemeen zeer gevoelig voor veroudering zowel bij hoge temperaturen als bij hoge (lucht)vochtigheid. Dit geldt met name voor composities die hygroscopische zouten en/of metalen bevatten.
- Corrosie van de slaghoedjes bleek in geen enkel geval tot weigeraars te leiden en leidt kennelijk niet tot het niet functioneren van de slaghoedjes zelf. Geen ontbranding komt wel voor in combinatie met corrosie van de slaghoedjes. De patronen zijn afgelakt waardoor het binnendringen van vocht door de lak onwaarschijnlijk lijkt. Wel kan vocht uit de kartonnen schijven (karton bevat vanuit het productieproces altijd enkele procenten vocht) door het patroon diffunderen en andere componenten waaronder de sassen aantasten.

- In de meeste gevallen is vocht de belangrijkste oorzaak van degradatie van pyrotechnische composities die magnesium bevatten. De kritische composities bevatten daarbij zeer hygroscopische nitraatzouten. De absorptie van vocht en de mogelijke reacties van magnesium met water zorgen voor afname van de prestatie van de sassen. De bron van het vocht lijkt de kartonnen schijven te zijn die zich in de patronen bevinden, hetgeen een interne incompatibiliteit inhoudt.

Tabel 13 Toename van de kans als gevolg van veroudering o.i.v. een hoge temperatuur en een hoge relatieve luchtvochtigheid voor de subfuncties van F2 voor de seinpatroon zonder parachute.
Kans: **Veelvuldig**, **Waarschijnlijk**, **Zo nu en dan**, **Een enkele keer**, **Denkbaar**, **Onwaarschijnlijk**
Omstandigheden: **Enorm**, **Groot**, **Redelijk**, **Beperkt**, **Zeer beperkt**, **Verwaarloosbaar**.

Sub-functie		Afwijking: verminderd/slecht		Afwijking: ontijdig/ongewild		Afwijking: niet	
		Veroudering	Kans (t=20)	Veroudering	Kans (t=20)	Veroudering	Kans (t=20)
F2-1	Uitstoten lichtelement	V	E	V	E	V	E
F2-2	Branden voortdrijvende lading	B	D	B	D	B	D
F2-3	Ontsteken voortdrijvende lading	B	D	B	D	B	D
F2-4	Functioneren slaghoedje	B	D	B	D	B	D

B: beperkt; V: verwaarloosbaar, Kans: E: zeer onwaarschijnlijk; D: gering.

Tabel 14 Toename van de kans als gevolg van veroudering onder invloed van een hoge temperatuur en een hoge relatieve luchtvochtigheid voor de subfuncties van F2 voor de lichtpatroon met parachute.
Kans: **Veelvuldig**, **Waarschijnlijk**, **Zo nu en dan**, **Een enkele keer**, **Denkbaar**, **Onwaarschijnlijk**
Omstandigheden: **Enorm**, **Groot**, **Redelijk**, **Beperkt**, **Zeer beperkt**, **Verwaarloosbaar**.

Sub-functie		Afwijking: verminderd/slecht		Afwijking: ontijdig/ongewild		Afwijking: niet	
		Veroudering	Kans (t=20)	Veroudering	Kans (t=20)	Veroudering	Kans (t=20)
F2-1	Ontvouwen parachute	V	E	V	E	V	E
F2-2	Uitstoten lichtelement	V	E	V	E	V	E
F2-3	Branden uitstootlading	B	D	B	D	B	D
F2-4	Ontsteken uitstootlading	B	D	B	D	B	D
F2-5	Branden vertraagsas	B	D	B	D	B	D
F2-6	Ontsteken vertraagsas	B	D	B	D	B	D
F2-7	Branden voortdrijvende lading	B	D	B	D	B	D
F2-8	Ontsteken voortdrijvende lading	B	D	B	D	B	D
F2-9	Functioneren slaghoedje	B	D	B	D	B	D

B: beperkt; V: verwaarloosbaar, Kans: E: zeer onwaarschijnlijk; D: gering.

Tabel 15 Toename van de kans als gevolg van veroudering o.i.v. een hoge temperatuur en een hoge relatieve luchtvochtigheid voor de subfuncties van F1.

Kans: **Veelvuldig**, **Waarschijnlijk**, **Zo nu en dan**, **Een enkele keer**, **Denkbaar**, **Onwaarschijnlijk**.
 Omstandigheden: **Enorm**, **Groot**, **Redelijk**, **Beperkt**, **Zeer beperkt**, **Verwaarloosbaar**.

Sub-functie	Afwijking: verminderd/slecht		Afwijking: ontijdig/ongewild		Afwijking: niet	
	Veroudering	Kans (t=20)	Veroudering	Kans (t=20)	Veroudering	Kans (t=20)
F1-1 Branden lichtsas	G	C	G	C	G	C
F1-2 Ontsteken lichtsas	G	C	G	C	G	C
F1-3 Branden vuurversterksas	G	C	G	C	G	C
F1-4 Ontsteken vuurversterksas	G	C	G	C	G	C
F1-5 Branden aanvuursas	B	D	B	D	B	D
F1-6 Ontsteken aanvuursas	B	D	B	D	B	D

Als meest kritisch komen de subfuncties F1-1 tot en met F1-3 naar voren.

De combinatie van de functie- en faalanalyse, de PO-rapporten en de kennis van de samenstelling van de verschillende sassen geven aan dat de onderdelen van de ontstekingsketen van vuurversterksas naar lichtsas de kritische componenten zijn van de seinpatronen zowel met als zonder parachute.

2.4 Eigenschappen van munitiecomponenten

Voor het vullen van de database is veel informatie nodig. Van sommige onderdelen zijn standaardgetallen bekend (tabel 16) [18]. Dit hoofdstuk geeft een overzicht van 'losse' informatie die gebruikt kan worden voor het vullen van de database.

De onderverdeling in dit hoofdstuk is naar munitiecomponent.

Tabel 16 Typische betrouwbaarheden van enkel schot items.

Item no	One-Shot Device	Reliability	95% Confidence limits	Failures 10 ⁻⁶ trials
1	Actuator, hot gas.	0.9983	0.9992/0.9960	1750
2	Cartridge, ejector release unit.	0.9992	0.9998/0.9972	760
3	Cartridge, cover removal.	0.9897	0.9965./0.9700	10350
4	Expansive motor, motor, gas piston thruster.	0.9998	0.9999/0.9992	150
5	Flare, guided missile	0.9994	0.9999/0.9986	566
6	Gas generator (actuator or remote gyro).	0.9988	0.9990/0.9985	1154
7	Gyro assembly, remote (efflux of remote gas impinges on buckets cut into rotor periphery less gas generator and ignitor).	0.9991	0.9999/0.9976	928
8	Gyro assembly, integral (cordite charge built into periphery of rotor; Catherine Wheel principle).	0.9936	0.9964/0.9889	6359
9	Ignitor, electric bridge wire.	0.9996	0.9999/0.9990	430
10	Ignitor, fuzehead	0.9983	0.9991/0.9969	1700
11	Ignition and safety arming unit (rocket motor).	0.9903	0.9939/0.9851	9745
12	Rocket motor, case-bonded type (less ignitor and electrical supply failures).	0.9993*	0.9997*/0.9983	666*
13	Rocket motor, loose-cartridge type(includes ignitor and electrical supply failures).	0.9988	0.9993/0.9978	1246
14	Switch, fusible link.	0.9992	0.9999/0.9957	735
15	Thermal battery, cup and cover type.	0.9996	0.9999/0.9985	400
16	Thermal battery, pellet: zirconium/barium chlorate pyrotechnic.	0.9997	0.9999/0.9982	320
17	Typical warhead initiation train (surface/air-to-air) consisting of (a) electrical power and wiring; (b) safety and arming unit (single channel, mechanical shutter); (c) pressure delay unit or accelerometer; (d) infrared fuze; (e) warhead.	0.9929	0.9979/0.9768	7100
18	Wire guidance mechanism.	0.9986	0.9991/0.9978	1400

Alle gegevens (behalve met *) bevatten ook de fouten in geassocieerde elektrische stroomvoorziening zoals bedrading, schakelaars, stekker, bussen, etc.

2.4.1 Buizen

Nabijheidsbuizen [15] bestaan globaal uit (twee) printplaten, een 'antenne', een batterij en een ontsteektrein. De levensduur die de fabrikant opgeeft is over het algemeen enkele maanden. De praktijk leert dat buizen over het algemeen minstens 10 jaar goed blijven.

In het verleden waren de onderdelen in de buizen gegoten in bijenwas, die zorgde voor de zogenaamde 'potting'². De bijenwas zorgde voor problemen. Met zwavelzuur gereinigde was heeft bijvoorbeeld geleid tot schade aan de papieren condensator voor de ontsteking. Ook ontstond nog wel eens roest in de buizen. Tegenwoordig wordt een polyurethaan 'potting' gebruikt die zowel de onderdelen fixeert als roestvorming tegengaat.

Verder zijn in het verleden problemen opgetreden en gerapporteerd;

- met de kritische diameter (voor detonatie) van de gebruikte secundaire springstoffen. Als de diameter van deze patronen kleiner is dan de kritische diameter kan dit leiden tot weigeraars;
- met slipjoints om buizen in te stellen omdat deze soms ook onbedoeld bewegen [20];
- door beschadiging van de elektronica of een schakelaar van een buis bij impact waardoor de buis niet (goed) meer functioneert [31];
- door interactie tussen elektronica en springstof [19]. Vermoedelijk hebben de weekmakers uit de springstof de lijm (capton op metaal) van de Electronic Foil Initiator (EFI) weekgemaakt [30];
- door verandering bij de productie. Naast de verandering in samenstelling en of deeltjesgrootte verdeling bij de pyrotechniek hebben zich problemen voorgedaan met het veranderen van de dikte van een spiraal in een buis. Dat gaf een frequentieverandering in de trilling waardoor de buis te snel afging.

Veroudering onder invloed van de omgeving wordt minder aannemelijk geacht [15]. Elektronica verouderd niet snel, zeker niet als het, zoals in de buis, is ingeschuimd in polyurethaan. De elektronica is echter slecht bestand tegen neutronen en temperaturen boven de 72 °C. Uit onderzoek is gebleken dat de plastic behuizing van de ASIC scheurt onder deze thermische belasting [15].

2.4.2 Batterij

De batterij van buizen heeft diverse ontwikkelingen doorgemaakt. Oorspronkelijk werden loodoxide batterijen gebruikt. Deze zijn op den duur vervangen door chroomzuur/zink-koolstof batterijen. Het chroomzuur lag opgeslagen in een glazen bol, die brak bij het schot. Het vrijgekomen zuur stroomde tussen enkele metalen plaatjes die met het chroomzuur voor de spanning zorgden. Een groot probleem met chroomzuur is dat kristalvorming plaatsvindt als de stabilisator verbruikt is. Deze kristallen belemmeren de stroom van zuur tussen de platen en kunnen leiden tot blindgangers. De huidige problemen met de Nina-buis (KL, 155 mm) en de NH-7 buis (KM, 76 mm) worden toegeschreven aan deze batterij [15].

In de nieuw ontwikkelde buizen is deze stroombron vervangen door een lithium batterij met thionylchloride, waardoor breuk van de glazen ampul werd geëlimineerd. Het nadeel van deze laatste batterij is dat de omhulling niet van plastic mag zijn. Stikstof en zuurstof kunnen door het plastic diffunderen en passieveren vervolgens het lithium. Voor de behuizing, gevuld met helium, wordt RVS gebruikt. De lekdichtheid van de buis wordt onder onderdruk getest middels het bepalen van de hoeveelheid helium dat de RVS-behuizing verlaat.

² 'Potting' is een handeling waarbij het element in een 'pot' wordt geplaatst, en vervolgens middels een epoxyhars, PU-schuim of ander afsluitend materiaal van de buitenlucht wordt afgesloten.

De huidige batterijen van munitronics voor de *standard artillery UA 6215* en de *ruggedized artillery/navy UA 6275* hebben een typische shelflife van 20 jaar bij een opslag temperatuur tussen de $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$ en de $71\text{ }^{\circ}\text{C}$ en kunnen worden toegepast tussen $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$ en $63\text{ }^{\circ}\text{C}$ [16]. Bij temperaturen tussen de 80 en $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ zal de thionylchloride gaan koken, waardoor het glazen reservoir kapot gaat [17].

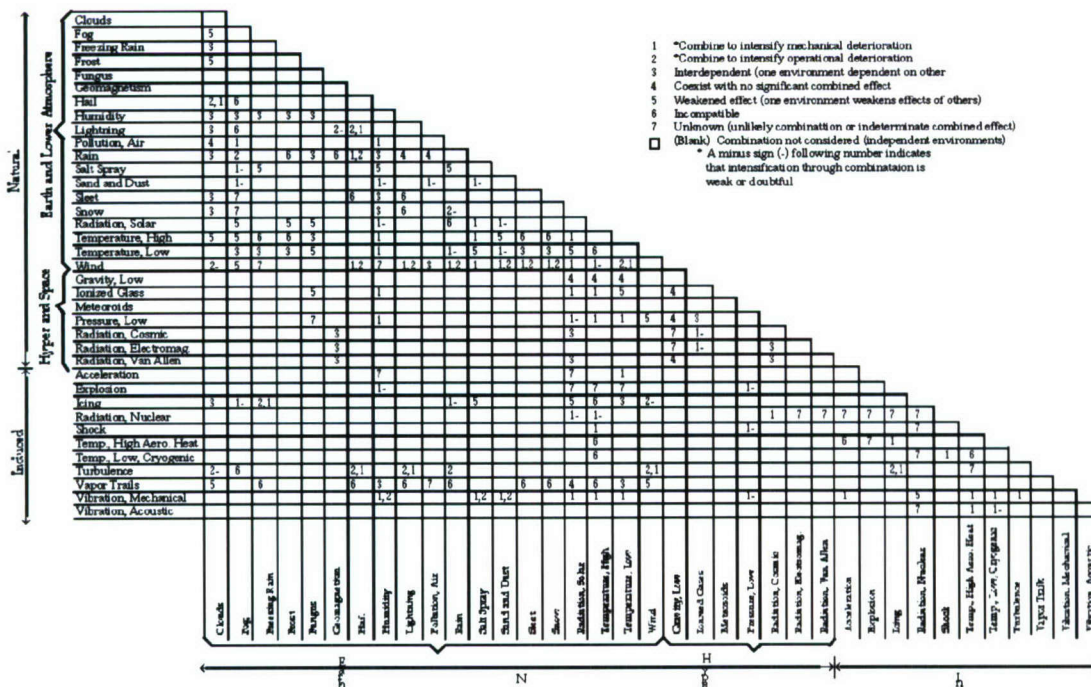
2.4.3 *Electro Explosive Device*

Een laatste punt van aandacht is de EED (Electro Explosive Device), het element in de elektrische schakeling dat moet zorgen dat de pyrotechnische trein wordt geïnitieerd. Door veroudering kan de weerstand toenemen zodat geen correcte initiatie (vertraagd) meer plaatsvindt. Ook blijkt een EED geactiveerd te kunnen worden in de buurt van een krachtige radar. Dit leidt uiteindelijk, bij een correct werkend 'safe and arm device' tot een blindganger.

2.5 **Effect van de omstandigheden**

Voor kwalitatieve informatie over effecten van belastingen kan gekeken worden in het veiligheidsvademecum [21] of voor elektronica in MIL-HDBK-338 [2 p 135 e.v.]. Kwantitatieve informatie is te vinden in MIL-STD-1670A, 'Environmental criteria and guidelines for air-launched weapons' [22] en voor elektronica in MIL-HDBK-344A 'Environmental stress screening (ESS) of electronical equipment' [23] en MIL-HDBK 781A, 'Handbook for reliability test methods, plans, and environments for engineering, development qualification, and production' [24].

Om een indruk te krijgen welke omstandigheden effect op elkaar hebben kan figuur 3 gebruikt worden [2]. In deze referentie worden op de volgende pagina's ook enkele zaken uitgewerkt.



Figuur 3 Effect van gecombineerde omstandigheden [2].

2.5.1 Testmethode

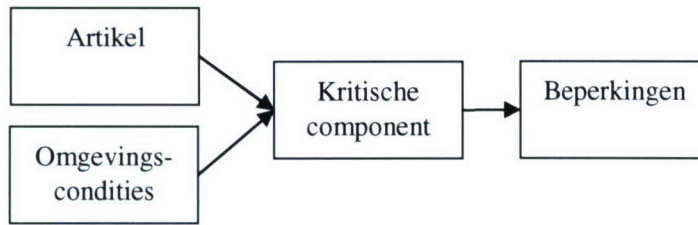
Om het effect van de verschillende belastingen te bepalen zijn er verschillende testmethoden.

- DEF STAN 00-35 [25] geeft een overzicht van testen, onderverdeeld in mechanische, klimatologische, chemisch/biologische en abnormale (IM-) testen.
- MIL-STD-810 [26] geeft een overzicht van testen voor omgevingstesten.
- MIL-STD 331 [32] geeft een overzicht van testen voor buizen.

2.6 Database

Regelmatig voert TNO onderzoeken uit in opdracht van het Ministerie van Defensie met betrekking tot de veiligheid van munitie. Het onderzoek is veelal gericht op de bruikbaarheid van munitie voor operaties, de resterende levensduur na afloop van een missie of advies voor het periodiek onderzoek. Uit de behoefte aan een systeem om de verworven informatie voor toekomstige toepassingen beschikbaar te houden gecombineerd met de mogelijkheid om deze informatie efficiënt toe te passen bij toekomstige vragen is de FFA-database opgezet.

De database kan op meerdere manieren worden gebruikt, bijvoorbeeld voor het bepalen van de mogelijkheden van gebruik in een bepaald inzetgebied en voor het bepalen van de PO-onderdelen en frequentie. Figuur 4 laat schematisch de werking zien voor de mogelijkheden van gebruik in een inzet gebied zien. Op basis van het te verwachten klimaat wordt een informatie gegeven over de eventuele beperkingen. Op basis van de beperkingen kan ervoor gekozen worden om de munitie niet mee te nemen naar het inzetgebied of (logistieke) maatregelen te nemen. Hierbij valt bijvoorbeeld te denken aan het aanpassen van de opslagfaciliteiten.



Figuur 4 Schematische weergave van gebruik van de database voor het bepalen van de mogelijkheid om munitie in te zetten.

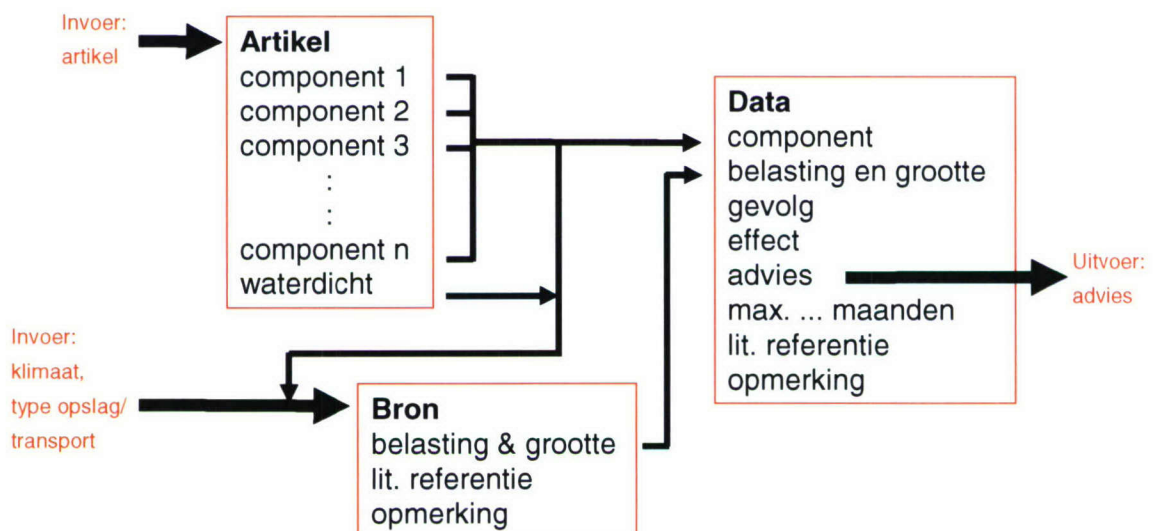
De tweede mogelijkheid voor gebruik is het bepalen van kritische condities (figuur 5). Op basis hiervan kan bepaald worden welke maatregelen genomen moeten worden wanneer munitie bijvoorbeeld gebruikt wordt buiten het bereik waarvoor de munitie verworven is. Hierbij valt te denken aan aanpassing van het periodiek onderzoek.



Figuur 5 Schematische weergave van gebruik van de database voor het bepalen van de kritische condities.

2.7 Opzet van de database

De database geeft advies welke onderdelen van de munitie aandacht behoeven. De database baseert zich daarbij op informatie over de artikelen, klimaat en type opslag en transport zoals die door de gebruiker worden ingevoerd en op de kennis die in de database is opslagen. De database bestaat in principe uit drie delen: 'artikel', 'bron' en 'data' (figuur 6).



Figuur 6 Schematische weergave van de database.

Tabel 17 geeft een overzicht van de invoer, uitvoer en gegevens die elk van de delen bevat. In de volgende paragrafen worden de tabellen nader beschreven.

Tabel 17 Overzicht van de informatie in de database.

	Input	Bevat	Bronnen/informatie	Output
Artikel	Artikel of hoofdgroep	Componenten van artikelen en informatie over de verpakking.	LVMS/POEMA Additioneel betaalde opdrachten Veiligheids vademecum	Componenten Informatie over verpakking
Bronnen	Type transport, gebruik en opslag. In munitie aanwezige bronnen	Relatie tussen omgeving en belasting	MIL-STD-810F AECTP STANAG 2895, metingen tijdens missies	Belasting type en grootte
Data	Componenten en belastingen	Relatie tussen belasting, schade en advies	LVMS/POEMA Additioneel betaalde opdrachten	Advies: - afstoten; - PO; - geen actie.

2.7.1 Artikel

De eerste keuze die bij het invullen van de database moet worden gemaakt is de keuze voor het artikel. Hoewel er naar gestreefd wordt op termijn alle veelgebruikte munitie in de database op te nemen, zal zeker in het begin gebruik worden gemaakt van een hoofdgroep. De tabel 'artikel' bevat de informatie die gerelateerd is aan munitie-artikelen. Door een keus te maken komt informatie beschikbaar over de verschillende componenten van de geselecteerde munitie (bijvoorbeeld type kruit, lekdichtheid, beschermende werking van de verpakking). De informatie over de materialen is de basis voor de analyse, de beschermende werking van de verpakking en de lekdichtheid worden gebruikt om de invloed van de omgeving te bepalen. Een voorbeeld van de informatie uit deze tabel is weergegeven in tabel 18.

Tabel 18 Opzet van de database: tabel 'artikel'.

	NH-7	CTG 35 mm HE LKD
Ontbrandingsdop	-	onbekende pyro
Huls	-	onbekend metaal
Voortdrijvende lading	-	rookzwak buskruit
Ontsteek vertraging	-	-
Opvulstuk	-	-
Springlading	-	onbekende springstof
Rondlopende groeven	-	-
Draaiingsband	-	-
Kogels	-	-
Granaatlichaam	-	onbekend metaal
Booster/schokversterker/overdrachtslading	materiaal onbekend	onbekende springstof
Aanvuurlading/vlamversterker	-	Zwartbuskruit
Nabijheidselectronica	electronica	-
Schokmechanisme	mechanica	onbekend metaal
Zend- en ontvangedeelte	zend- en ontvangedeelte	-
Buiskap	materiaal onbekend	-
Doorbrandring	materiaal onbekend	-
Batterij	chromiumzuur	-
Signaalverwerkingseenheid	electronica	-
Mechanische kortsluitschakelaar	onbekend metaal	-
Wapeningssamenstel	onbekend metaal	-
Bodemplaat	-	onbekend metaal
Geleiband	-	onbekend metaal
Schokbuis	-	DM 311
Buislichaam	-	onbekend metaal
Slagpijpje	-	onbekende springstof
Afdekschijfje	-	Karton
Slagsas	-	onbekende pyro
Hoedje	-	onbekende pyro
Aambeeld	-	onbekend metaal
Waterdicht	Ja	Ja
Verpakking waterdicht	nee	Nee

De verpakking bepaalt de gevoeligheid van het artikel voor invloeden van buitenaf als vocht en trilling. Een artikel in een luchtdichte verpakking zal geen last hebben van een vochtige omgeving in tegenstelling tot een artikel dat niet luchtdicht verpakt is. De verpakking zal een dempende werking op belastingen als trilling en temperatuur variaties. Dit wordt meegenomen in het bepalen van de belastingen.

2.7.2 Bron

De tabel bron combineert de vorm van opslag of transport en het klimaat en geeft als resultaat de belastingen (temperatuur, luchtvochtigheid, etc.) waaraan de munitie, eventueel in de verpakking wordt blootgesteld. Een voorbeeld, op basis van STANAG 2895 referentie [27], is in tabel 19 uitgewerkt.

Tabel 19 Opzet van de database: tabel bron op basis van informatie uit STANAG 2895 [27].

tDXtype	klimaat	Opslag/transport middel	Temperatuur		RH		Vibraties
			min	max	min	max	
Opslag	A1	Onder gespannen zeil (meteo gegevens)	32	49	3	8	geen
Opslag	A2	Onder gespannen zeil (meteo gegevens)	30	44	14	44	geen
Opslag	A3	Onder gespannen zeil (meteo gegevens)	28	39	43	78	geen
Opslag	B1	Onder gespannen zeil (meteo gegevens)	23	32	66	88	geen
Opslag	B2	Onder gespannen zeil (meteo gegevens)	26	35	74	100	geen
Opslag	B3	Onder gespannen zeil (meteo gegevens)	31	41	59	88	geen
Opslag	C0	Onder gespannen zeil (meteo gegevens)	-19	-6	100	100	geen
Opslag	C1	Onder gespannen zeil (meteo gegevens)	-32	-21	100	100	geen
Opslag	C2	Onder gespannen zeil (meteo gegevens)	-46	-37	100	100	geen
Opslag	C3	Onder gespannen zeil (meteo gegevens)	-51	-51	100	100	geen
Opslag	C4	Onder gespannen zeil (meteo gegevens)	-57	-57	100	100	geen
Opslag	M1	Onder gespannen zeil (meteo gegevens)	29	48	21	67	geen
Opslag	M2	Onder gespannen zeil (meteo gegevens)	25.5	35	53	100	geen
Opslag	M3	Onder gespannen zeil (meteo gegevens)	-34	-23	100	100	geen
Opslag	A1	Container (Storage)	33	71	-	-	geen
Opslag	A2	Container (Storage)	30	63	-	-	geen
Opslag	A3	Container (Storage)	28	58	-	-	geen
Opslag	B1	Container (Storage)	23	32	66	88	geen
Opslag	B2	Container (Storage)	30	63	19	74	geen
Opslag	B3	Container (Storage)	33	71	14	80	geen
Opslag	C0	Container (Storage)	-21	-10	100	100	geen
Opslag	C1	Container (Storage)	-33	-25	100	100	geen
Opslag	C2	Container (Storage)	-46	-37	100	100	geen
Opslag	C3	Container (Storage)	-51	-51	100	100	geen
Opslag	C4	Container (Storage)	-57	-57	100	100	geen
Opslag	M1	Container (Storage)	30	69	8	64	geen
Opslag	M2	Container (Storage)	30	63	13	78	geen
Opslag	M3	Container (Storage)	-34	-23	100	100	geen

In dit voorbeeld zijn alleen temperatuur, relatieve luchtvochtigheid en vibraties opgenomen. Bij het verder vullen van de database zal een keuze worden gemaakt uit de belastingen die in het vorige hoofdstuk zijn genoemd. Op basis van informatie uit de artikel tabel zullen bronnen die potentieel in de munitie zelf aanwezig zijn zoals bijvoorbeeld vocht in karton, worden meegenomen.

2.7.3 Data

In de tabel data worden tenslotte de componenten en de belasting gecombineerd om te komen tot een advies. Een advies kan bijvoorbeeld zijn dat geen enkel component kritisch is, maar ook dat gebruik van de munitie onder de genoemde condities niet verantwoord geacht wordt. Een voorbeeld van de tabel is opgenomen in tabel 20.

Tabel 20 Opzet van de database: tabel data.

Component	Tmin	Tmax	RHmin	RHmax	Vibraties	Gevolg	Effect	Referentie
Lithium Thionylchloride batterij	-54	-46				Veilige opslagtemperatuur	Niet gereed voor gebruik	[16, 17]
Lithium Thionylchloride batterij	-46	63				Gebruikstemperatuur	-	[16, 17]
Lithium Thionylchloride batterij	63	71				Veilige opslagtemperatuur	Niet gereed voor gebruik	[16, 17]
Lithium Thionylchloride batterij	71	-				Glazen reservoir met thionylchloride (kan breken; thionylchloride komt vrij)	Blindganger	[16, 17]

2.8 Referenties

- [1] Boers, M.N. en Klerk, W.P.C. de, Evaluatie van de functie- en faalanalyse, TNO-rapport, PML 2002-A82, juli 2003.
- [2] MIL-HDBK-338B, 'Electronic reliability design handbook' October 1998.
- [3] Gijzel, ing. A.E.A. van en Driel, dr. ir. C.A. van, Rapportage POEMA wp1: functie- en faalanalyse 81 mm springrook, TNO-rapport PML 2000-IN24, september 2002.
- [4] Boers, ir. M.N. en Klerk, ing. W.P.C. de, Technical note geschutskruit, CTG 35 mm HE LKD, TNO-rapport PML 2000-IN23, maart 2001.
- [5] Reeling Brouwer, ir. G.C., Functie- en faalanalyse AIM-9L Sidewinder, TNO-rapport PML 2000-A31, september 2001.
- [6] Boers, ir. M.N. en Klerk, ing. W.P.C. de, Technical note geschutskruit, CTG 76/62 HE-PFF W/Fuze NH7, TNO-rapport PML 2003-IN13, augustus 2003.
- [7] Klerk, W.P.C. de; Colpa, W.; Boers, M.N.; Reeling Brouwer, G.C.; Driel, C.A. van en Weijl, J.J.T.G., Rapportage Periodiek Onderzoek Energetische Materialen en Artikelen (POEMA-1), TNO-rapport TNO DV2 2005-A48.
- [8] Van Driel, C.A., overleg 26 april 2000.
- [9] Van Harmelen, P., overleg 10 april 2000.
- [10] Rapport periodiek onderzoek, directie materieel koninklijke landmacht afdeling beproevingen locatie Hembrug, brisantgranaatpatroon DM11 van 35 mm met stalen huls en schikbuis DM 311 in schakelband Lot EMZ 79-1, projectnummer 2070 P, document nummer 14347, oktober 1992.
- [11] Leentvaar, ing. B.; Beukelman, ir. P.C.R.; Bloem, O.J. en Schepp, C.J., Eindrapportage ontwikkeling nieuwe generatie 76 mm nabijheidsbuis (NH-9) met glijdend filter, de DARWIN, FEL rapport FEL-98-C124, juni 1998.
- [12] Leentvaar, B., E-mail 24 januari 2001.

- [13] Bloem, O.J., Overleg 26 juni 2002.
- [14] Scholtes, ir. J.H.G., Overleg april 2000.
- [15] Bloem, O.J., overleg 15 mei 2002 en 26 juni 2002, TNO-rapport FEL-94-A202 'Onderzoek naar technieken in nabijheidsbuizen tegen landdoelen'.
- [16] Documentatieblad Thales Munitronics, 'Lithium thionylchloride reserve batteries', FOL. 0191, 03/02/H.
- [17] Bespreking Wouter Blom (Thales Munitronics), Overleg 13 augustus 2003.
- [18] Defence standard 00-42 (Part 1), 'Reliability and maintainability assurance guides part 1: One shot devices/systems', Issue 1, 25 July 1997.
- [19] Boers, M.N., Besprekingsverslag bezoek NSWC Crane division, 1 oktober 2003.
- [20] Boers, M.N., Besprekingsverslag bezoek NSWC Indian Head division, 26 september 2003.
- [21] VS 9-844, veiligheidsvademecum voor munitieuitwerking.
- [22] MIL-STD-1670A, 'Environmental criteria and guidelines for air-launched weapons', 30 July 1976, reviewed and determined valid for acquisition 23 October 1991.
- [23] MIL-HDBK-344A 'Environmental stress screening (ESS) of electrical equipment', 16 augustus 1993.
- [24] MIL-HDBK 781A, 'Handbook for reliability test methods, plans, and environments for engineering, development qualification, and production, 1 april 1996.
- [25] DEF STAN 00-35 'Environmental handbook for defence materiel, part 3: Environmental test methods', Issue 3, 7 May 1999.
- [26] MIL-STD-810F, 'Environmental engineering considerations and laboratory tests', 1 January 2000.
- [27] STANAG 2895, Extreme climatic conditions and derived conditions for use in defining design/test criteria for NATO forces materiel, edition 1, 15 februari 1990.
- [28] NINA-buis, zesde deelverslag, TNO-rapport TL 1974-2, 22 februari 1974, Opdr. 9328-VI.
- [29] Krabbendam – La Haye, ing E.L.M., Verslag van het 4th international symposium on the heat calorimetry of energetic materials, september 7-10, 2003, Leeds, UK.
- [30] Prinse, W.C., Overleg 7 oktober 2003.
- [31] Zanten, J. van, De vervorming van de NH-7 buis bij het treffen van een staalplaat, afstudeerscriptie, EA 2001-10509.
- [32] MIL-STD 331B, 'Fuze and fuze components, environmental and performance tests for', 1 May 1991.

3 FFA aan 20 mm patroon

3.1 Inleiding

Er is in 2005 gestart met het uitvoeren van een functie- en faalanalyse (FFA) aan een in overleg met defensie gekozen artikel. In deze paragraaf is er gekozen voor 20 mm munitie van de Koninklijke Luchtmacht.

De FFA met als uitkomst de tabellen in dit hoofdstuk is opgesteld als output van een discussie met een groep TNO-medewerkers met een chemische achtergrond en munitiekennis. Daarbij zijn ervaringen en discussies bij International Congressen meegenomen.

Het doel van het onderzoek is te komen tot twee voorstellen voor PO-onderzoek: één door Defensie en één door TNO. In deze rapportage staat de door TNO voorgestelde lijn om te komen tot een PO door middel van de POEMA-methodiek en componenten-onderzoek.

3.2 Beschrijving artikel

Het artikel wat in deze paragraaf onderzocht is, is Munitielot NWM-L-2-11 (NSN 1305-17-050-1) met kruitlot PRB-26-79.

De levensduur van het artikel qua veiligheid en functionaliteit wordt grotendeels bepaald door de aanwezige kruitlading. De aanwezige kruitlading is van 1979, wat resulteert in een leeftijd van 26 jaar.

Bij de ontleding van kruit komt warmte vrij, hetgeen tot instabiliteit van het materiaal kan leiden (veiligheid) en een verandering in het brandgedrag (functionaliteit).

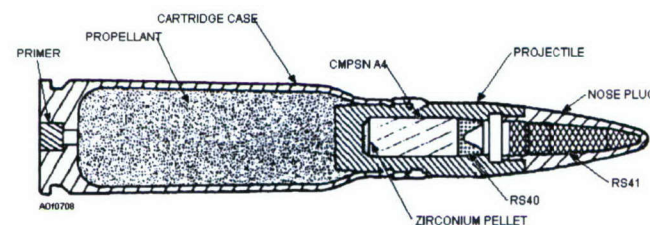


Figure 7.8.—PGU-28/B Semi-Armor Piercing High Explosive Incendiary.

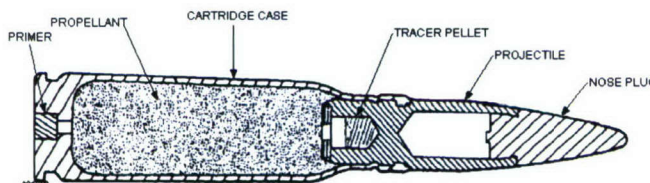


Figure 7.9.—PGU-38/B Target Practice-Tracer.

Figuur 7 Opbouw van 20 mm patroon.

Een ander, ongewenst brandgedrag kan leiden tot het openscheuren van het patroon, als gevolg van een te hoge druk bij het afvuren. Een dergelijk effect kan direct gerelateerd worden aan de achteruitgang van de kwaliteit van het kruit. Als gevolg van

het ontledingsproces breekt het nitrocellulose (hoofdcomponent in het kruit) in kleinere ketens, welke bij ontbranding een sneller brandpatroon zullen geven, met als gevolg een hogere piekdruk.

3.3 Resultaat beschikbare informatie

Het aanwezige kruit PRB-26-79, met als productiejaar 1979 is bij TNO in 1990 en 1998 middels HFC-metingen op stabiliteit getest.

De gebruikte coderingen zijn als volgt:

		Calw	DQ1	DQ2	D344 1990	D344 1998
		[kJ/kg]	[%]	[%]	[m]	[m]
KB 7244	AP MN 40	3514	0.51	1.78	0.34	0.37
KB 7247	API MN 20 A1	3487	0.53	1.90	0.36	0.36
KB 7250	HEI 56 E2	3482	0.51	1.83	0.37	0.37

Verklaring van de parameters:

Calw calorische waarde, de verbrandingswarmte bij volledige verbranding.

DQ1/DQ2 afname in energie bij opslag van 298 K en 303 K.

D344 veilige diameter voor een opslagperiode van 10 jaar @ 25 C.

Op basis van deze informatie is een grote energie afname bij opslag en/of gebruik bij hoge temperaturen niet uit te sluiten. Deze afname in energie heeft direct een gevolg op de mondingssnelheid (V_o) en maximale piekdruk (P_{max}). Internationaal wordt een energie-afname van 3% als maximum gezien, mede daar er dan een afwijking in het ballistisch gedrag optreedt.

Samenvattend

Gebruik van de munitie bij verhoogde temperatuur kan leiden tot afwijkend ballistisch gedrag, waarbij een te hoge piekdruk een gevaarlijke situatie (bijvoorbeeld scheuren van patroon) tot gevolg kan hebben.

4 FFA aan 40 mm patroon

4.1 Inleiding

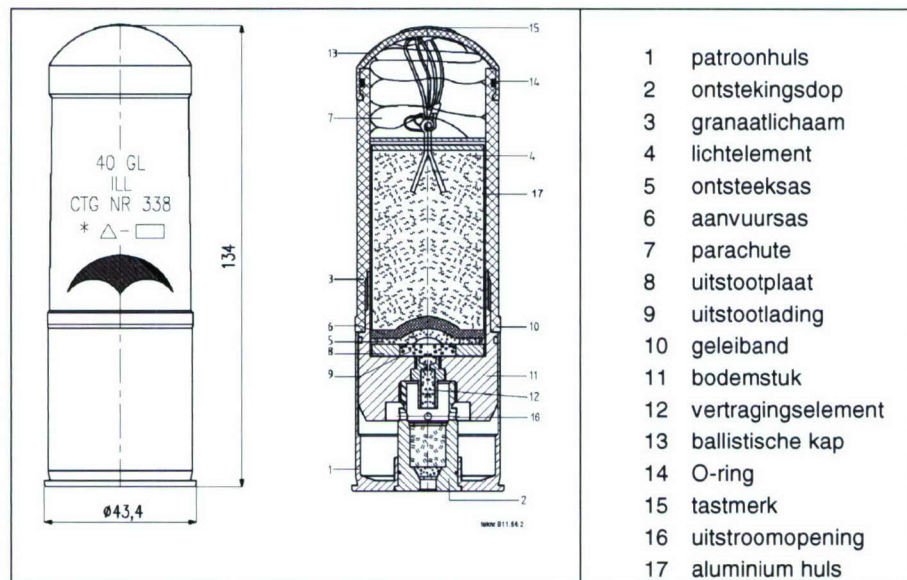
Er is in 2003 gestart met het uitvoeren van een functie- en faalanalyse (FFA) aan een in overleg met Defensie gekozen artikel. Er is gekozen voor 40 mm granaatwerpermunitie, te weten de lichtgranaat type 338.

De FFA met als uitkomst de tabellen in dit hoofdstuk is opgesteld als output van een discussie met een groep TNO-medewerkers met een chemische achtergrond en munitiekennis. Daarbij zijn ervaringen en discussies bij Internationale Congressen meegenomen.

Het doel van het onderzoek is te komen tot twee voorstellen voor PO-onderzoek: één door defensie en één door TNO. In deze rapportage staat de door TNO voorgestelde lijn om te komen tot een PO door middel van de POEMA-methodiek en componentenonderzoek, daarna wordt de methode zoals deze door defensie wordt gebruikt beschreven. Ten slotte wordt een vergelijking tussen beide methoden gemaakt.

4.2 Werking

De patroon is schematisch weergegeven in figuur 8.



Figuur 8 Schematische weergave van de 40 mm granaatpatroon nr. 338.

De 40 mm patroonwerper is een single shot wapen. De slagsas ontsteekt de aanvuurlading die de voortdrijvende lading aanvuurt. De brandende gassen zetten uit in de hoge-drukkamer. Tegelijkertijd wordt door de hete gassen de ontsteeksas van het vertragingselement ontstoken. De samengestelde gasdruk in de hoge- en lage-drukkamer drukt tegen het bodemstuk en verbreekt de verbinding tussen granaat en hoge-drukkamer. De granaat wordt door de loop gedreven.

Na ongeveer 4 seconden ontsteekt het vertragingselement de uitstootlading van het lichtelement. De uitstootlading ontsteekt de ontsteeksas van het lichtelement en drukt, door middel van de uitstootplaat, het lichtelement uit het granaatlichaam.

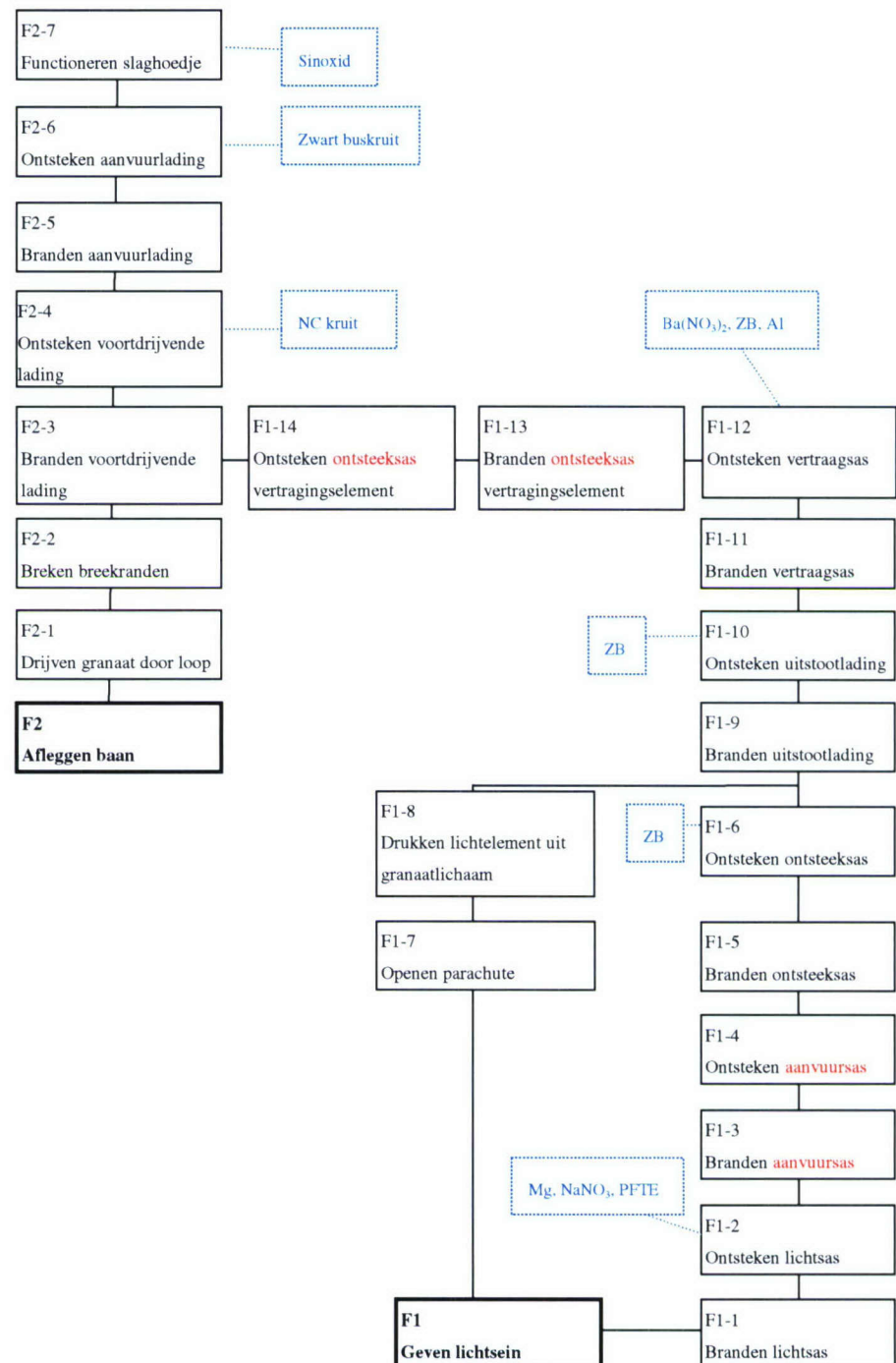
De parachute opent waardoor het lichtelement daalt met een snelheid van ongeveer 3 m/s.

De ontsteeksas vuurt de aanvuursas aan waarna vervolgens de lichtsas tot ontbranding komt. De patroon heeft een brandtijd van 30 seconden.

4.3 FFA van het lichtpatroon type 338

De FFA wordt uitgevoerd aan de hand van de methode als opgezet in POEMA I.

Er zijn voor het lichtpatroon twee hoofdfuncties gedefinieerd: 'Afleggen baan' (hoofdfunctie 2) en 'Geven lichtsein' (hoofdfunctie 1). De hoofd- en sub-functies zijn schematisch weergegeven in figuur 9.



Figuur 9 Schematische voorstelling van hoofdfunctie 2 'Afleggen baan' en hoofdfunctie 1 'Bereiken doel'. De composities van de sassen in rode tekst zijn niet bekend.

Voor de ernst van het falen van een sub-functie wordt het volgende gesteld:

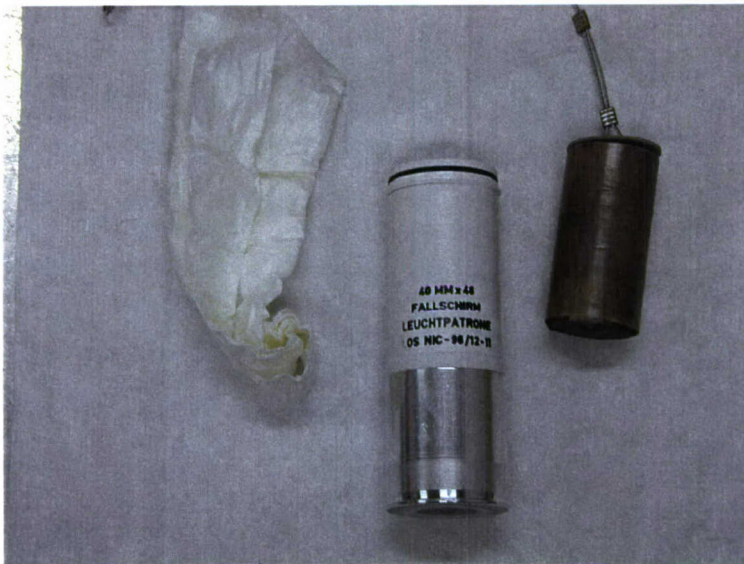
- Als falen leidt tot het brandend op de grond komen is de ernst belangrijk in verband met het mogelijk brandstichtende effect.
- Als falen leidt tot verlies van het wapen is de ernst kritiek.
- Als falen leidt tot te lage lichtopbrengst, of tot te kort geven van lichtsein is de ernst kritiek. Dit vanwege het feit dat een verdeckte opstelling in gevaar is gebracht en een actie eventueel moet worden afgebroken.
- Als falen leidt tot letsel of schade aan een platform is de ernst catastrofaal.

- Dit kan het geval zijn bij het niet functioneren van de vertraging (als de patroon afgaat in de loop of net uit de loop van het wapen) of als het artikel ontijdig afgaat (als de granaat nog aan de riem van een persoon is).

Voor bijna alle sub-functies houdt bovenstaande in dat de ernst van ontijdig of ongewild functioneren op catastrofaal wordt gezet. De ernst voor andere wijzen van falen (namelijk 'niet' en 'slecht/verminderd') wordt voor elk van de sub-functies ingeschat op basis van de effecten aan de hand van bovenstaande criteria.

Het artikel is gedemonteerd om een indruk te krijgen van de kans op falen op $t = 0$. Na het verwijderen van de ballistische kap kan de lichtpatroon inclusief parachute worden verwijderd (figuur 10). Na verwijdering van de buitenste laag geperst karton wordt de lichtsas zichtbaar. In de lichtsas is karton geperst waardoor er scheuren in de lichtsas zichtbaar zijn (figuur 11). Uit röntgenopnames van 8 patronen blijkt dat alle 8 patronen dezelfde scheuren laten zien. Niet bekend is wat de gevolgen zijn voor het brandgedrag van de patronen. Bekend is wel dat karton over het algemeen een paar procent vocht bevat waardoor het artikel een inwendige bron van vocht heeft (een inwendige incompatibiliteit).

De kans op falen op $t = 0$ wordt voor de lichtsas daarom niet als zeer onwaarschijnlijk (E), maar minimaal als gering (D) ingeschat.



Figuur 10 Lichtsas met parachute.



Figuur 11 Lichtsas met persfout.

TNO beschikt niet over de kennis en middelen om de ontsteekdop verder te demonteren. Over dat gedeelte van het artikel is geen aanvullende informatie verkregen.

De toename van de kans op falen is afhankelijk van de externe condities. Uit MilStd 810F is een aantal condities geselecteerd die van invloed kunnen zijn op de veroudering van de sub-functies. Dit zijn: trillingen, luchtvochtigheid, lage druk, regen, zoute mist, zand, mechanische schok en temperatuur. In tabel 21 is voor alle sub-functies weergegeven welke condities van invloed kunnen zijn op de toename van de kans op falen.

Tabel 21 Invloed van externe condities op de toename van de kans op falen.

Subfunctie	Trillingen	Luchtvochtigheid	Lage druk	Regen	Zoute mist	Zand	Mechanische schok	Temperatuur
F2-7 Functioneren slaghoedje		X		X	X			X
F2-6 Ontsteken aanvuur lading		X		X	X			
F2-5 Branden aanvuurlading		X		X	X			
F2-4 Ontsteken voortdrijvende lading		X		X	X			X
F2-3 Branden voortdrijvende lading		X		X	X			X
F2-2 Breken breekranden								
F2-1 Drijven granaat door loop								
F1-14 Ontsteken ontsteeksas vertragsings element		X		X	X			X
F1-13 Branden ontsteeksas vertragsings element		X		X	X			X
F1-12 Ontsteken vertraagsas	X	X		X	X		X	
F1-11 Branden vertraagsas	X	X		X	X		X	
F1-10 Ontsteken uitstootlading		X		X	X			
F1-9 Branden uitstootlading		X		X	X			
F1-8 Drukken lichtelement uit granaat lichaam								
F1-7 Openen parachute								
F1-6 Ontsteken ontsteeksas		X		X	X			
F1-5 Branden ontsteeksas		X		X	X			
F1-4 Ontsteken aanvuursas		X		X	X			X
F1-3 Branden aanvuursas		X		X	X			X
F1-2 Ontsteken lichtsas	X	X		X	X		X	X
F1-1 Branden lichtsas	X	X		X	X		X	X
O-ring boven		X		X	X			X
O-ring beneden		X		X	X			X
Textiel parachute		X		X	X			X

De sassen waarvan de samenstelling niet bekend is zijn weergegeven in rood, evenals de mogelijk bijbehorende condities.

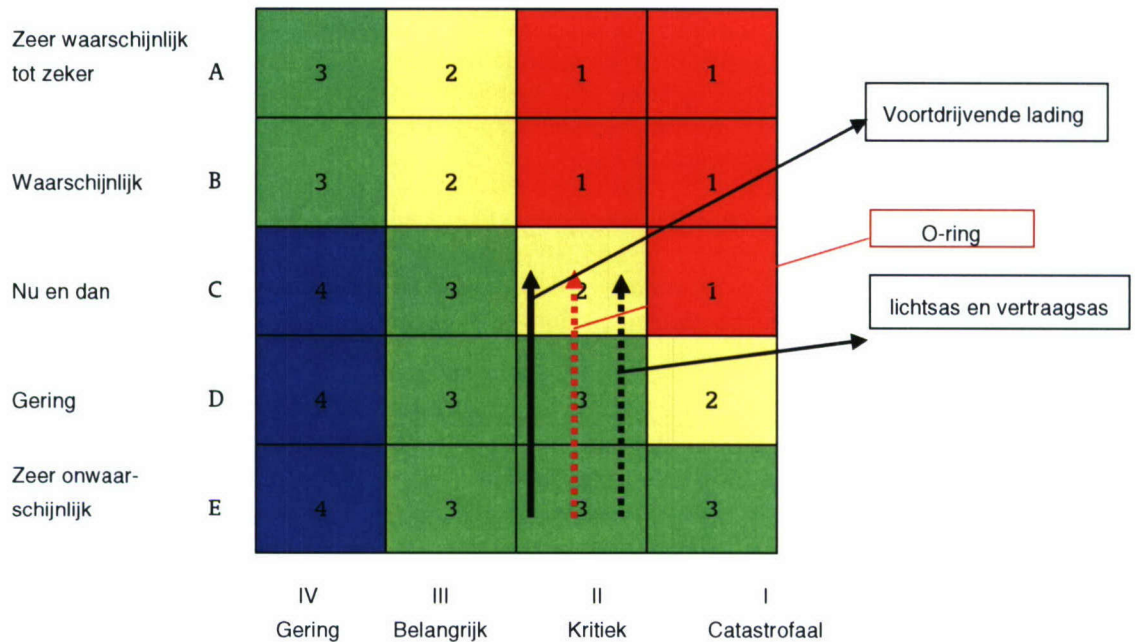
Gebaseerd op bovenstaande zijn de volgende componenten als kritisch naar voren gekomen:

- De voortdrijvende lading (nitrocellulose kruit).
 - Pyrotechnische sassen:
 - vertraagsas (Ba(NO₃)₂, ZB, Al);
 - lichtsas (Mg, NaNO₃, PTFE).
- O-ringen (van onbekend rubber).

De toename van de kans (de 'lengte' van de pijl in de risicomatrix) is voor de O-ringen onbekend. Voor de pyrotechnische composities geldt dat de kans op t = 0 afhangt van het feit of er met het persen karton in het patroon is gekomen en de hoeveelheid vocht in het karton (de kans start bij D of E). De toename van de kans voor de pyrotechniek is afhankelijk van de functionaliteit van de O-ring: als de O-ring faalt neemt de kans op falen van de pyrotechnische composities met '2 vakjes' toe, anders met '1 vakje'.

Met andere woorden: de pyrotechnische composities zijn alleen kritisch als de O-ring faalt³. Grafisch weergegeven in een risicomatrix levert dit het volgende op:

³ Mits het productieproces juist is verlopen.



Figuur 12 Risicomatrix van de 40 mm lichtpatroon.

4.4 Voorgesteld vervolg: componenttesten

Voor het vervolg van het werkpakket is voorgesteld dat de ontsteekdop van het patroon door ABWM zou worden gedemonteerd voor verificatie van de opbouw en de samenstelling en voor het verkrijgen van materiaal voor identificatie van de onbekende composities en componenttesten. Vanwege tijdsgebrek en prioriteitsstelling binnen het project is de demontage niet uitgevoerd.

Voor de componenttesten moeten hele patronen worden verouderd (onder 3 verschillende T/RH-condities) waarna na demontage de volgende componenten kunnen worden onderzocht:

1 Karton

Bepaling van het percentage vocht als t_0 meting. Dit bepaalt het 'startpunt' van de pijlen van pyrotechniek.

Resultaat: hoeveelheid vocht dat composities kan binnendringen uit interne bron.

2 O-ringen

O-ringen zijn ontvangen van Nico Pyrotechniek. Gebaseerd op de grootte van deze ringen wordt aangenomen dat het de bovenste O-ring betreft.

De onderste O-ring van het artikel zorgt alleen voor drukopbouw. Het meten van mechanische eigenschappen levert antwoord op de vraag of het ontsteekmechanisme wel of niet functioneert na 'x' jaar veroudering. Hiervoor is het wel nodig dat een inschatting kan worden gemaakt van de krachten tijdens afvuren.

Bovenste O-ring heeft de functie van vochtafdichting. Meten van de waterdampdoorlatendheid als functie van veroudering geeft een indicatie van de functionaliteit. Er is echter geen norm voor de waterdampdoorlatendheid: wanneer wordt een waarde onacceptabel hoog?

- 1 Voortdrijvende lading
Middels HFC-metingen voor bepaling veilige diameter kan een de resterende levensduur van het kruit bepaald worden. Meting van de calorische waarde als functie van veroudering geeft informatie over de snelheid waarmee het patroon uit de loop komt. Ook hier geldt dat niet bekend is wanneer de calorische waarde onacceptabel laag wordt. Deze vertaalslag moet eenmalig vastgesteld worden.
- 2 Vertraagsas
De invloed van het karton op $t = 0$ kan worden gemeten door het percentage vocht in de compositie op $t = 0$ te bepalen. Dit is in feite een afname-test. Het functioneren van de verouderde sas kan vervolgens worden gemeten in termen van brandtijd en ontstekvertraging als functie van het percentage vocht.
- 3 Lichtsas
Voor de lightsas geldt hetzelfde als voor de vertraagsas: na een afnamekeuring om de invloed van het karton te bepalen (in dit geval: het percentage vocht en schade door persen) is de sas alleen nog kritisch als de O-ring faalt. Voorgesteld wordt om de conversie van magnesium als functie van de veroudering te meten. De vertaalslag naar bij welk percentage het artikel niet meer of niet goed genoeg meer functioneert moet voor deze specifieke compositie eenmalig gemaakt worden, en is afhankelijk van onder andere deeltjesgrootte en deeltjesvorm.

4.5 Advies

Op basis van deze FFA worden de volgende controlepunten geadviseerd, zowel bij aanschaf als periodiek:

- Bij aanschaf:
 - Opvragen gegevens van de onbekende sassen bij de fabrikant (aanvuursas en ontsteeksas).
 - X-ray
 - Controle aanwezigheid van scheuren.
 - Controle bevestiging parachute.
- Periodiek:
 - Middels schietproeven
 - Meting vertraagtijd (veroudering pyrotechnische sas).
 - Meting lichtopbrengst (indicatief voor opname vocht door compositie en dus voor de status van de O-ring).

4.6 Conclusies

Als de levensduur van de O-ring uit het componentenonderzoek volgt, en als de relatie tussen de gemeten waarden en het functioneren in alle gevallen kan worden gelegd, kan gezegd worden dat voor de pyrotechnische sassen de levensduur wordt bepaald door het karton en de O-ring. Voor deze component geldt dat componentenonderzoek PO kan vervangen.

Voor de voortdrijvende lading geldt dat componentenonderzoek de veilige en functionele levensduur levert. Maar componentenonderzoek kan het PO niet vervangen omdat de component niet alleen kritisch is als O-ring faalt. Op basis van de calorische waarde kan wel een inschatting worden gemaakt voor de frequentie van PO.

Vanwege andere prioriteiten binnen het project is besloten geen verouderingstraject op te starten en de beschikbare tijd te gebruiken voor een andere invulling van het project.

4.7 Vergelijk PO zoals uitgevoerd door ABWM en papieren studie TNO

Het PO behelst:

- Visuele inspectie van de verpakking.
- Statische beproeving.
Na demontage worden de componenten visueel geïnspecteerd. Hierbij wordt gelet op controle op scheuren van het lichtelement, aanwezigheid en toestand van de aanvuursas en controle van de uitstootlading. Het lichtelement wordt gecontroleerd door meting van de effectieve en totale brandduur, de maximale en gemiddelde lichtsterkte en de kleur.
- Dynamische beproeving.
Bij 3 temperaturen worden 10 lichtgranaatpatronen verschoten. Hierbij wordt de stijghoogte en de brandduur gemeten.

Bij het PO uit 2003 aan lot 1244-01-001⁴ werden de volgende afwijkingen gevonden:

- Merkwijze en verpakking zijn niet conform de richtlijnen.
- Enkele parachutes waren verkleefd, zonder gevolgen voor het functioneren.
- In twee gevallen was het aanvuursas niet geheel gevuld.
- De lichtelementen voldoen niet aan de minimale brandduur.
- Bij dynamische proeven verliep de verbranding in een aantal gevallen 'spetterend'.
- Twee patronen pasten zwaar in het wapen.
- De gemiddelde lichtsterkte wordt in een aantal gevallen niet gehaald.

In vergelijking:

- Het componentenonderzoek aan karton en O-ringen en de lichtsas wordt voorgesteld met als achtergrond dat scheuren en vocht invloed hebben op de brandtijd, respectievelijk functionaliteit (lichtopbrengst) van de lichtsas. Het voorgestelde onderzoek levert op een andere manier dan schietproeven informatie op over de staat van de lichtsas en de O-ringen. Opvallend is dat bij de visuele inspectie van het PO geen scheuren worden aangetroffen in de hoofdlading, terwijl alle 8 patronen die TNO voor onderzoek had die wel hadden. Wel verliep de verbranding van sommige patronen bij het PO spetterend. Dit zou een indicatie van scheuren kunnen zijn.
- *Vertragingsas*
Aan dit aspect wordt door defensie geen aandacht besteed; het wordt niet gemeten. Omdat het een hygroscopisch sas betreft levert meting van de vertraagtijd informatie op over de invloed van vocht in het artikel.
- *Voortdrijvende lading*
Meting van de calorische waarde van het kruit heeft hetzelfde oogmerk als meting van de stijghoogte.

⁴ *Periodiek Onderzoek Cartridge, 40 millimeter: illuminating, nr 338, F/GL Lichtgranaat patroon nr 338 van 40 mm, voor GW. Lotcode 1244-01-001, PO nummer 6011.07.1019, Documentnr 01891, 29 september 2003.*

- Het feit dat twee patronen zwaar in het wapen passen kan een gevolg zijn van een iets groter patroon (productie), maar het kan ook een gevolg zijn van opzwellling door de reactie van magnesium met vocht.
- Er kan algemeen gesteld worden dat het voorgestelde onderzoek een meer voorspellend karakter heeft dan het PO.

Tabel 22 Vergelijk componentenonderzoek en PO.

Vertaling componentenonderzoek naar onderdeel	PO	TNO
Visuele inspectie	+	+
Brandduur	+	*
Lichtsterkte	+	*
Stijghoogte	+	+
Vertraging	-	+

* TNO stelt voor de lichtopbrengst te meten.

5 Functie en Faalanalyse, KM-artikel: seinrook nr. 21

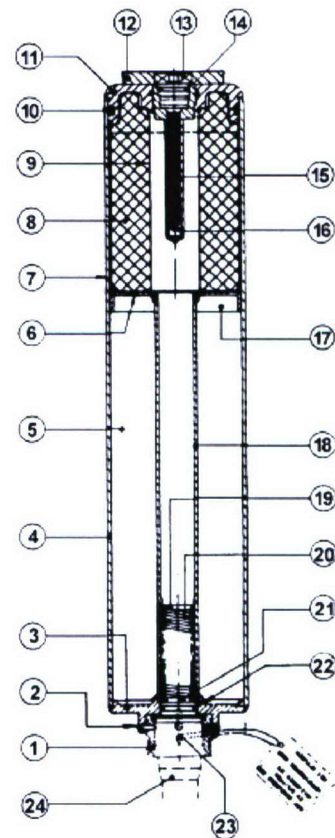
5.1 Inleiding

De hier uitgevoerde functie- en faalanalyse is gebaseerd op de beschrijving van het artikel in het VS-handboek (TH 250-B-02 (Deel 2, Sectie 8)) en de tekeningen aangeleverd door de Koninklijke Marine.

De FFA met als uitkomst de tabellen in dit hoofdstuk is opgesteld als output van een discussie met een groep TNO-medewerkers met een chemische achtergrond en munitiekennis. Daarbij zijn ervaringen en discussies bij Internationale Congressen meegenomen.

Het artikel sein, rook, water, nr. 21 van de KM wordt vanuit een onderwater-lanceerinrichting gelanceerd en dient om de positie van een onderzeeboot aan te geven, of voor het doorgeven van berichten vanuit een onderzeeboot naar de oppervlakte.

- 1 scheurbus
- 2 scheurpen
- 3 deksel
- 4 bovenmantel
- 5 opdrijfkamer
- 6 stoffilter
- 7 ondermantel
- 8 calciumfosfide
- 9 zeef
- 10 O-ring
- 11 bodem
- 12 markeerder
- 13 vierkante stop
- 14 O-ring
- 15 berichtgever
- 16 huis van de berichtgever
- 17 tussenschot
- 18 gasbuis
- 19 steuning
- 20 drukveer
- 21 klep
- 22 O-ring
- 23 veiligheidspen met ring en instructieplaat
- 24 ramkop



Figuur 13 Tekening van seinrook nr. 21.

5.2 Technische gegevens

- | | | |
|---|----------------------------|---|
| a | Gewicht | 2,8 kg |
| b | Lengte | 490 mm |
| c | Diameter | 101,6 mm |
| d | Vulling | Ca ₃ P ₂ , 750 g |
| e | Markeerder | Fluoresceïne LT, Cond. Prod. Resorcinol en ftaalzuur anhydride |
| f | Verpakking | 1 Compleet in een luchtdichte en waterdichte polyethyleen hoes;
2 De markeerders zijn verpakt in een kunststof doos (vijf stuks per doos). |
| g | Gewicht van de markeerder | 60 g |
| h | Gewicht van de kleurstof | 25 g |
| i | Opslaggroep | 1.3L-(WA) |
| j | UN nr. | 0249 |
| k | Groep bewapeningsmaterieel | torpedomaterieel |

5.3 Operationele gegevens

- | | | |
|---|--------------------|----------------|
| a | Max. lanceerdiepte | 600 m |
| b | Stijgtijd 100 m | ± 65 s |
| c | Na Stijgtijd 200 m | ± 95 s |
| d | Brand/rooktijd | minimaal 6 min |
| e | Kleur rook | wit |
| f | Vlamhoogte | 15 - 20 s |
| g | Levensduur | onbeperkt |

5.4 Opbouw van het artikel

Het sein bestaat uit twee aan elkaar gelaste mantels die gescheiden zijn door middel van een tussenschot. In de bovenmantel is een deksel gelast dat zorgt voor de afsluiting van de opdrijfkamer. Inwendig is het deksel voorzien van een cilindrische kamer waarin een scheurbus de klep op zijn plaats houdt met scheurpennen. Tijdens opslag en vervoer is in het deksel een veiligheidspen met een instructieplaat geplaatst. Tussen het deksel en het tussenschot is een gasbuis geplaatst. Op de steuning rust de drukveer die op de klep is geplaatst. Opvallend is dat in de tekeningen van de marine twee tussenschotten te zien zijn, terwijl in het VS-handboek slechts 1 tussenschot weergegeven is.

Het tussenschot nummer 7 van de tekening van de Marine ontbreekt in de tekening uit het VS-handboek. Bij de uitvoering van de FFA is uitgegaan van de juistheid van de tekeningen van de Marine. Om uitsluitel te krijgen kan nader onderzoek worden verricht door middel van röntgen.

Centraal in de bodem van de ondermantel is het huis van de berichtgever geschroefd, afgedicht met een O-ring. In het huis is een stop met de berichtgeverpen geschroefd waaraan het berichtenpapier is gelijmd. Op de vierkanten stop kan de markeerder worden geschroefd. Een zeef van roestvrij staal is gecentreerd en opgesloten door de bodem. Rondom de zeef is het calciumfosfide aangebracht. Tussen het tussenschot en de zeef is een papieren stoffilter geplaatst zodat calciumfosfide niet bij de klep kan komen.

5.5 Werking

De werking van het artikel is hier onder puntsgewijs weergegeven. Bij elke stap in de werking van het artikel (subfunctie) is weergegeven wat de wijze van falen zou kunnen zijn en wat de ernst is indien de subfunctie faalt.

- Afvuren onderwaterseinlanceerinrichting door middel van een ramkop.
 - Kans op falen lijkt nihil.
- Sein wordt uit lanceerinrichting gedreven.
 - Falen: sein blijft steken.
 - Ernst: lanceer-inrichting kan niet meer gebruikt worden, sein kan echter niet reageren door veer waardoor er geen gevaar is voor fosfine vorming.
- Afbreken scheurpennen.
 - Falen: sein blijft steken.
 - Ernst: lanceer-inrichting kan niet meer gebruikt worden, sein kan echter niet reageren door veer waardoor er geen gevaar is voor fosfine vorming.
- Sein draait 180° om lengte-as.
 - Kans op falen lijkt nihil, dit zal alleen kunnen worden voorkomen als het artikel niet goed luchtdicht is.
- Diepte minder dan 25 m onder wateroppervlak: drukveer ontspant.
 - Falen door onjuistheid van veerkracht:
 - De veer ontspant eerder dan 25 meter onder het wateroppervlak. Ernst: mogelijk fosfinegas vlak bij onderzeeër. De vraag is of dit onder water problematisch is.
 - De veer ontspant later dan 25 meter onder het wateroppervlak. Ernst: gas te laat gevormd.
 - De veer ontspant niet. Ernst: geen gas, uiteindelijk geen rook; hulp blijft uit.
- Klep uit gasbuis stoten.
 - Falen: klep wordt niet uitgestoten. Deze wijze van falen zou ten gevolge van het productieproces zijn.
 - Ernst: er kan geen zeewater instromen, er wordt geen gas en dus geen rook gevormd; hulp blijft uit.
- Verbreken stoffilter door instromend zeewater.
 - Kans op falen lijkt nihil; het stoffilter is van papier.
- Vorming fosfine door reactie water + calciumfosfide.
 - Falen: slechte werking door mogelijk verouderd Ca_3P_2 .
 - Ernst: geen goede rook.
- Ontbranding van fosfine aan oppervlak.
- Vorming gekleurde rook + vlam door fosforzuur.
 - Falen: door veroudering slechte kleurvorming (ontleding van de kleurstof).
 - Ernst: geen (goede) rook.

De oorzaken van falen zijn:

- Veroudering van:
 - de pyrotechnische composities: calciumfosfide en de markeerkleurstof.
 - de rubberen ringen.
 - de veroudering van metalen onderdelen van het artikel (corrosie) ten gevolge van vocht wordt als verwaarloosbaar ingeschat: alle onderdelen zijn van aluminium of van een aluminium legering. Corrosie dat bijvoorbeeld zou kunnen leiden tot het falen van de veer is daarom niet als kritisch aangemerkt.

- *Indringing vocht*
 Vocht kan binnendringen ten gevolge van lekke verpakkingszakken, en door permeabiliteit van O-ringen (die kan toenemen ten gevolge van veroudering). Vocht kan daarbij als interne vervuiling voorkomen in het papier dat in het artikel verwerkt is.
 Het gevolg van vocht in het artikel is dat calciumfosfide via fosfine tot fosforzuur reageert. Fosforzuur tast metalen aan, en afhankelijk van het type rubber zou fosforzuur tevens de O-ringen kunnen aantasten.

- *Indringen zuurstof*
 Calciumfosfide reageert met zuurstof tot fosforpentoxide. Deze stof is corrosief en tast metaal aan. Als de zeef die het materiaal op zijn plaats houdt hierdoor wordt aangetast kan de stof door de granaat verspreid worden en andere metalen onderdelen aantasten.

- Afhankelijk van de snelheid waarmee het artikel wordt afgeschoten heerst aan de achterzijde van het artikel onderdruk in de zog. De vraag is of vòòr het artikel om zijn lengteas is gedraaid de onderdruk (afhankelijk van de diepte en de snelheid) zo laag zou kunnen zijn dat de veer ontspant. Niet duidelijk is of de kans hierop aanwezig is. Dit zou moeten worden nagegaan bij de fabrikant.

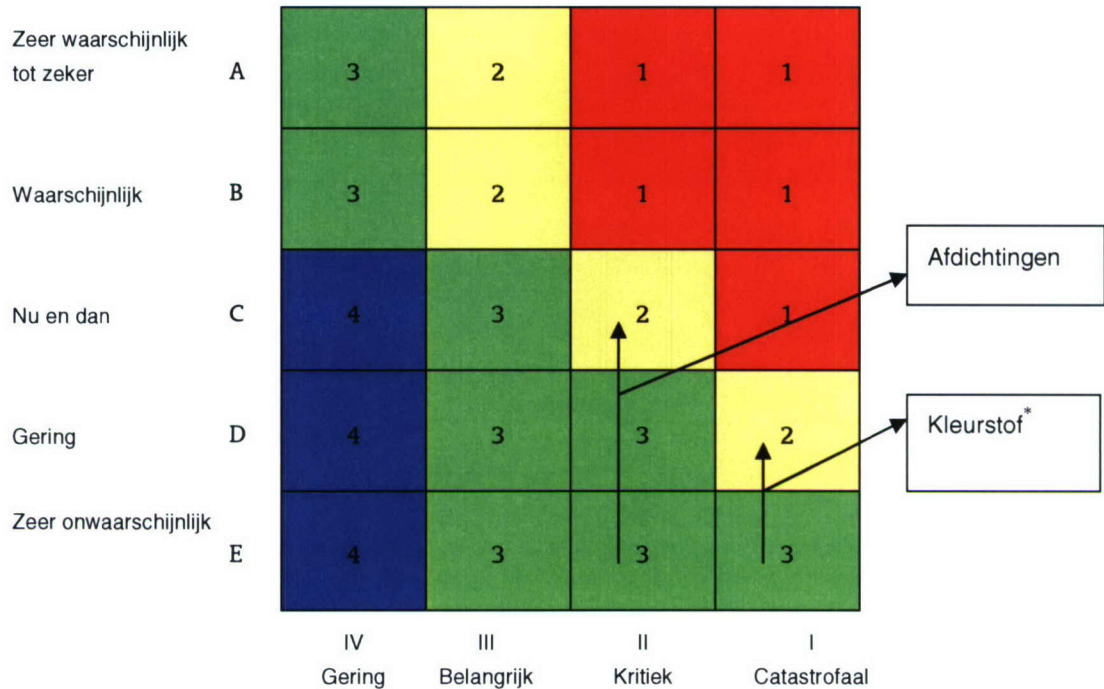
Op basis van bovenstaande analyse zijn de volgende componenten als kritisch aangemerkt:

- *Calciumfosfide*
 In opslag kan fosfine vorming optreden door vocht, en fosforpentoxide onder invloed van zuurstof. Dit levert naast brandgevaar ook een gezondheidsrisico op.

- *Markeerkleurstof*
 De kleurstof kan ontleden onder invloed van fosforzuur en in vochtige lucht. Als de markeerkleurstof cruciaal is voor de zichtbaarheid van de rook (bijvoorbeeld bij bepaalde weersomstandigheden, of 's nachts) is de ernst van niet functioneren catastrofaal. In andere gevallen valt de ernst in de categorie belangrijk.

- *Ring*
 De ringen kunnen poreus worden door oxidatie (veroudering) waardoor vocht kan binnendringen. Een falende ring kan ook van invloed zijn op het functioneren van de klep. De ringen kunnen aangetast worden door agressieve reactieproducten van reactie met zuurstof en vocht (fosforpentoxide en fosforzuur).

Bovenstaande levert de volgende risicomatrix op:



Figuur 14 Risicomatrix van de seinrook nr. 21.

* De ernst is catastrofaal als het functioneren van de kleurstof cruciaal is voor de zichtbaarheid van de rook. Is dit niet het geval verplaatst de pijl naar categorie belangrijk, en is de functie daarmee niet kritisch.

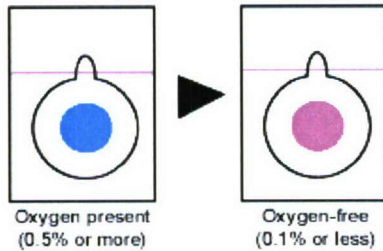
In deze figuur zijn de pijlen weergegeven van de componenten met het hoogste risico. In dit geval zijn dat de afdichtingen (O-ringen) en de kleurstof. De laatste echter alleen in het geval dat het functioneren van de kleurstof cruciaal is voor de zichtbaarheid van de rook.

5.6 Advies

Op basis van deze FFA worden de volgende controlepunten geadviseerd, zowel bij aanschaf als periodiek:

- Bij aanschaf:
 - door middel van een röntgenscan de aanwezigheid van afsluitplaten checken en de spanveer controleren (aantal omwentelingen, juiste spanning, locatie, etc.). Ook kan met een röntgenscan de hoeveelheid calciumfosfide gecontroleerd worden;
 - compatibiliteit van de componenten en de ringen opvragen bij de fabrikant (opnemen in PvE);
 - X-ray voor detectie van constructiefouten.

- Visuele inspectie van (zowel bij aanschaf als periodiek):
 - de zakken, waarbij met name dient te worden gelet op luchtdichtheid en waterdampdichtheid.
 Er bestaan commerciële indicatoren om de aanwezigheid van zuurstof te testen. Figuur 15 is een voorbeeld van een commercieel verkrijgbare indicator. Het is een sticker die eenvoudig in een gesealde zak te plaatsen is⁵.



Figuur 15 Commercieel verkrijgbare zuurstofindicator.

Ook voor vocht zijn eenvoudige indicatoren toe te voegen. Kopersulfaat is een gebruikelijk reagens voor water: bij sporen van water wordt wit kopersulfaat blauw van kleur.

- De breekpennen.
- Corrosieverschijnselen (controle op gebruik juiste materialen).
- Testen van de verwijderbaarheid van de breekpennen.
- Bepaling van de massa. Dit is een indirecte controle van de hoeveelheid calciumfosfide, en dus een controle of calciumfosfide met vocht heeft gereageerd.

⁵ <http://www.mgc-a.com/rpsystem/indicator.html>

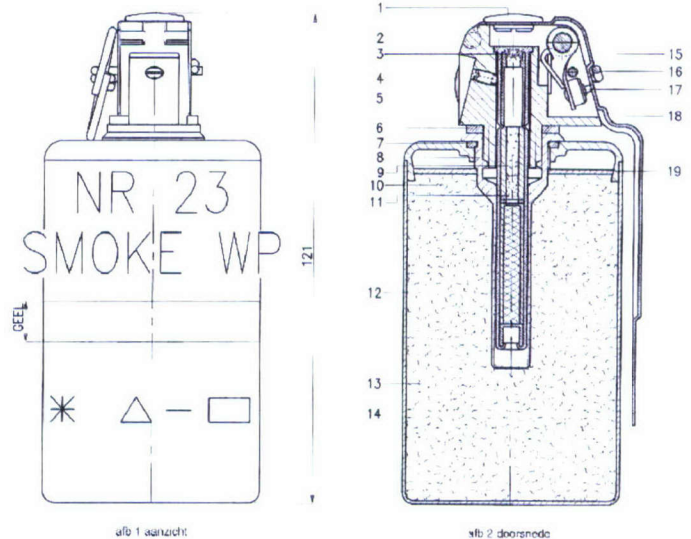
6 Functie en Faalanalyse, KL-artikel: rookhandgranaat fosfor nr. 23 met ontsteker nr 19C3/20

6.1 Inleiding

Het gebruik van de rookhandgranaat fosfor nr 23 berust op de verspreiding van rook en heeft tot doel personeel het zicht te ontnemen.

De FFA met als uitkomst de tabellen in dit hoofdstuk is opgesteld als output van een discussie met een groep TNO-medewerkers met een chemische achtergrond en munitiekennis. Daarbij zijn ervaringen en discussies bij International Congressen meegenomen.

- 1 afdekstop
- 2 vertragingsslagpijpje
- 3 slaghoedje
- 4 borgschroef
- 5 ontstekrichaam
- 6 rubberen ring
- 7 afdichtingsring
- 8 houder
- 9 vertraagsas
- 10 loodzide
- 11 pentriet
- 12 secundaire lading
- 13 fosforlading
- 14 granaatlichaam
- 15 veer
- 16 veiligheidspen
- 17 slagpin
- 18 veiligheidshefboom
- 19 bitumen afdeklaag



Figuur 16 Tekening van de rookhandgranaat nr 23.

6.2 Technische gegevens

Afmetingen

- | | |
|------------------------------|--------|
| • Hoogte (compleet) | 121 mm |
| • Diameter (compleet) | 53 mm |
| • Lengte vertragingspijpje | 75 mm |
| • Diameter vertragingspijpje | 7,5 mm |

Massa

- | | |
|-------------------------------------|-----------|
| • handgranaat compleet | 500 gram |
| • ontstekingsmechanisme | 70 gram |
| • hoofdloading fosfor + bitumenlaag | 265 gram |
| • vertraagsas | 0,5 gram |
| • loodazide | 0,1 gram |
| • pentriet | 0,05 gram |
| • tetryl + 2% grafiet | 1,2 gram |

Overige gegevens

- | | |
|---------------------|---------|
| • - vertragungstijd | 3 - 4 s |
|---------------------|---------|

6.3 Opbouw en werking van het artikel

De rookhandgranaat bestaat uit een lichaam met fosfor waarop een ontstekingsmechanisme is geschroefd. De ontsteker bestaat uit een ontstekingsmechanisme (19C3/20) en vertragungsslagpijpje nr. 20.

Het lichaam van de handgranaat bestaat uit een stalen bus waarop een deksel is vastgelast. In het deksel is de houder van de ontsteker geschroefd.

De werking van het artikel is hier onder puntsgewijs weergegeven. Bij elke stap in de werking van het artikel (subfunctie) is weergegeven wat de wijze van falen zou kunnen zijn en wat de ernst is indien de subfunctie faalt.

- Draaien veiligheidspen
 - Falen: granaat kan niet gebruikt worden.
 - Ernst: afhankelijk van het aantal granaten⁶.
- Uittrekken veiligheidspen
 - Falen: granaat kan niet gebruikt worden.
 - Ernst: afhankelijk van het aantal granaten.
- Werpen handgranaat
 - Falen is alleen denkbaar als de fosforloading gesmolten is en er mogelijk lekkage is van fosfor.

⁶ Nader overleg met Defensie.

- Veiligheidshefboom afgeworpen
 - Falen: blindganger.
 - Ernst: afhankelijk van het aantal granaten.
- Slagpin draait om as
 - Falen: blindganger.
 - Ernst: afhankelijk van het aantal granaten.
- Slagpin slaat in slaghoedje
 - Falen: blindganger.
 - Ernst: afhankelijk van het aantal granaten.
- Ontsteking slaghoedje
 - Falen: blindganger.
 - Ernst: afhankelijk van het aantal granaten.
- Ontsteking en branden vertraagsas
 - Brandt niet: blindganger.
 - Brandt te lang: rookgordijn wordt te laat opgeworpen. Ernst kan kritiek zijn.
 - Brandt te kort: granaat wordt te snel opengereten. De ernst kan catastrofaal zijn als deze tot explosie komt te dicht bij de werper van de granaat.
- Ontsteking en branden primaire lading
 - Falen: blindganger.
 - Ernst: afhankelijk van het aantal granaten.
- Ontsteking en branden secundaire lading
 - Falen blindganger.
 - Ernst: afhankelijk van het aantal granaten.
- Openrijten granaatlichaam
 - Als alle functies normaal functioneren wordt de kans dat het granaatlichaam niet wordt opengereten ingeschat als nihil.
- Verspreiding fosfor
 - Falen: geen goed rookgordijn, geen goede afscherming.
 - Ernst: kan kritiek zijn.
- Leggen wit rookgordijn
 - Falen: geen goed rookgordijn, geen goede afscherming.
 - Ernst: kan kritiek zijn.

6.4 De oorzaken van falen zijn

- Veroudering pyrotechnische composities, cracks in pyrotechnische composities
 - Veroudering slaghoedje.
 - Veroudering vertraagsas.

- Corrosie of beschadiging van de metalen onderdelen
 - Slagpen kan niet draaien en verwijderd worden.
 - Veerdruk van slagpin.
 - Draaien slagpin om as.
 - Corrosie van slaghoedje.

- Luchtdichtheid granaat

Witte fosfor reageert met lucht. De luchtdichtheid wordt bepaald door:

 - O-ring nr. 7.
 - Bitumen laag.

Bitumen is in feite een zeer viskeuze vloeistof. Bij hogere temperaturen kan deze gaan vloeien. Als de hechting van bitumen aan de rand van de granaat loslaat wordt de witte fosfor niet meer afgedekt door de bitumen laag.

- Temperatuur

Witte fosfor smelt bij 44 °C. De dichtheid van vloeibaar fosfor is 5% lager dan de dichtheid van witte fosfor. Op basis van de tekening uit het VS handboek is het volume van de fosforvulling van granaat berekend en het volume van het lege deel boven de bitumenlaag. Dit lege deel is 5% van het volume van de fosforvulling. Als in het productieproces de granaat iets voller wordt gevuld, of als de bitumenlaag iets dikker is dan afgebeeld is het vrije volume niet voldoende om de toename van het volume van gesmolten fosfor op te vangen en kan de granaat bol komen te staan. De O-ring (nr. 7 in de tekening) komt dan onder spanning te staan.

Op basis van bovenstaande analyse zijn de volgende componenten als kritisch aangemerkt:

- *Vertraagsas*

Niet bekend is uit welke compositie de vertraagsas bestaat. Falen van de vertraagsas (te korte brandtijd) is echter catastrofaal.

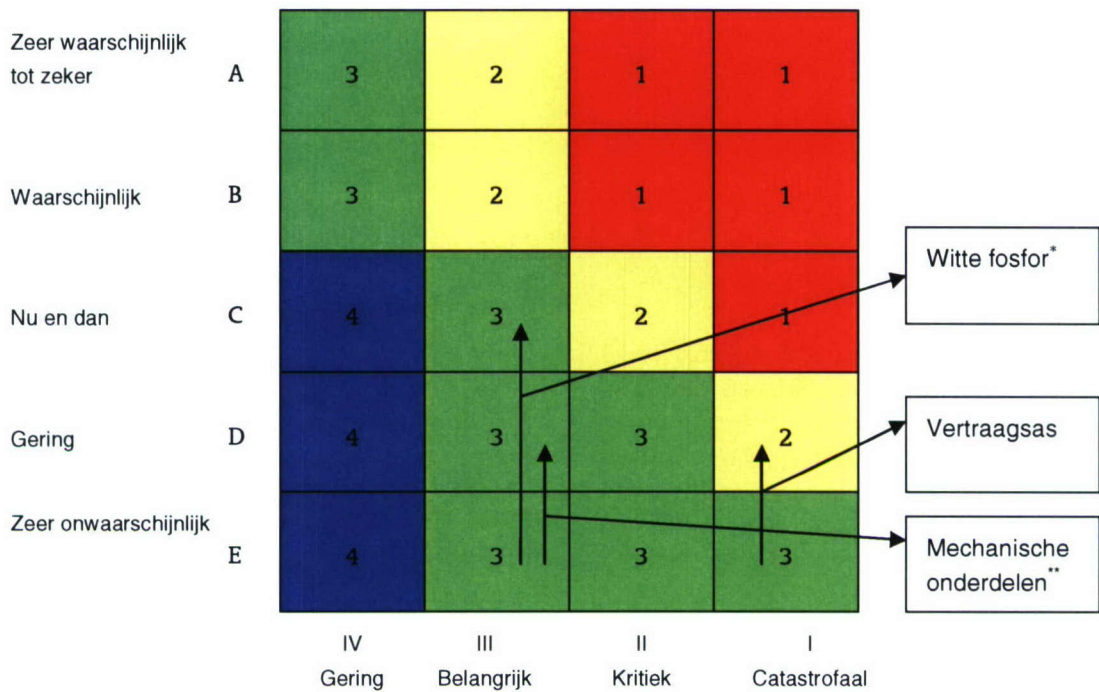
- *Witte fosfor*

Als het vrije volume minder dan 5% van de fosforvulling is, komt de granaat bol te staan bij het smelten van het fosfor. Dit levert een beperking op voor de inzetbaarheid en de inzetgebieden van de granaat.

- *Stalen mechanische onderdelen*

Falen leidt tot blindgangers. Afhankelijk van hoeveel granaten beschikbaar zijn is de ernst hiervan belangrijk of kritiek.

Grafisch weergegeven in de risicomatrix:



Figuur 17 Risicomatrix van de witte fosfor handgranaat.

* De ernst is kritiek als het vrije volume minder dan 5% is.

** De ernst is kritiek afhankelijk van het aantal granaten dat beschikbaar is.

6.5 Advies

Op basis van deze FFA worden de volgende controlepunten geadviseerd, zowel bij aanschaf als periodiek.

- Bij aanschaf:
 - Opvragen gegevens vertraagsas bij de fabrikant, de opgegeven vertraagtijd en de spreiding daarin.
 - X-ray.
 - Controle van de mechanische onderdelen op fabricagefouten.
 - Controle afdichting bitumenlaag.
 - Smeltproef van de granaat.
Visuele inspectie van de granaat na verwarming tot 50 °C. Hierbij dient gelet te worden op tekenen van opbollen.
- Periodiek
 - X-ray om te controleren op scheuren in de pyrotechnische composities, met name de vertraagsas.
 - Functionele testen
 - Effectiviteit van de rook.
Dit zou gestandaardiseerd kunnen worden door te meten in een rookbox.
 - Periodieke controle van de vertraagtijd.
 - Controle corrosieverschijnselen op artikel en verpakking.

6.6 Vergelijk PO zoals uitgevoerd door ABWM en papieren studie TNO

Het PO behelst:

- Visuele inspectie.
- Statische beproevingen.
Het vertragingsslagpijpje wordt gecontroleerd middels een kogelval-toestel. Tevens wordt de grootte van de doorslag van het slagpijpje op een loodplaatje gemeten.
- Functionele beproevingen.
De vertragingstijd van de ontsteker en de rooktijd worden bij 3 temperaturen gemeten.

Bij het PO uit 2005 aan lotcodes 4821-02-001, 4821-02-002, en 4821-02-061⁷ werden de volgende afwijkingen gevonden:

- Bij één lot was er sprake van een geringe overschrijding van de vertragingstijd.
- Omdat het slagpijpje hol is en niet vlak voldeed bij één lot niet aan de eis van de doorslag op een loodplaatje (minimaal 4 mm). Aanbevolen wordt om als eis 'minimaal een doorslag' te stellen.
- In veel gevallen was de rooktijd korter dan 60 seconden. De rooktijd is volgens de norm⁸ gedefinieerd als de tijd van het moment van begin van productie tot het moment dat geen (<10%) rook meer wordt geproduceerd.
Omdat de rooktijd moeilijk te bepalen is en sterk afhankelijk van factoren als wind, is bij het PO als rookduur genomen de tijd van begin van productie tot '*het zicht weer redelijk normaal werd*'. Wel wordt de 60 seconden eis aangehouden.

In vergelijking:

- Omdat de vertraagsas als kritisch wordt aangemerkt, wordt voorgesteld deze periodiek te controleren. Dit is dezelfde aanpak als defensie. TNO stelt wel voor de gegevens (tijd en spreiding) bij aanschaf op te vragen.
- De effectiviteit van het slagpijpje als periodieke proef met het loodplaatje wordt niet voorgesteld, wel worden de mechanische onderdelen door TNO als kritisch aangemerkt en wordt voorgesteld deze bij aanschaf middels X-ray te controleren en te letten op corrosieverschijnselen omdat deze kunnen leiden tot falen van de mechanische onderdelen.
- Rookduur wordt door TNO niet aangemerkt als kritisch. In plaats daarvan wordt voorgesteld de effectiviteit van de rook gestandaardiseerd te meten middels een rookbox.
- Defensie test de granaat tot een temperatuur van 40 °C. Dit is onder de smeltemperatuur van witte fosfor. Uit de papieren studie wordt de toename van het volume van gesmolten witte fosfor en de lage smeltemperatuur van 44 °C als kritisch aangemerkt. In het PO wordt hier geen aandacht aan besteed.

⁷ *Beproeversrapport PO 3 lot's gren hand smk WP, projectnummer 6021.07.1028, documentnr. 01985, 19 maart 2005.*

⁸ *HPO C50.41 versie 1.*

Tabel 23 Vergelijk FFA en PO.

	PO	TNO
Visuele inspectie	+	+
X-ray	-	+
Vertragingsslagpijpje		
Werking	+	+
Vertraagtijd	+	+
Doorslag loodplaatje	+	-
Smeltproef	-	+
Functionele beproevingen.		
Vertragingstijd bij -20 °C, 21 °C en 40 °C.	+	+
Rooktijd bij 3 temp.	+	-
Effectiviteit rook.	-	+

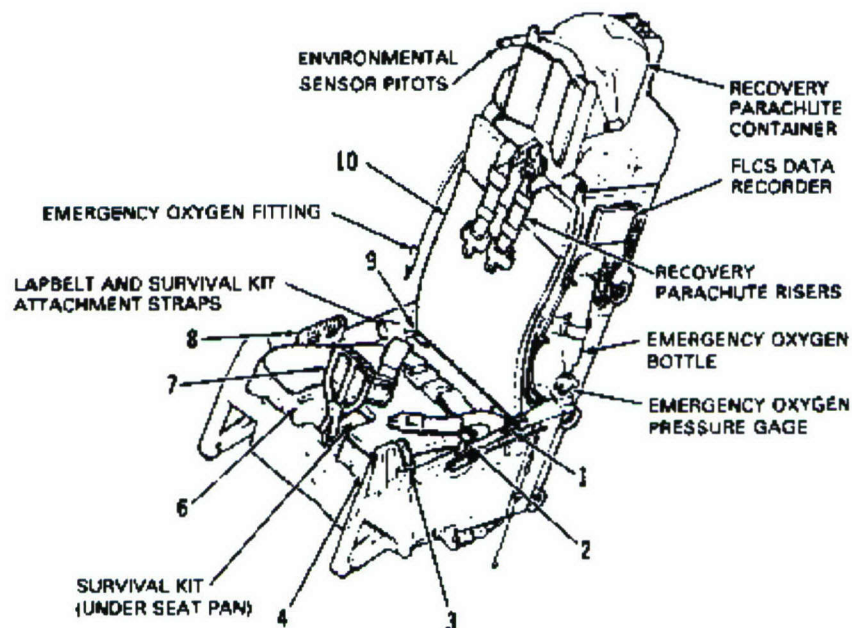
7 FFA aan rocket catapult (KLu-artikel)

7.1 Inleiding

De Rocket Catapult is een belangrijk gedeelte van een groot en complex systeem (schietstoel). Het omvat pyro-technische componenten (onder andere ontsteker, impuls cartridge, rocket motor) die representatief zijn voor verscheidene andere systemen waarbij levensduurverlenging een rol speelt (zie bijvoorbeeld de eerder uitgevoerde FFA (Functie Faal Analyse) van de Sidewinder). Het toepassen van FFA op de Rocket Catapult is dus een methode om verdere ervaring op te doen met kenmerkende componenten en de levensduur specifieke zaken die daar bij horen. Bovendien biedt het de mogelijkheid de FFA-methode verder te verfijnen.

Van de Rocket Catapult is bekend dat de aanvankelijke levensduur van 9 jaar door de fabrikant is teruggebracht naar 4 jaar op basis van resultaten uit een experimenteel surveillanceprogramma. Hiermee is de mogelijk aanwezig de uitkomsten van de binnen dit project uit te voeren FFA te vergelijken met de bevindingen van de fabrikant (validatie).

De Rocket Catapult is een onderdeel van een groter en complexer systeem; de schietstoel. De schietstoel omvat nog verscheidene andere (energetische) componenten die ook geschikt zijn om de FFA methode op toe te passen. Vanwege de grote omvang van het complete systeem is er niet het streven om binnen POEMA-2 hier diep op in te gaan door bijvoorbeeld een FFA van de gehele schietstoel uit te voeren.



Figuur 18 Schietstoel.

7.2 Belangrijke doelstellingen Rocket Catapult

- Verder *ontwikkelen van de FFA*, in combinatie met het opzetten van een database, waarbij aspecten voor de complete levensduurvoorspelling worden meegenomen.
- *Levensduur(verlenging)*: in hoeverre en ten gevolge van welke onderdelen is de maximale levensduur bereikt na de door de fabrikant gegarandeerde periode.

7.3 Uitgevoerde en lopende werkzaamheden (zie tabel 24)

Voor de Rocket Catapult wordt informatie ingezameld om de beschikbare kennis te inventariseren. Hiervoor is een ondermeer een tweetal bezoeken gebracht aan LC-KLu te Woensdrecht. Er wordt onder andere gekeken naar:

- systeemkennis Schietstoel/Rocket Catapult (samenstelling, eisen, spec's etc.);
- Periodiek Onderzoek (opzet PO, voorwaarden, documentatie etc.);
- levensduur zaken (levensduur fabrikant, bekende problemen etc.).

Met deze informatie wordt in eerste instantie een globale functie analyse uitgevoerd voor de gehele schietstoel. Dit om een goed beeld te krijgen van de werking van de schietstoel en de schietstoel procedure met daarin de Rocket Catapult. Hierdoor kan beter worden ingeschat in hoeverre bepaalde componenten/processen van de Rocket Catapult kritisch zullen zijn in het al dan niet functioneren van de gehele schietstoel.

7.4 Vervolg werkzaamheden (zie tabel 24)

Een volgende stap zal het opzetten van de Functie en Faal Analyse voor de Rocket Catapult zijn:

- identificeren van de verschillende functies Rocket Catapult;
- bepalen van de kans op falen en ernst van falen;
- identificeren van levensduur kritische componenten.

Met de uitkomst van de FFA van de Rocket Catapult kan vervolgens een evaluatie worden uitgevoerd of voorstellen worden gedaan voor het periodiek onderzoek. Dekt dit de levensduur kritische componenten voldoende af? Of welke PO is nodig/mogelijk voor de levensduur kritische componenten?

In een latere fase zou eventueel gekeken kunnen worden naar de levensduur-verlenging: Middels (experimenteel) onderzoek kan worden nagegaan in hoeverre het mogelijk is met gericht onderzoek aan te tonen dat de levensduur nog verlengd kan worden of dat het voor het betreffende artikel daadwerkelijk het einde van de levensduur is. Mede gezien de verwachte omvang van dit werk is het mogelijk dat dit niet binnen POEMA-2 gerealiseerd zal kunnen worden.

Tijdens het uitvoeren van de werkzaamheden zullen de resultaten/ervaringen worden gebruikt om de FFA methodiek verder te verfijnen en een database aan te leggen met gegevens die nodig zijn voor levensduur verlenging (continue actie).

Tabel 24 Overzicht werkzaamheden POEMA 2: Rocket Catapult.

Rocket Catapult	
Item	Werkzaamheden
1	Verwerven gegevens Schietstoel/Rocket Catapult
2	Functie Analyse Schietstoel (inclusief Rocket Catapult)
3	Functie en Faal Analyse Rocket Catapult
4	Evaluatie Periodiek Onderzoek
5	Levensduur verlenging
6	Verder ontwikkelen FFA en database

Bij de kostenanalyse van demontage van de rocket catapults in vergelijking met het POEMA-budget is in overleg met defensie dit onderzoeksaspect halverwege 2005 gestaakt.

8 Analyse van ongelukken

8.1 Inleiding

Dit hoofdstuk is een samenvatting van het rapport 'Lessons learned from Conventional Ammunition Explosives Mishap reports', zoals gepresenteerd door NOSSA⁹ in June 2001 [1].

Tijdens de ontwikkeling van de database is ook gesproken met Defensie medewerkers van de verschillende krijgsmachtdelen, om na te gaan met welke middelen wat voor typen ongelukken zijn gebeurd. Het doel was, na te gaan of in de database realistische belastingen ('bron') werden gekoppeld aan het 'artikel'. Daaruit zou bijvoorbeeld kunnen blijken, dat de meeste 'ongelukken' gebeuren tijdens de handling; met de hand of vorkheftruck, waarbij het artikel valt en daardoor onbruikbaar wordt of ontsteekt en daardoor personele en materiële schade veroorzaakt.

De Marine bleek een systeem [4] te hebben voor de registratie van 'ongelukken', waarin onder meer het type wapen, de omschrijving van de storting en de oorzaak/oplossing staat aangegeven.

Andere mogelijke bronnen werden gezocht op internet en bij bevriende naties; zo werd het NOSSA-rapport gevonden en geanalyseerd.

De NOSSA heeft een representatieve verzameling uit rapporten over ongelukken/ongevallen met explosieven en munitie aangelegd ten einde het veiligheidsbewustzijn te verhogen en de geleerde lessen te delen. Dit rapport is samengesteld gebruikmakend van geselecteerde rapporten en informatie aanwezig in de database in het 'Naval Safety Centre' gevestigd in Norfolk. De ongelukken gebeurden in de periode van oktober 1991 tot 31 december 2000.

Dit rapport is verdeeld in secties om het gebruik voor verschillende onderdelen makkelijker te maken. Het is bedoeld als een hulpmiddel bij controles, veiligheidsaudits en gespecialiseerde trainingen.

De opgenomen ongelukken hebben werkelijk plaatsgevonden en nog veel meer. Velen daarvan komen vaker voor. Helaas vinden regelmatig dezelfde fouten plaats en worden de voorschriften niet gevolgd resulterend in ongevallen. Alle informatie is afkomstig van de 'mishap reports' zoals aangeboden.

Zelfvoldaanheid, zorgeloosheid en onvoldoende training moet worden uitgebannen om het opnieuw plaatsvinden van deze en vergelijkbare ongelukken te voorkomen.

De belangrijkste conclusies uit dit rapport (inclusief het NOSSA rapport) zijn de volgende.

- In vredetijd vinden de meeste ongevallen plaats door fouten van het bedienend personeel en door onvoldoende kennis van het gebruikte systeem. Het toezicht houden op potentieel gevaarlijke werkzaamheden is van belang.
- Gezien de branden in de magazijnen, die toegeschreven worden aan ontleding, moet PO (Periodiek Onderhoud) voldoende aandacht krijgen.

⁹ NOSSA staat voor: Naval Ordnance Safety and Security Activity.

- Worden de oorzaken vergeleken met de MSIAC belastingstabel, dan blijkt van de natuurlijke belastingen vooral de ‘Temperatuur’-belasting belangrijk te zijn (opslag) en ook ‘blikseminslag’ wordt eenmaal genoemd.
 - de geïnduceerde omgevingsbelastingen vooral ‘Handling’, ‘Loose cargo Bounce’ (val), ‘Lifting and stacking’ (vorkheftruck) en ‘ESD’;
 - extreme belastingen vooral ‘fuel fire’ en ‘sympatische detonatie’ op te treden, wel echter als secundaire oorzaak.
- Ook in vreedetijd is ESD een belangrijke oorzaak van initiatie. Voldoende voorzorgsmaatregelen om vonkoverslag te voorkomen dienen te worden genomen.
- Bij vallen van enige hoogte blijken m.n. flares (seinmiddelen) gemakkelijk te ontsteken.

8.2 Indeling van het NOSSA rapport - ordening van de ongelukken

8.2.1 Indeling NOSSA

De NOSSA heeft voor de volgende secties gekozen met daarachter het aantal ongelukken in de periode 1991 tot 2000 (de frequentie daarvan).

Tabel 25 NOSSA-indeling.

A.	Klein caliber ontsteking/afvuur	25
B.	Vorkheftruck	32
C	Munitie handling gereedschap	15
D	Gevallen munitie	22
E	Onjuiste etikettering ('marking')	16
F	Productie(s)	13
G	Treintransport	16
H	Onbedoelde detonatie/ontsteking	37
I	Niet vallend onder A tot en met H	14

Al deze aantallen ongelukken zijn op eenzelfde manier gerapporteerd; de rapporten (1 A4-tje) bevatten de volgende info.

Abstract of an Accident	
Type ongeluk	:
Gewonden/doden	:
Aard van het werk	:
Gereedschap/apparaat	:
Omschrijving	:
Directe oorzaak	:
Bijdrage aan de oorzaak	:
Geleerde les(sen)	:

Figuur 19 De Nederlandse Marine heeft een vergelijkbare wijze van rapportage.

Type wapen	:
Munitie type	:
Lot- of serie nr	:
Omschrijving storing	:
Oorzaak/oplossing	:

Figuur 20 Beschrijving van het betreffende wapen.

Van het NOSSA-rapport kunnen van een totaal van 190 ongevallen/ongelukken de volgende aantallen specifiek worden toegewezen aan;

- handling and transport : 85 ongevallen;
- training/gebruik : 25 ongevallen;
- gebrekkig PO : 5 munitie magazijnen verbrand (H-12: sinds 1984).

Bij de meeste ongevallen waren er geen slachtoffers en bleef de schade beperkt. In een beperkt aantal gevallen was(ren) er een dodelijk slachtoffer(s) te betreuen.

8.2.2 *Andere indelingen*

De NOSSA-indeling lijkt vooral te zijn ingegeven vanuit de veiligheid optiek, terwijl het TNO-DenV-onderzoek meer gericht is op de belastingcriteria zoals genoemd in de MIL STD 810-F of de AECTP.

Uit de MIL STD 810-F [2] is de volgende lijst aan belastingen afkomstig. Bij de invoering van een type munitie dient een keuze gemaakt te worden aan welke belastingen dit type munitie zal worden blootgesteld en vervolgens daarop worden getest. Op deze wijze wordt een type classificatie verkregen. Voor andere dan de geteste belastingen dient te worden nagegaan of aanvullende testen noodzakelijk zijn.

Tabel 26 Type belastingen volgens MIL-STD 810-F.

Belasting
lage druk
hoge temperatuur (droog/vochtig)
lage temp. (vriezen)
thermische schok
verontreiniging door vloeistoffen
zonnestraling
regen
vocht
schimmelgroei
zoute mist
zand/stof
explosieve atmosfeer
immersion (in het water komen)
(afvuur) acceleratie
vibraties (door rails)
geluidstrillingen
Schok
pyrotechnische schok (booster separation)
chemicaliën
vibraties door schieten
aerodynamische opwarming
regen/hagel (Icing/freezing rain)
afvuur wapen schok/vibratie
vibro-Acoustisch/temperatuur

Conform de richtlijnen is het wel zo, dat alle geselecteerde testen moeten worden uitgevoerd. Indien echter een al uitgevoerde test een zwaardere belasting inhoudt dan de nog uit te voeren test, kan laatstgenoemde als al gedaan worden beschouwd.

Ook de NATO en MSIAC hebben een indeling [3] gemaakt met een iets ander ordeningsprincipe; is dat bij:

- de MIL-STD vooral de operationele inzet (opslag, vredestijd of missie);
- de MSIAC indeling vooral de aard van de belasting (van natuurlijke oorsprong, geïnduceerd en extreem) waardoor ook de IM (Insensitive Munitions) eisen kunnen worden opgenomen.

Tabel 27 MSIAC-indeling van belastingen.

Environmental Threats					
Natural	Induced				Extreme
	Handling and Transport	Air Carriage	Projection, Launch, Free Flight	EM ⁵ , ESD ⁶ , Nuclear	
Temperature	Vibration	Pressure	Shock Vibration & Acceleration	EM	Sympathetic Reaction
Humidity	Shock	Rapid/Explosive Decompression		ESD	Fuel Fire
Solar Radiation	Lifting & Stacking	Parachute Delivery/Low Level Extraction		Nuclear	Slow Heating
Precipitation	Acceleration	Acoustic Noise			Bullet Attack
Sand & Dust	Shipboard Shock	Safe Function			Freefall
Salt Spray	Handling	Thermal Shock			
Fungus	Loose Cargo Bounce				
Icing	Tiedown				
Low Temperature					
Contamination					
Lightning					

Bedreigingen uit omgeving:

- van natuurlijke oorsprong (temperatuur, vocht ...etc.);
- geïnduceerd;
 - handeling/transport (vibraties, lifting, vallen van losse lading...);
 - luchttransport;
 - lancering, vrije val, afschieten.
- straling – elektromagnetisch, elektrostatisch, nucleaire;
- extreme belasting (detonatie van naastgelegen munitie, brandbelasting...etc.).

8.2.3 *Marine meldingen/storinggegevens*

Gedurende het onderzoek werd van de KM een lijst met storinggegevens [4] verkregen. Deze lijst is geordend naar het systeem waarin de storing is opgetreden.

Tabel 28 KM-storinggegevens.

		Caliber (mm)	Meldingen
Kanon	OTO Melara	76	
	OTO Melara	127	samen 17
	Goalkeeper	30	4
	Oerlikon	20	3
	Fal/Mag	7	4
	Diemaco	5	1
Pyro	marker location	KC - 58	4
	seingranaat rood		1
	valscherp wit		1
	rookgranaat Patria		1
	rook handgranaat		1
Mortier		60	1
verschillende	gebruik verkeerde munitie		2
Totaal			45

De OTO Melara meldingen betreffen vooral problemen met het laadsysteem.

Conclusie;

- gegevens verzamelen is erg nuttig voor analyse van fouten/afwijkingen en storingen;
- gelukkig is geen melding gemaakt van persoonlijke ongelukken;
- geautomatiseerde ladingsystemen zoals in gebruik bij de 76 en 127 mm OTO Melara kanonnen geven soms problemen;
- ook pyrotechnische systemen geven meer aanleiding tot storingen.

8.2.4 NOSSA-ongevallen/ongelukken nader geanalyseerd

Tabel 29 Nadere analyse van ongelukken.

NOSSA sectie	Oorzaken
A – klein kaliber	veelal fouten door personeel - soms door onvoorzichtigheid - onvolledige training
B – vorkhef truck	fouten ook bij spelletjes/training - 'quick draw' veelal fouten personeel ontsteking van missiles vindt niet plaats; wel butsen ..etc in de canisters bij flares treedt bij het op de grond vallen wel vaak ontsteking op, gevolgd door brand en regelmatig ook ontsteking van flares in hetzelfde rack
C – munitie handling	vervoer per auto, helikopter, kraan meestal personele fouten
D – vallen munitie	personele fouten flares ontsteken bij van van 1,5 meter op de grond; overige munitie niet (500 ponds bommen – val van 6 m; geen ontsteking rocket moter – val van 2 m - geen ontsteking 127 mm aandrijfvlading – val van 1,5 m – geen ontsteking
E – onjuist labelen	Personele fouten – er zit niet in wat op erop staat – of andersom
F – productie	2 maal Elektrostatische ontlading – initiatie van ontstekers 2 maal Temperatuur - te hoog – cook-off 2 maal Achterlaten van gereedschap in mixer Persen – braam in gereedschap
G – trein transport	personele fouten
H – onbedoelde initiatie	ondeugdelijk ontwerp verwisselen van 'live' en oefen munitie (2X) telefoonsignaal leidt tot initiatie cook-off (2X)
H-12	5 leger opslagplaatsen – zelfontbranding
H-29	1 Marine opslagplaatsen – zelfontbranding; zeer grote vuurballen
I -	gevonden munitie opnieuw Flares – bij vallen ontstoken!!

Op basis van voorgaande tabel kan het volgende geleerd worden:

- voldoende trainen van personeel;
- nalopen veiligheidsprocedures;
- voldoende veiligheidspersoneel om werkzaamheden te checken en na te gaan of SOP's worden gevolgd;
- geregeld periodiek onderzoek.

De grootste oorzaken van ongevallen zijn:

- vallen levert vooral bij flares ontsteking op; andere munitie is daar minder gevoelig voor, alhoewel de houders beschadigd raken en inspectie van de munitie op toekomstig goed functioneren intensief is;
- periodiek onderzoek aan kruiden en munitie is absoluut nodig – 6 munitie opslagplaatsen zijn vermoedelijk door zelfopwarming tot brand en explosie gekomen;

- opruimen/afvoeren van munitie;
 - verwisselen van live en oefen munitie – bij openbranden volgt explosie
 - demontage niet volgens SOP of ondeugdelijk ontwerp.
- elektrostatische ontlading bij ontstekers;
- hoge temperatuur leidend tot cook-off – bij productie; uitharden (een chemische reactie waarbij warmte vrijkomt).

8.2.5 *Conclusies*

- In vreedetijd vinden de meeste ongevallen plaats door fouten van het bedienend personeel en door onvoldoende kennis van het gebruikte systeem. Het toezicht houden op potentieel gevaarlijke werkzaamheden is van belang.
- Gezien de branden in de magazijnen, die toegeschreven worden aan ontleding, moet PO (Periodiek Onderhoud) voldoende aandacht krijgen.
- Worden de oorzaken vergeleken met de MSIAC-belastingstabel, dan blijkt van de
 - natuurlijke belastingen vooral de ‘Temperatuur’-belasting belangrijk te zijn (opslag) en ook ‘blikseminslag’ wordt eenmaal genoemd;
 - de geïnduceerde omgevingsbelastingen vooral ‘Handling’, ‘Loose cargo Bounce’ (val), ‘Lifting and stacking’ (vorkheftruck) en ‘ESD’;
 - Extreme belastingen ‘fuel fire’ en ‘sympatische detonatie’ op te treden, echter als secundaire oorzaak.
- Geautomatiseerde ladingsystemen zoals in gebruik bij de 76 en 127 mm OTO Melara kanonnen veroorzaken soms problemen.
- De ervaring van de KM is, dat pyrotechnische systemen ook gevoelig zijn voor storingen.
- Ook in vreedetijd is ESD een belangrijke oorzaak van initiatie. Voldoende voorzorgsmaatregelen om vonkoverslag te voorkomen dienen te worden genomen.
- Bij vallen van enige hoogte blijken met name flares (seinmiddelen) gemakkelijk te ontsteken.

8.2.6 *Referenties*

- [1] ‘Lessons learned from Conventional Ammunition Explosives Mishap reports’ NOSSA 01-1 dd June 2001.
- [2] MIL STD 810 –F.
- [3] MSIAC Newsletters.
- [4] *Storingsgegevens POEMA* afkomstig van de KM.

9 Veroudering van elektronica

9.1 Inleiding

De elektronica die gebruikt wordt in munitie artikelen loopt uiteen van enkele componenten zoals een simpele weerstand (figuur 21), tot gecompliceerde schakelingen op printplaten (Printed Circuit Boards, PCB's). Tevens kunnen de elektronische componenten wel of niet 'verpakt' zijn in een beschermende behuizing (figuur 25). Deze behuizing kan weer uiteenlopen van een eenvoudige coating tot een verpakking die bestendig is tegen diverse externe invloeden zoals het volledig gieten van de elektronische component in een epoxyhars of zogenaamd PUR-schuim.



Figuur 21 Weerstanden op een PCB (aangetast door corrosie).



Figuur 22 Een radiation-hardened digital signal processor (DSP).

Als elektronica onder invloed is van hogere temperaturen en luchtvochtigheid zal de veroudering sneller gaan dan onder normale omstandigheden. Er zijn vele negatieve verouderingseffecten die op kunnen treden bij elektronische componenten. Deze negatieve effecten kunnen invloed hebben op de betrouwbaarheid, veiligheid en functionaliteit van munitie artikelen. In deze rapportage wordt ingegaan op de verouderingseffecten en extreme belastingen (temperatuur, vocht en trillingen) op elektronische componenten.

Een overzicht van omgevingsbelasting, belangrijkste gevolgen en typisch bezwijkgedrag uit MIL-HDBK-338B is weergegeven in tabel 30. In deze rapportage zijn een beperkt aantal oorzaken nader bekeken.

Tabel 30 Omgevingsfactoren, gevolgen en bezwijkgedrag.

Omgeving	Belangrijkste gevolgen	Typisch bezwijkgedrag
Hoge temperatuur	Thermische veroudering: <ul style="list-style-type: none"> • oxidatie; • structuur verandering; • ohemische reactie. Verweken, smelten en sublimatie Viscositeits reductie en verdamping Fysische expansie	<ul style="list-style-type: none"> • isolatie falen; verandering; elektrische eigenschappen; • verlies smering; • falen structuur. • toegenomen mechanische spanning; • toegenomen slijtage op bewegende delen.
Lage temperatuur	Toegenomen viscositeit en vast worden IJs vorming Bros worden Fysische inkrimping	Verlies smering verandering elektrische eigenschappen Verlies mechanische sterkte <ul style="list-style-type: none"> • cracks; • falen door breken; • toegenomen slijtage op bewegende delen.
Hoge rel. vochtigheid (100% - regen)	vocht absorptie chemische reactie <ul style="list-style-type: none"> • corrosie; • elektrolyse. 	zwellen, bezwijken container, verlies elektrische sterkte. verlies mechanische sterkte, verlies elektrische eigenschappen, toegenomen geleiding isolatoren.
Lage rel. vochtigheid	Uitdrogen <ul style="list-style-type: none"> • broos worden; • korrelvorming. 	verlies mechanische sterkte verandering elektrische eigenschappen. stofvorming ('dusting') structuur bezwijkt afdichting gepenetreerd functioneringsproblemen
Hoge druk	compressie	bezwijken container explosieve expansie verandering elektrische eigenschappen. verlies mechanische sterkte isolatie
Lage druk	expansie gas-onttrekking gereduceerde diëlektrische sterkte lucht	bezwijken container explosieve expansie verandering elektrische eigenschappen. verlies mechanische sterkte isolatie
Zonnestraling	fysisch chemische reacties verbrossing	oppervlak beschadigingen verandering elektrische eigenschappen verkleuring mat. ozon vorming.
Zand en stof	slijtage door schuren verstopen	toegenomen slijtage beïnvloeding functioneren verandering elektrische eigenschappen.
Zoute mist	chemische reacties corrosie elektrolyse	toegenomen slijtage verlies mechanische sterkte verandering elektrische eigenschappen beïnvloeding functioneren oppervlakveranderingen toegenomen geleiding structuur verzwakt.

Tabel 30 Omgevingsfactoren, gevolgen en bezwijkgedrag (vervolg).

Omgeving	Belangrijkste gevolgen	Typische bezwijkgedrag
hoge-snelheids deeltjes (nucleaire straling)	Opwarming transmutatie en ionisatie	thermische veroudering oxidatie verandering chemisch-fysische en elektrische eigenschappen Vorming gassen en secundaire deeltjes.
Hoge versnelling	mechanische spanningen afwezigheid conventionele koeling.	onderbreken gravitatie afhankelijke functies hoge temp. effecten ernstiger.
Ozon	chemische reacties <ul style="list-style-type: none"> • opp. Aantasting; • scheurvorming; • bros worden; • verstoffing. 	verandering fysische en elektrische eigenschappen.
	gereduceerde elektrische sterkte.	instorten isolatie en vonk-overslag.
zeer snelle decompressie	ernstige mechanische spanning.	breken en cracking structuur stort in
Geïoniseerde gassen	chemische reacties contaminatie gereduceerde elektrische sterkte.	verandering fysische en elektrische eigenschappen instorten isolatie en vonk-overslag
Versnelling Trillen	mechanische spanningen. mechanische spanningen.	bezwijken structuur verlies mechanische sterkte beïnvloeding functioneren toegenomen slijtage
Magnetische velden	vermoeidheid. geïnduceerde magnetisatie.	bezwijken structuur. beïnvloeding functioneren verandering elektrische eigenschappen geïnduceerde opwarming.

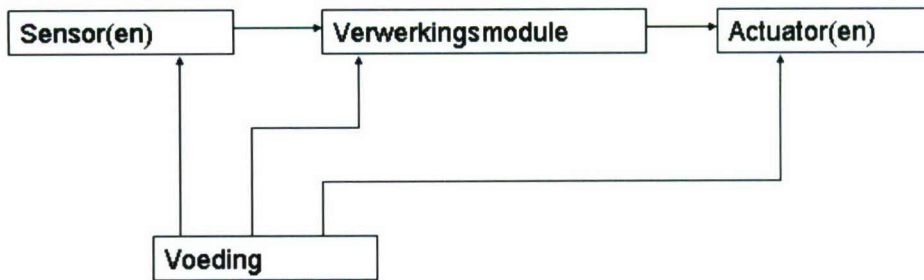
9.2 Elektronische componenten in munitieartikelen

9.2.1 Inleiding

In munitieartikelen kunnen diverse en complexe elektronische componenten verwerkt zijn. In bijvoorbeeld de LAW (de antitank brisantgranaatraket 72A1) is alleen een piëzo elektrisch element, een lekweerstand en een geïsoleerde stroomdraad verwerkt. In buizen en geleide raketten daarentegen is veel elektronica verwerkt. Op de elektronica in buizen en geleide raketten wordt in dit hoofdstuk nader ingegaan.

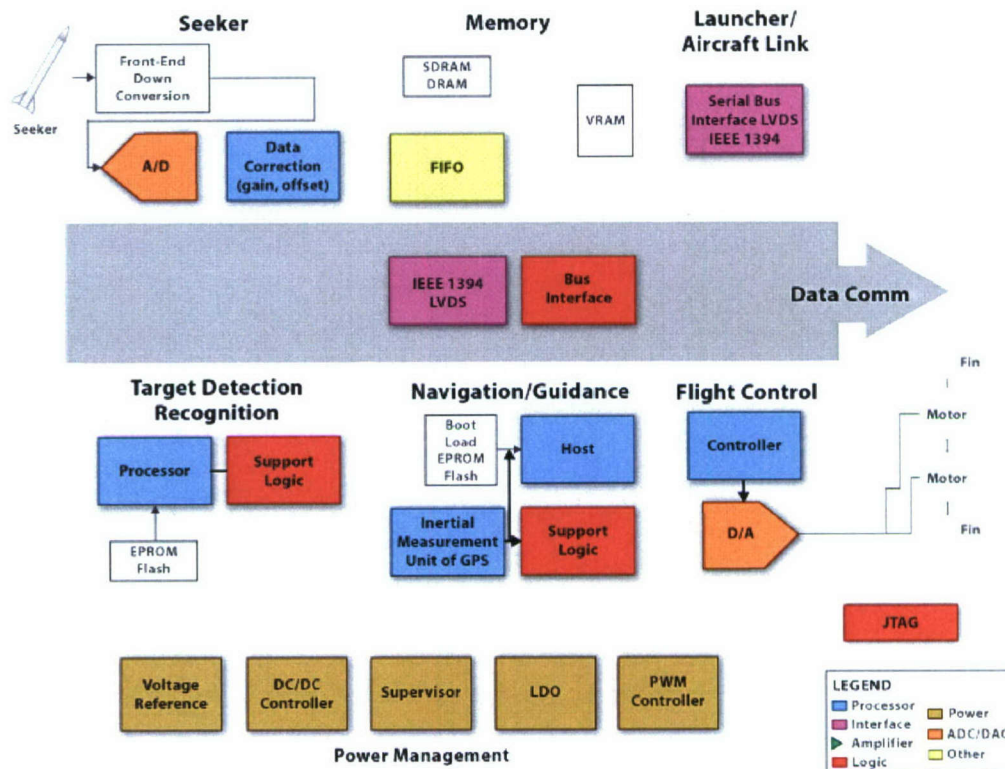
9.2.2 Geleide raketten

In de gecompliceerdere munitie artikelen als geleide raketten is zeer veel elektronica verwerkt; zo zijn de regelsystemen van geleide raketten als de Stinger, de Patriot en de Phoenix missile elektronisch. In figuur 23 is schematisch weergegeven hoe de regelsystemen van geleide missies zijn opgebouwd.



Figuur 23 Algemeen blokschema van regelsysteem in raketten.

In geleide missies bestaan de elektronische modellen uit een combinatie van regelsystemen zoals die in figuur 23, maar er kan ook gedacht worden aan uitbreidingen met meer sensoren en/of actuatoren. Tevens kan de verwerkingsmodule erg uitgebreid zijn, met bijvoorbeeld meerdere digitaal/analooq convertors (DAC's), analooq/digitaal convertors (ADC's) en verschillende geheugenmodule's (figuur 24).



Figuur 24 Schematische weergave van de elektronica in geleide missies (ref: Internet; www.ti.com).

De verschillende componenten van de regelsystemen zijn:

Sensoren:

De sensoren zorgen voor de toelevering van informatie naar het 'brein' (de verwerkingsmodule) van de raket. Voorbeelden van sensoren zijn:

- IR-sensor (infrarood sensor);
- UV-sensor (ultra violet sensor);
- Gyroscop (beweging sensor);
- Antenne (sensor voor radiogolven).

Verwerkingsmodule:

De verwerkingsmodule zorgt voor het verwerken van de informatie die door de sensor wordt aangeleverd. Deze informatie wordt uiteindelijk gebruikt om de actuator aan te sturen. Verwerkingsmodulen zijn er in vele soorten en maten. Van een eenvoudig en goedkope microprocessor tot een zeer uitgebreide DSP (Digital Signal Processor).

Actuatoren:

De laatste stap in het blokschema (figuur 24) zijn de actuatoren. Dit kunnen zijn stuwraketten, of een hydraulisch systeem, die ervoor zorgen dat de koers van de raket kan worden aangepast. Het kan echter ook een installatie zijn dat informatie over de vlucht uitzendt naar een ontvangstpunt zodat er bijvoorbeeld een mogelijkheid is om de baan van de raket te volgen.

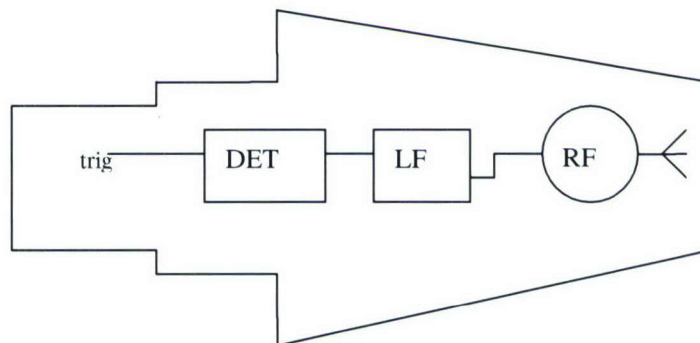
Voeding:

Natuurlijk moeten de elektronische componenten ook een met een bepaalde voedingsspanning worden aangediend. Hiervoor kan een batterij gebruikt worden. In plaats van een batterij worden ook wel verschillende generatoren zoals een luchtstroomgenerator toegepast.

9.2.3

Buizen

Een RF-nabijheidsbuis bestaat uit een RF-zend/ontvanger als actieve sensor, een LF-gedeelte en een detector figuur 25.

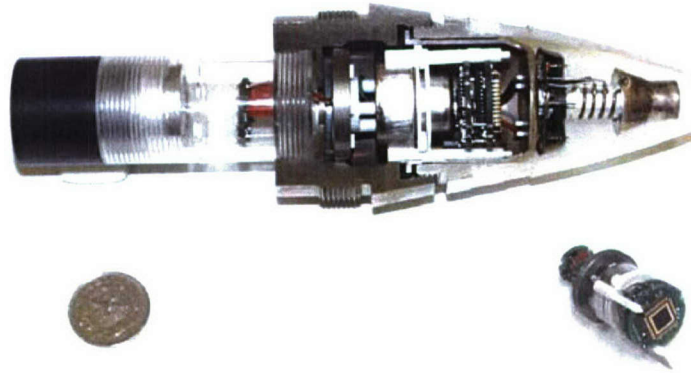


Figuur 25 Schematische weergave van de nabijheidsbuis.

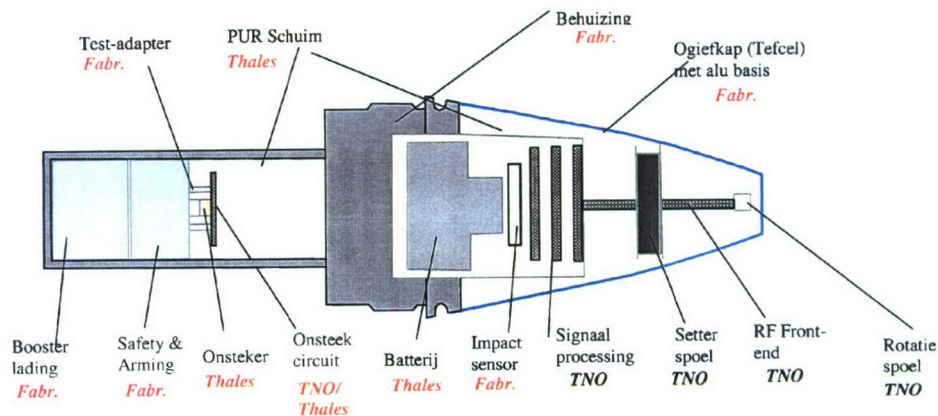
In deze elektronische componenten zijn veel printplaten verwerkt. In dit type buis zijn (minimaal) drie printplaten aanwezig: een printplaat die dienst doet als zender en ontvanger, een printplaat voor contacten en een printplaat voor versterking en tijdinrichting.

Daarbij is er bij buizen veelal sprake van een elektronische ontsteker en een batterij.

In de door TNO en Thales ontwikkelde Medea-buis is daarbij een impact sensor verwerkt en diverse spoelen (figuur 26 & 27). Het geheel is in zogenaamd PUR schuim gegoten. Hierdoor zal de elektronica van het artikel ongevoelig zijn voor invloeden van buitenaf zoals vocht.



Figuur 26 De Medea nabijheidsbuis¹⁰.



Figuur 27 Schematische weergave van de electronica in de Medea nabijheidsbuis¹¹.

Omdat de buis is uitgerust met een test-adapter kan de werking van de elektronica gecontroleerd worden. Het meest gevoelige deel van het artikel is de batterij. De batterij is een passief onderdeel, wat inhoudt dat hij in droge toestand wordt gehouden tot het moment van afvuren. Bij het afvuren breekt de container van de elektrolyt en komt de batterij op spanning. Het kritische aspect hiervan is dat de batterij niet gecontroleerd kan worden in opslag.

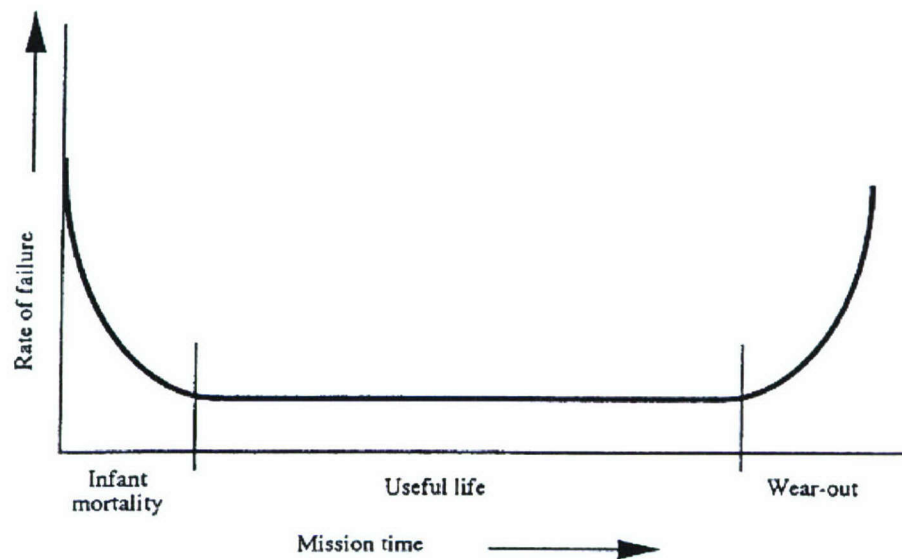
9.3 Veroudering

9.3.1 Belasting - door de natuurlijke omgeving

Het is algemeen bekend [5] dat elektronische componenten verouderen. Deze veroudering treedt op ongeacht of de elektronica wel of niet onder spanning staat. Door het verouderen van elektronische componenten zoals weerstanden, condensatoren en IC's, veranderen de karakteristieken er van. Dit heeft tot gevolg dat de prestaties van het algehele product achteruit kunnen gaan.

¹⁰ http://proceedings.ndia.org/5560/Wednesday/Session_III-A/Heijster.pdf

¹¹ Informatie TNO D&V Locatie Den Haag.



Figuur 28 Bath-tub failure rate.

De betrouwbaarheid van elektronica wordt vaak aangegeven met de 'bath-tub failure curve'. Een voorbeeld hiervan is te vinden in figuur 28. Deze figuur geeft op schematische wijze de levensduur van elektronische componenten weer.

In het eerste deel van de grafiek is een daling te zien. Tijdens deze periode zullen componenten storingen vertonen vanwege de fouten die zijn gemaakt tijdens het productieproces. De fouten die gemaakt zijn in het productieproces kunnen zijn het verkeerd installeren van componenten (verkeerd om plaatsen, de verkeerde component plaatsen), het gebruiken van slechte materialen (onzuiver), het ontstaan van voids tijdens het produceren. De zwakke componenten die geproduceerd zijn zullen hierdoor aan het licht komen.

Na deze kinderziektes is de uitval op een constant niveau. Hoe lang deze tijd is zal afhangen van factoren als de omgeving, materialen en belastingstijd. Als het 'useful life' is verstreken, is er weer een stijging waar te nemen in de uitval van componenten. Dit komt omdat de elektronica dan als het ware 'op' is. Als de component in deze periode/dit gebied komt dan is het niet meer betrouwbaar. En dient het vervangen te worden door een andere component die nog (liefst zo vroeg mogelijk) in de 'useful life' periode zit.

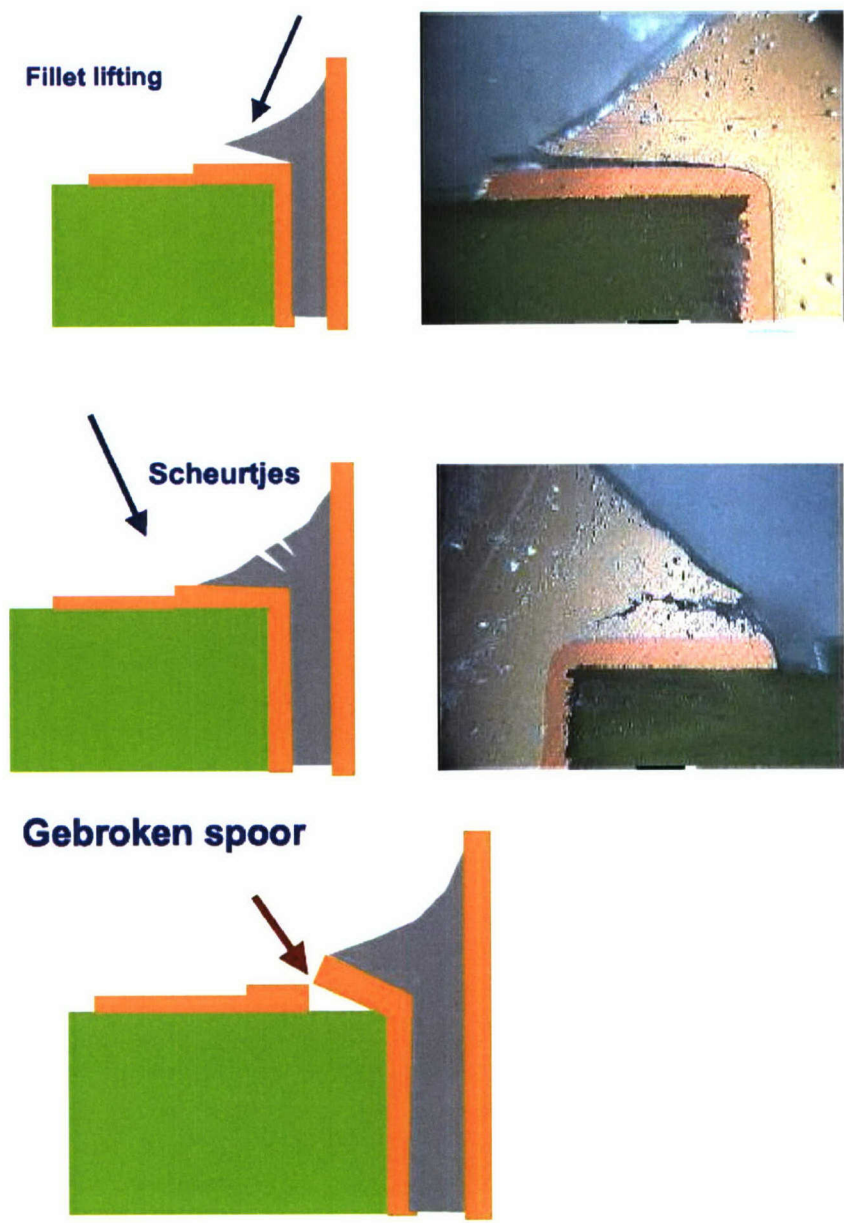
De kunst is dan ook om de component zo te ontwerpen en te produceren dat de 'infant mortality' zo kort en laag mogelijk is. En de 'wear-out' periode zo ver mogelijk uit te stellen. Hierdoor wordt het 'useful life' van de component groter, en is het betrouwbaarder.

Er bestaan passieve en actieve elektronische componenten. Passieve elektronische componenten zijn bijvoorbeeld weerstanden, condensatoren en spoelen. Halfgeleiders worden actieve componenten genoemd. Passieve componenten zijn vaak erg robuust, wat de betrouwbaarheid ten goede komt. Ook zijn de afmetingen zodanig dat deze componenten bij een storing gemakkelijk vervangen kan worden. Passieve elektronische componenten hebben dan ook de langste houdbaarheid van de meeste elektronische componenten.

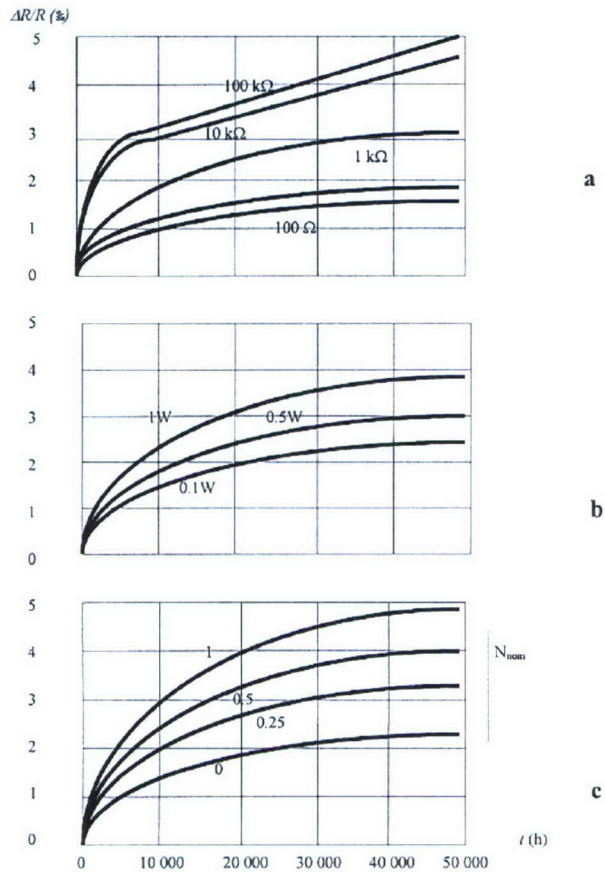
Met het oog op de toekomst, waarin elk component steeds kleiner zal worden, kan de veroudering en gevoeligheid van passieve componenten niet worden onderschat.

Weerstanden kunnen van waarde veranderen. Dit hangt af van heel veel factoren, zoals bijvoorbeeld het gebruikte materiaal en de zuiverheid. De waarde van een weerstand verandert als functie van de tijd. Deze verandering is in het begin van het gebruik het grootst en zal langzaam naar 0 gaan. Alleen weerstanden met grote waarden (ongeveer vanaf 10 kΩ) blijven variëren. Een voorbeeld van wat de veroudering van weerstanden doet met de variatie van de waarde er van is afgebeeld in figuur 30. Deze data hebben betrekking op zogenaamde 'carbon film' weerstanden.

Schade in soldeerverbindingen kunnen op verschillende manieren ontstaan (trillingen, temperatuur, schokken). In figuur 29 is een schematisch overzicht gegeven van welke soorten beschadigingen voor kunnen komen.



Figuur 29 Verschillende typen beschadigingen van soldeerverbindingen



Figuur 30 Variatie van de parameters door veroudering.
 a: als functie van de nominale waarde;
 b: als functie van het vermogen dat de weerstand opneemt;
 c: als functie van de nominale lading.

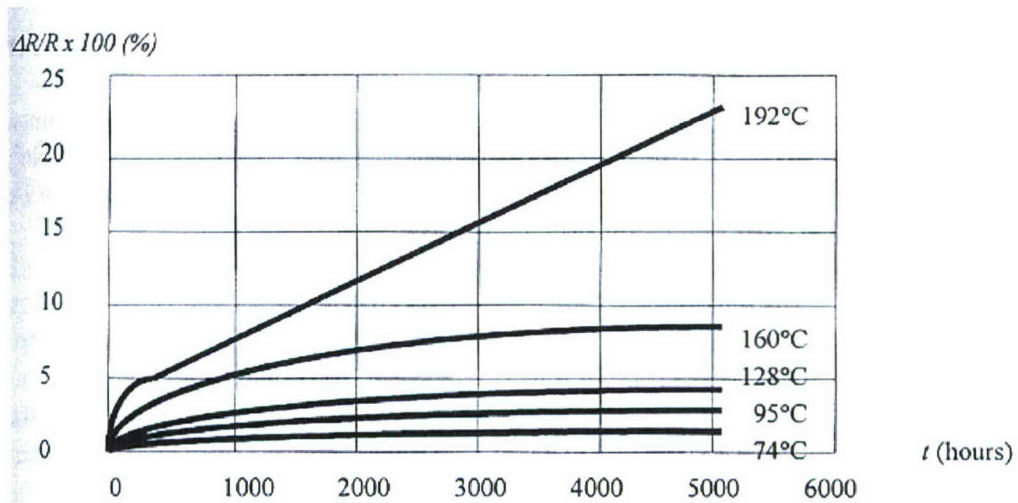
9.3.2 *Temperatuur, hoog en laag*

Passieve componenten hebben een betere tolerantie wat betreft hoge temperaturen dan de complexere halfgeleiders. Een voorbeeld van het gedrag van een 200 k Ω weerstand onder verschillende temperaturen is af te lezen in figuur 31. Alle weerstanden zijn in meerdere of mindere mate gevoelig voor invloeden van temperatuur. Deze eigenschap wordt uitgedrukt in de temperatuurcoëfficiënt TC, uitgedrukt in ppm/ $^{\circ}$ C. Een overzicht van de gevoeligheid van de diverse typen weerstanden voor temperatuur is samengevat in tabel 31.

Een duidelijke kritische waarde is uit figuur 31 niet generiek uit te concluderen, daar dat afhankelijk is van de toepassing van het artikel, en welke faalkans men accepteert.

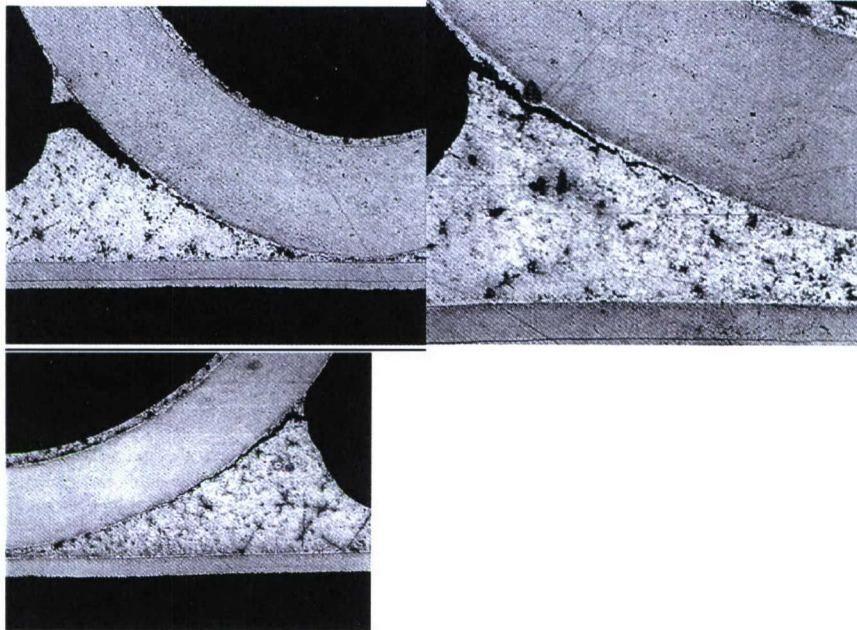
Tabel 31 Type weerstanden en eigenschappen.

Type weerstanden	Waardebereik	TC [ppm/°C]	Kost prijs
Composiet	1-22 M	Hoog	Laag
Metaalfilm	10-1 M	Laag	Matig
Koolfilm	1-1 M	Matig	Matig
Draadgewonden preciesie	0.01-100 K	Laag	Hoog
Draadgewonden vermogen	25-100 K	Matig	Matig
Dunne film	10-1 M	Laag	Matig
Dikke film	20-50 K	Laag	Matig
Gediffundeerd		hoog	Laag

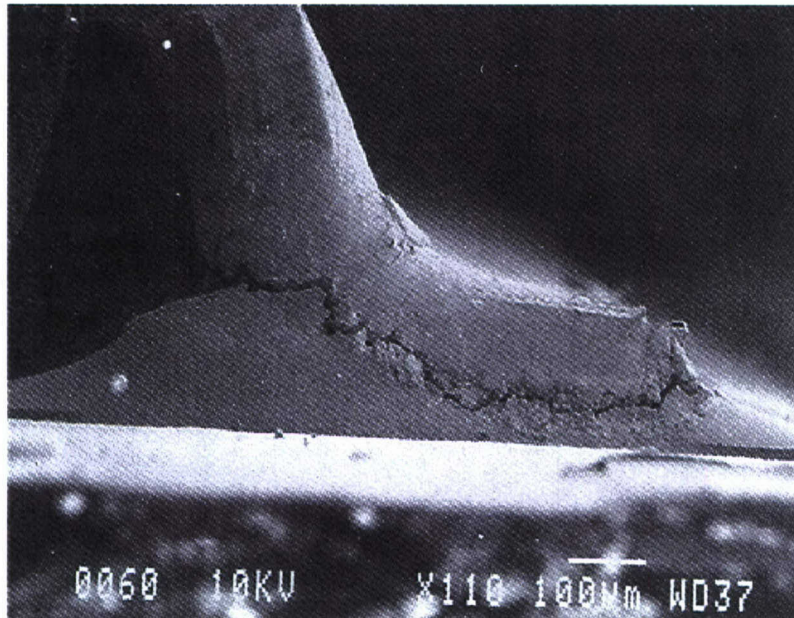


Figuur 31 Het gedrag van een 200 k Ω 'carbon film' weerstand onder verschillende temperaturen wat betreft de tijd.

Verschillende waarden in de TC van materialen kunnen er voor zorgen dat verbindingen van componenten gaan scheuren omdat het ene materiaal meer buigt dan de andere. Dit kan leiden tot situaties zoals weergegeven in figuur 32.



Figuur 32 Cracks ontstaan door verschillende TC's van materialen.



Figuur 33 Cracks in verbindingen.

Het meest gevoelig voor hoge temperaturen zijn componenten die zorgen voor de connecties tussen de schakelingen. Voorbeelden hiervan zijn soldeerverbindingen, kopersporen, via's (verbindingen van de ene kant naar de andere kant van het PCB) etc. Ook complexe componenten die op kleine schaal veel transistoren bevatten zijn erg vatbaar voor hogere en/of snel stijgende temperaturen.

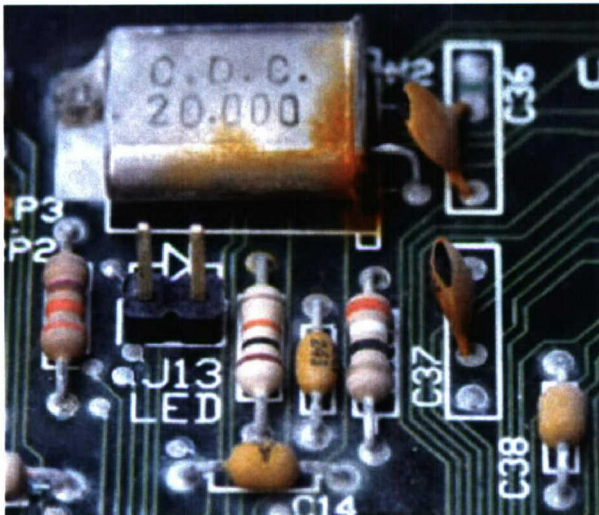
9.3.3 *Vocht, hoog en laag*

De laatste jaren is corrosie in de elektronica-industrie een steeds belangrijker onderwerp geworden vanwege de steeds complexere en compactere systemen. Deze technologische vooruitgang heeft namelijk tot nadeel dat in de componenten een steeds minder grote hoeveelheid corrosie nodig is om storingen te veroorzaken in elektronische schakelingen.

Het corrosiegedrag hangt af van de omgeving waarin de elektronica zich bevindt. Dit kan uiteenlopen van een omgeving met een lage vochtigheid en weinig vervuiling (bijvoorbeeld in een opslagbunker) tot een agressieve omgeving tijdens transport, waar de vochtigheid veel hoger kan liggen en ook veel meer vuil bij de elektronica kan komen.

Er zijn metalen die erg vatbaar zijn voor corrosie in uiteenlopende omgevingsomstandigheden. Zilver krijgt bijvoorbeeld bij zowel een lage als hoge vochtigheid de neiging tot het vormen van zwavelverbindingen op het metaal.

Als de luchtvochtigheid wordt verhoogd dan kan er een vochtlaag ontstaan op het metaaloppervlak, wat weer een versnelde corrosievorming kan opleveren. De tijdsduur die nodig is voor de vorming van een vochtige laag wordt ook wel de 'time of wetness' (TOW) genoemd. De vochtigheid waarbij wetness voorkomt hangt wel af van een aantal factoren zoals het materiaal, de oppervlakte textuur en de temperatuur.



Figuur 34 Corrosie ten gevolge van vocht.

9.3.4 *Belasting - geïnduceerd*

9.3.4.1 *Trillingen, akoestisch en mechanisch*

Onderdelen die het meest onder het effect van trillingen zullen lijden zijn de connectoren, de soldeerverbindingen en de sporen op PCB's. Niet omdat de componenten zelf erg robuust zijn, maar vanwege de omvang van de onderdelen die zorgen voor connecties en het bij elkaar houden van de componenten.

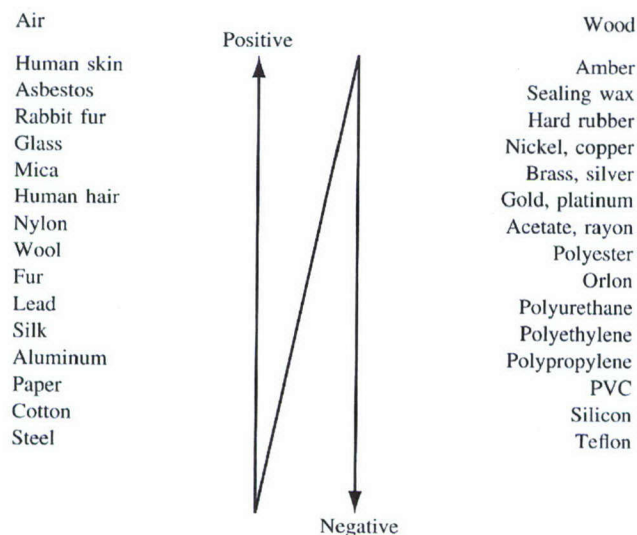
De positie van de componenten heeft veel invloed. Er kunnen beter geen grote componenten (zoals grote IC's) in het midden van een PCB geplaatst worden omdat de buigbaarheid van een PCB groter is in het midden dan aan de zijkanten. Als de componenten deze buigbaarheid niet kunnen weerstaan, kan het op een gegeven

moment zo zijn dat bepaalde connecties lostrillen. Dit kan voorkomen worden door de kleinere componenten in het midden te plaatsen en de grotere componenten aan de zijkanten van de PCB's. Vaak is er echter geen keuze in het ontwerp omdat grote componenten ook veel ingangen en uitgangen hebben. Om deze connecties allemaal te kunnen verbinden met andere kleinere componenten zal de grootste component vaak toch op een centraal punt geplaatst moeten worden.

9.3.4.2 Electrostatisch - Electrical Overstress

Onder Electrostatic Discharge (ESD) wordt verstaan dat door middel van een statische lading, elektronica onder een (hoge) spanning kan komen te staan voor een korte duur. Met een korte duur wordt bedoeld minder dan 1 microseconde. De statische elektriciteit kan oplopen tot wel 20 kV. Overigens kunnen deze spanningen heel erg hoog zijn, de stroom is altijd heel erg laag (in de buurt van nano-ampères). Er zijn twee bronnen die storingen kunnen veroorzaken. De opgeslagen lading van een lichaam kan zich ontladen via een component. Maar ook kan de verpakking van de component een statische lading bevatten die zich ontladt via de component zelf.

Statische elektriciteit kan opgewekt worden door beweging of wrijving van twee objecten tegen elkaar aan. Deze objecten kunnen van de meest uiteenlopende materialen gemaakt zijn. Van mensenhuid tot polyester. De grootte van de opgewekte statische elektriciteit hangt af van de posities die de twee materialen in nemen in figuur 35. Hoe verder de materialen uit elkaar staan in de tabel, des te groter de opgewekte spanning kan zijn.

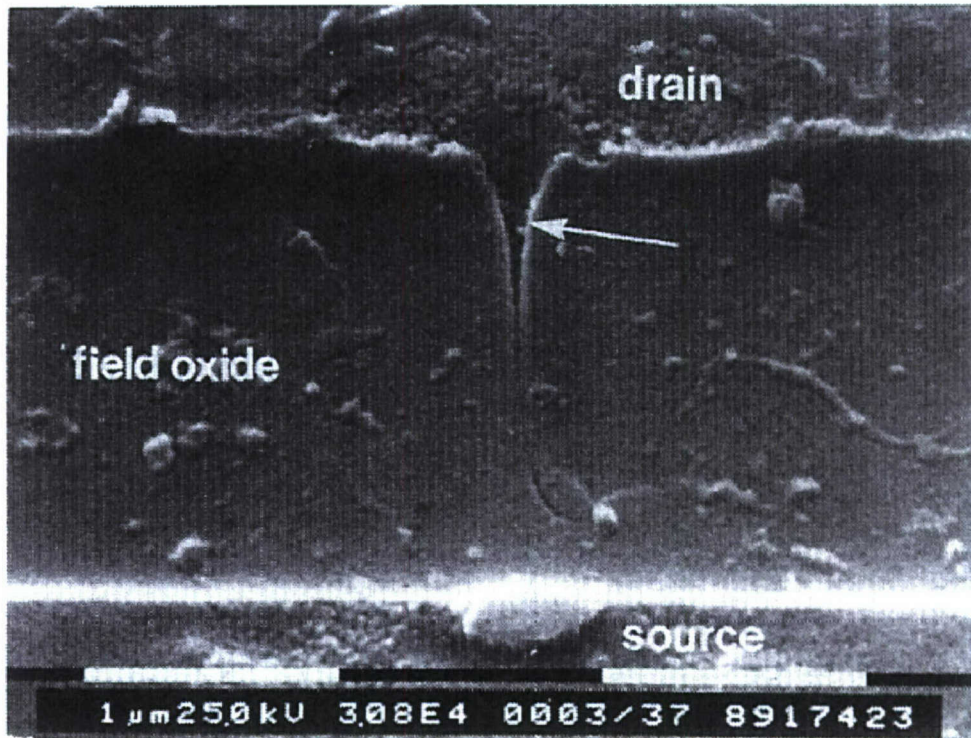


Figuur 35 Vermogen tot opbouw van statische spanning van verschillende stoffen.

Verdere invloeden op ESD zijn de vorm van contact (hoe dichter des te meer kans), en de vochtigheid. Als een materiaal veel vocht kan opnemen is er minder kans op hoge spanningen veroorzaakt door ESD. Dit komt omdat een hoge vochtigheid er voor zorgt dat het oppervlak gedeeltelijk geleidend wordt.

Het probleem bij ESD is dat het in heel veel verschillende situaties kan optreden. Het verschijnsel kan bij het inspecteren, fabriceren, opslaan, vervoeren, repareren en tijdens gebruik van het component optreden. Halfgeleiders zijn zeer gevoelig voor ESD. ESD kan ook schadelijk zijn voor passieve componenten zoals weerstanden en

condensatoren maar door de grotere afmetingen ten opzichte van halfgeleiders zijn deze hier minder gevoelig voor.



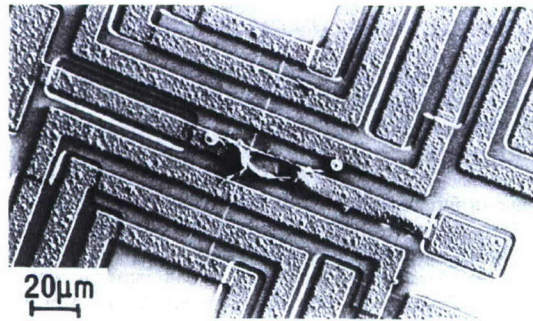
Figuur 36 Voorbeeld van ESD schade in een n-MOS transistor.

Het voorkomen van schade door middel van ESD (figuur 36) kan door het zo klein mogelijk houden van de opgeladen spanning. Dit kan gedaan worden door materialen te kiezen die in figuur 35 niet te ver uit elkaar liggen. Tevens kan de component, persoon etc. ontladen worden. De statische lading kan worden geneutraliseerd door statisch geladen geïoniseerde lucht over het component te blazen (deze lucht bevat negatief of positief geladen ionen). Natuurlijk kan ook beschermd worden tegen ESD middels het opslaan van componenten in 'electromagnetic interference' beschermende zakken.

9.4 Overigen (meerdere oorzaken of belastingen)

9.4.1 Te hoge elektrische spanning

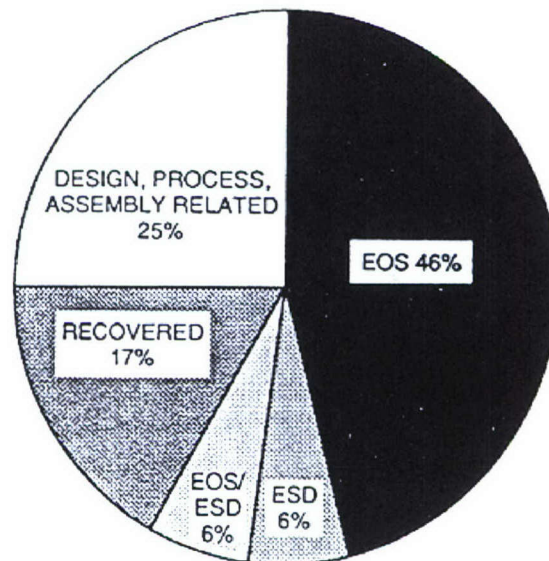
Het overbelasten van elektronische componenten voor een bepaalde tijd noemt men electrical overstress (EOS). EOS kan optreden tijdens het reguliere gebruik van een component. Deze overspanningen kunnen worden veroorzaakt door zaken als het overschakelen van voedingen, veranderingen in de voedingsspanning, het schakelen van relais. Maar ook het verkeerd aansluiten van een component kan de oorzaak zijn van schade doormiddel van EOS. Een voorbeeld van EOS is te zien in figuur 37.



Figuur 37 EOS in een 16K D-RAM geheugenchip.

EOS kan dus voorkomen worden door componenten niet te overbelasten. Er moet tijdens het ontwerpen goed rekening worden gehouden met de datasheets van de componenten. Hier dient op aangegeven te zijn wat de eisen zijn van de desbetreffende component. Maximale inputspanning, maximale voedingsspanning en maximale stromen die een component kan hebben zijn zaken waar rekening mee gehouden dient te worden tijdens het ontwerpen van elektronica. Deze parameters worden de Absolute Maximum Ratings genoemd (AMR).

Het falen van een actieve component als een diode of een chip wordt in 46% van de gevallen veroorzaakt door EOS figuur 38.

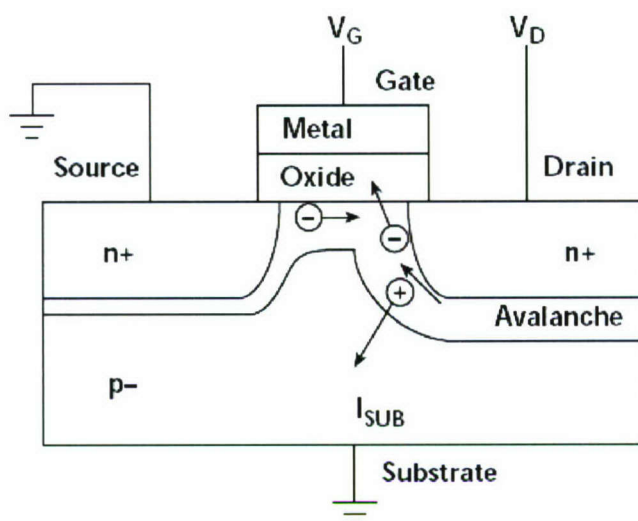


Figuur 38 Oorzaken van falen van een actieve component.

9.4.2 HCID

Een System on Chip (SoC) is een geheel systeem dat zich bevindt op één enkele chip. Het bevat dus meer dan alleen een processor, namelijk een geheugen en verschillende ADC/DAC's. De precieze opbouw van een SoC zal afhangen van het doel dat het zal gaan vervullen in de praktijk. De grootste oorzaak van het verouderen van SoC's is het verslechteren van de individuele submicron transistoren. Dit gedrag staat bekend als Hot Carrier Induced Degradation (HCID). Een transistor geleidt als er carriers worden

verzonden van de ene kant van de transistor (de source) naar de andere kant (de drain). De kracht die deze elektronen voortdrijft wordt het elektrische veld genoemd (veroorzaakt door potentiaal verschillen tussen de verschillende metalen/legeringen). In very-deep-submicron (VDSM) transistoren worden deze elektrische velden steeds groter gemaakt zodat de carriers sneller worden verzonden wat dus een verhoogde snelheid van het gehele elektronische component met zich meebrengt. Maar deze snelheid heeft ook weer een nadeel. Door de hoge versnelling van de carriers, is er ook een hogere kinetische energie bij aankomst bij de drain. Als de kinetische energie van de carrier hoog genoeg is ioniseren ze bij aankomst de nabijgelegen silicium atomen. Dit wordt ook wel impact ionisation genoemd, ofwel het Drain Avalanche Hot Carrier Effect (DAHCE, figuur 39). Dit resulteert in het splitsen van atomen waardoor er nieuwe carriers (electron-hole pairs) worden gevormd. Hoe langer er spanning op de transistor staat, hoe meer nieuwe carriers er aangemaakt worden.



Figuur 39 Schematische weergave van DAHCE.

Het DAHC effect kan dan tot gevolg hebben dat bij p-MOS-transistoren (MOS-transistoren zijn de meest gangbare transistoren) deze nieuwe carriers zoveel energie verkrijgen waardoor de Si-SiO₂-barrière wordt doorbroken, en deze gevangen worden in de gate-oxide. Deze gevangen ladingen leiden dan tot de algehele verslechtering van de transistor.

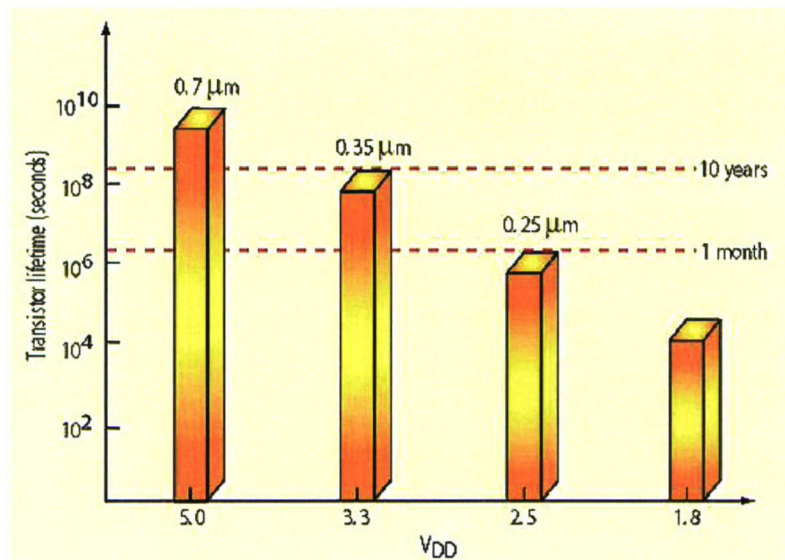
Bij MOS-transistoren van het n-type gaat het verslechteren net op een andere manier. In deze type transistoren zorgen de elektronen voor schade in het gebied tussen de gate-oxide en het Si-oppervlak. In dit gebied komen dan zogenoemde 'states' te zitten, wat er voor zorgt dat de n-MOS transistor een hogere drempelspanning krijgt. Hierdoor produceren ze minder stroom waardoor er langzamere schakelsnelheden zullen ontstaan.

De afgelopen 15 jaar is de levensduur van de nieuwst ontwikkelde transistoren snel gedaald van ongeveer 10 jaar naar een paar maanden. Het gaat hier om daadwerkelijke levensduur ten gevolge van degradatie, en geen economische levensduur¹².

Het verslechteren van deze componenten zal dan ook alleen maar erger worden als er steeds kleinere en snellere transistoren gebruikt gaan worden. Het verlagen van de spanning over de transistoren is ook geen oplossing zoals te zien is in figuur 40.

¹² Circuit Aging: A New Phenomenon For SoC Designs (juli 2000), <http://www.elecdesign.com>

Uit deze afbeelding blijkt dat het aanbieden van een lagere spanning over een transistor van een kleiner formaat, het verouderingsproces niet tegenhoudt. De levensduur zal nog steeds korter worden.



Figuur 40 Een verlaagde spanning over de transistoren zal geen oplossing zijn voor de steeds kortere levensduur die de componenten krijgen vanwege het verkleinen van de afmetingen van de transistoren.

Transistoren bevinden zich in alle delen van SoC's; zowel ADC's, DAC's, geheugen als het digitale gedeelte zal onder invloed staan van de veroudering. Nu verouderen bepaalde onderdelen van de SoC sneller omdat deze meer onder spanning staan dan andere gedeeltes. Zo staat bijvoorbeeld een analoog circuit (van het ADC) altijd onder spanning, ook als het geen functie vervult.

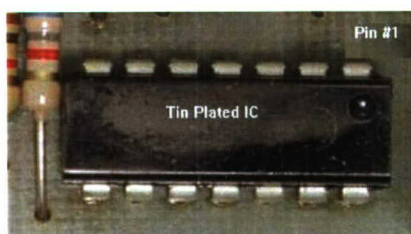
HCID komt men tegen bij zowel de n-MOS als de p-MOS-transistoren en het zal invloed hebben op alle eigenschappen van de transistor. De mate van de verslechtering over de tijd hangt af van de afmetingen van de transistor en voor welk doeleinde de transistor gebruikt wordt. Als er geen spanning op de transistor staat zal het effect ook niet kunnen optreden. Hierdoor zal bij de meeste elektronische componenten in munitie artikelen de hier besproken manier van veroudering dan ook niet snel optreden.

9.4.3 *Bezwijken diëlectrische laag (gate oxide breakdown)*

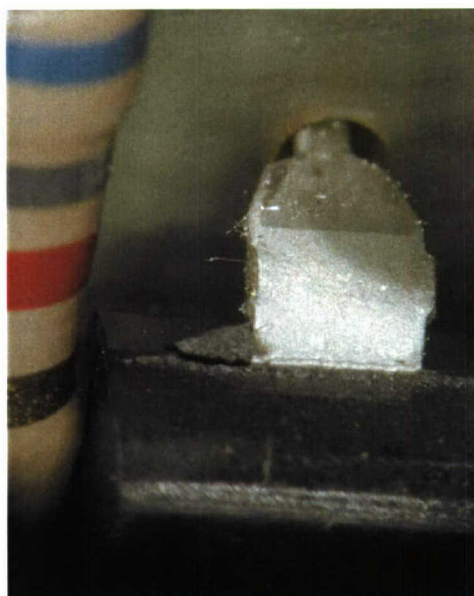
De gate in MOS transistoren is geïsoleerd met een dunne laag oxide. Gate oxide breakdown is simpelweg de destructie van deze (diëlectrische) laag. Gate oxide breakdown kan leiden tot kortsluiting of lekkage van stroom in de transistor. De oorzaken van gate oxide breakdown zijn productiefouten (defecten of onzuiverheden in de oxidelaag), en EOS of ESD.

9.4.4 *Tin whiskers*

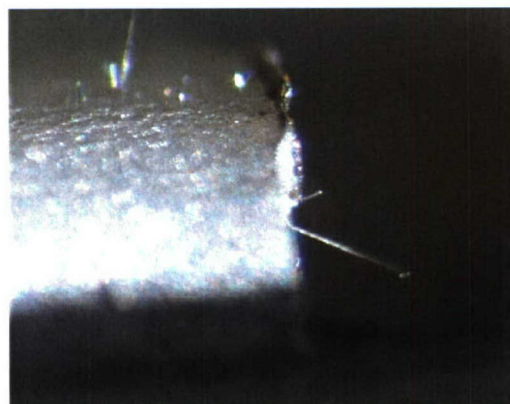
Tin whiskers zijn elektrisch geleidende uitstulpingen van gekristalliseerd tin aan het oppervlak van de tinafwerking. Vanwege storingen die tin whiskers in circuits kunnen veroorzaken, vormen ze een serieuze bedreiging voor de betrouwbaarheid van elektronische componenten. In de figuren hieronder staat een duidelijk voorbeeld van het verschijnsel.



(a)



(b)



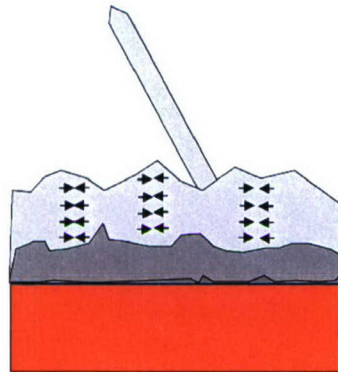
(c)

Figuur 41 a t/c Een IC met tin whisker groei.
 a: het gehele IC
 b en c: Ingezoomd op connector van het IC.

Kleinere afmetingen en een grotere dichtheid van elektronische componenten in schakelingen hebben tot gevolg, in combinatie met whiskergroei, dat er sneller storingen veroorzaakt worden door de groei van tin whiskers; de whiskers hebben namelijk een steeds kleinere lengte nodig om het circuit negatief beïnvloeden. Ook door de opkomst van loodvrij solderen zal er steeds meer gelet moeten worden op de groei van tin whiskers. Whiskergroei werd eerst onderdrukt door de toevoeging van

lood in de legeringen. Maar vanwege het verbod op loodhoudende materialen in elektronische componenten dat vanaf 1 juli 2006 (in Europa) in werking gesteld wordt zal whiskergroei vaker voorkomen.

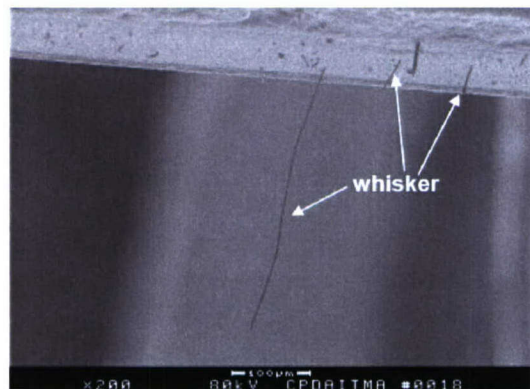
Een exacte verklaring voor de groei van tin whiskers is er nog niet. Hier wordt nog uitvoerig onderzoek naar gedaan. Wel is bekend dat de oorzaak te maken heeft met inwendige spanningen van het materiaal. Deze spanningen uiten zich dan in het vormen van een whisker figuur 42.



Figuur 42 Schematische tekening whiskergroei (pijltjes staan voor interne spanningen in het tin).

Wat ook bekend is, is dat er factoren zijn die invloed hebben op de interne spanningen van het materiaal. Dit zijn factoren als:

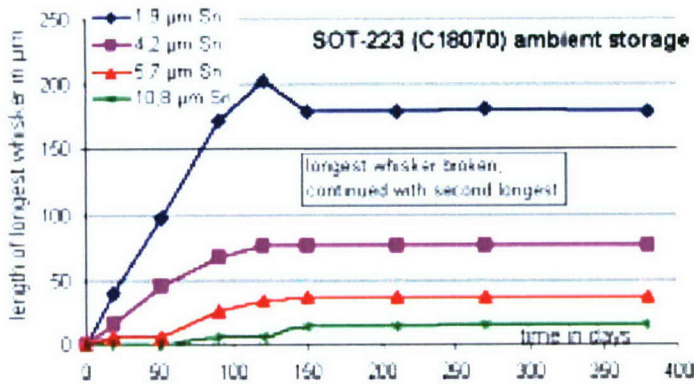
- dikte van de tinlaag;
- ontstaan van ‘intermetallic compound’ tussen de metaal lagen;
- omgevingsfactoren (temperatuur en vochtigheid);
- koolstof inhoud;
- verschil in temperatuurcoëfficiënt.



Figuur 43 Groei van een whisker na 1 jaar opslag onder ongecontroleerde omstandigheden (Ref: M. Dittes, P. Oberdorff, The whisker formation – Results, Test methods and countermeasures).

De vorming van whiskers wordt veroorzaakt door de interne spanningen in de tinlaag. Deze spanningen worden minder als de tinlaag dikker wordt. De interne spanningen die worden opgewekt door het contactvlak (‘interface’) tussen de metaal en tinlaag, worden namelijk over een grotere inhoud verdeeld.

De invloed van de dikte van de tinlaag op whiskergroei is weergegeven in figuur 44.

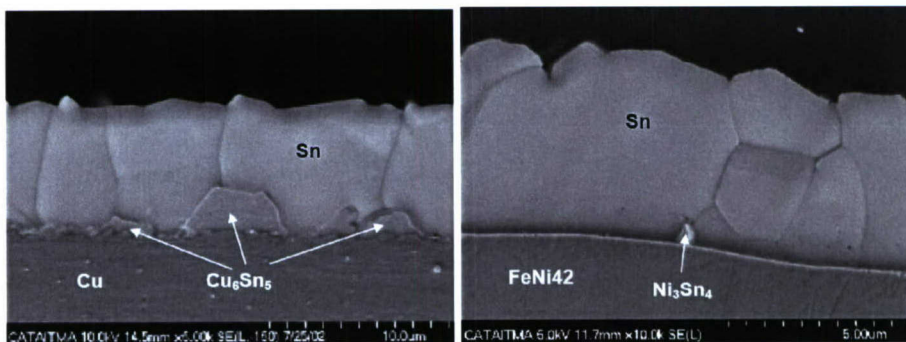


Figuur 44 Whiskergroei voor verschillende diktes tin op een koperen ‘leadframe’ (Ref: M. Dittes, P.Oberdorff, The whisker formation – Results, Test methods and countermeasures).

In figuur 47 is te zien dat de whiskergroei sterk beïnvloed kan worden door het aanpassen van de dikte van de tinlaag. Hoe dikker de tinlaag des te kleiner de whiskers worden. Een negatief punt van een dikke tinlaag is de risico’s van ‘cracks’ bij temperatuurschokken en/of trillingen.

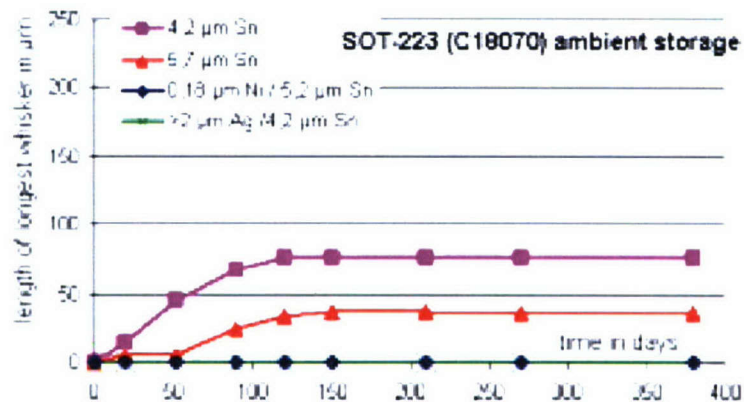
Tevens zal de groei minder snel verlopen en duurt het langer voordat de eerste whiskers verschijnen. Bij alle vier de situaties is te zien dat na een paar weken tot maanden het groeiproces zal stoppen en de whiskers op een constante lengte blijven. Uiteraard is de keuze voor de dikte van de tinlaag beperkt tot het ontwerp van het artikel.

Het tussen de metaallagen ontstaan van een ‘intermetallic compound’ in een legering kan zorgen voor een versterkte groei van whiskers. Het metaal van de onderlaag kan zich verspreiden in het tin, of andersom. Als de metalen in de goede verhouding aanwezig zijn kan dit resulteren in het ontstaan van een zogenaamd ‘intermetallic compound’. Deze samenvoeging van meerdere metalen kan zorgen voor versnelde whiskergroei. De ‘intermetallic compounds’ zorgen namelijk voor een verhoogde interne spanning in het tin. In figuur 45 zijn deze samenvoegingen goed te zien.



Figuur 45 Links: Vertind koper na 9 maanden opslag onder ongecontroleerde omgevingsomstandigheden. Met een grote hoeveelheid Cu_6Sn_5 ‘intermetallics’. Rechts: Vertind koper na 9 maanden opslag onder ongecontroleerde omgevingsomstandigheden. Met een kleine hoeveelheid Ni_3Sn_4 ‘intermetallics’ (Ref: M. Dittes, P. Oberdorff, The whisker formation – Results, Test methods and countermeasures).

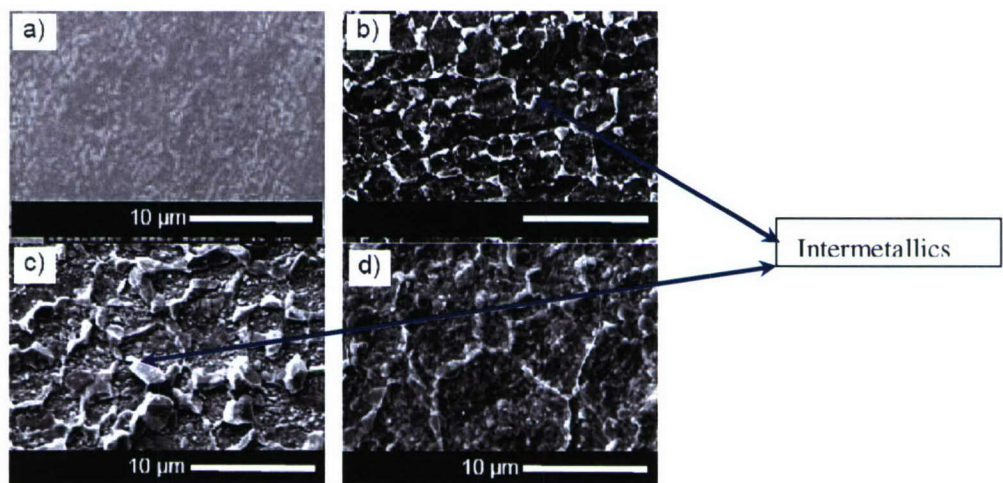
De invloed die het ontstaan van ‘intermetallic compound’ heeft op de whiskergroei is af te lezen in figuur 46.



Figuur 46 De whiskergroei voor vertinning op koper, nikkel of zilver met vergelijkbare diktes. (Ref: M. Dittes, P. Oberdorff, The whisker formation – Results, Test methods and countermeasures).

Hieruit blijkt dat whiskergroei voorkomen kan worden door het selecteren van een onderlaag van een ander metaal. De vorming van ‘intermetallic compounds’ is bij het gebruik van metalen als nikkel en zilver veel kleiner dan bij koper.

Het ontstaan van ‘intermetallic compounds’ tussen de metalen heeft tijd nodig. Van de snelheid die het proces heeft kan men een idee krijgen in figuur 47.



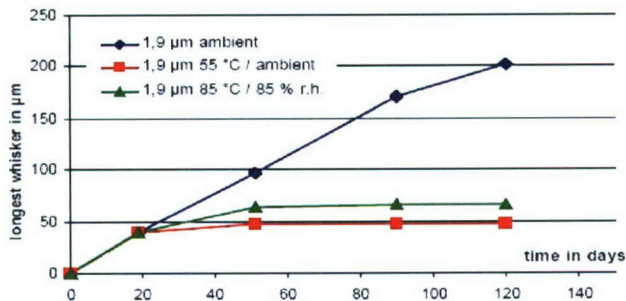
Figuur 47 a t/m d Bovenaanzicht van koper over verschillende momenten. (Ref: M. Dittes, P. Oberdorff, The whisker formation – Results, Test methods and countermeasures).

Op deze 4 foto's staat een bovenaanzicht van het koper op verschillende momenten (voor het maken van de foto is de tinlaag verwijderd). Figuur 47a is genomen 1 uur nadat de tinlaag is aangebracht. Figuur 47b is genomen zes dagen na het vertinnen. Figuur 47c is genomen 7 weken na het aanbrengen van de tinlaag op het koper. Er is goed te zien dat de vorming van ‘intermetallics’ steeds groter wordt, en dat het al zichtbaar is na een hele korte periode. Na een paar dagen is de vorming al heel duidelijk waarneembaar.

In figuur 47d is het materiaal direct na het aanbrengen van de tinlaag voor 1 uur verwarmd tot 150 °C. Bij deze situatie blijkt er helemaal geen last te zijn van whiskergroei. Dit is te verklaren doordat de vorming van ‘intermetallic compounds’ bij deze omstandigheden veel geleidelijker verloopt dan in de vorige situaties.

Deze ‘intermetallic compound’ die bij deze omstandigheden ontstaat wordt dan ook wel een ‘diffusion barrier’ genoemd. De Cu_6Sn_5 laag die gevormd wordt is veel regelmatiger, hierdoor wordt de snelheid waarmee de koper zich in het tin verspreidt minimaal. Dit heeft tot gevolg dat de verdere vorming van onregelmatigheden ook tot een minimum beperkt wordt. De vorming van onregelmatige intermetallics wordt beperkt door de ‘diffusion barriers’.

Omgevingsfactoren spelen een grote rol bij het ontstaan van tin whiskers. De vorming onder verschillende omstandigheden staat afgebeeld in figuur 48.

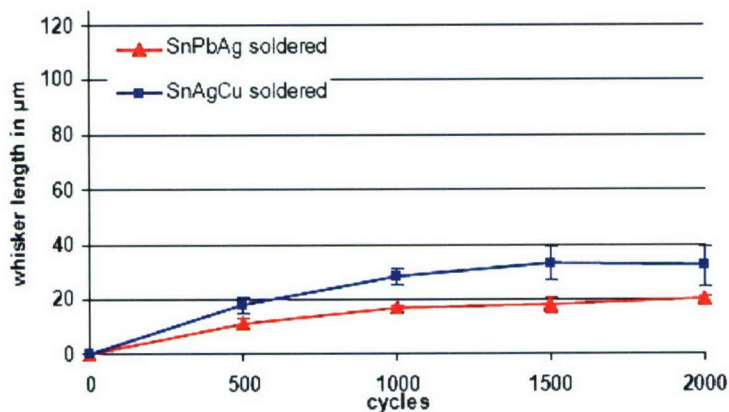


Figuur 48 Whiskergroei bij verschillende omgevingsomstandigheden aan een loodframe met tin materiaal (Ref: M. Dittes, P. Oberdorff, *The whisker formation – Results, Test methods and countermeasures*).

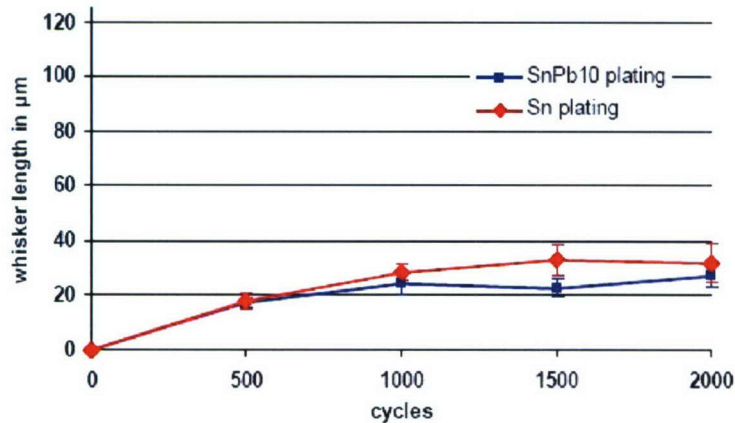
Af te lezen is dat bij een hogere temperatuur en een hogere luchtvochtigheid resulteren in een vermindering van de groei van whiskers (als hetzelfde materiaal wordt gebruikt). Ook is te zien dat de whiskergroei op een bepaald moment stopt. De omgevingsfactoren verschillen als volgt:

- Blauwe lijn : ambient omgevingsomstandigheden.
- Rode lijn : 55 °C, ambient luchtvochtigheid.
- Groene lijn : 85 °C en 85% gemiddelde luchtvochtigheid.

De groei van whiskers tijdens een ‘thermal cycling test’, hangt af van het gekozen materiaal. Elk materiaal heeft een eigen TC [$\text{SnPb} - 25,5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ en $\text{SnPbAg} - 17,5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$]. Als de materialen dezelfde TC hebben zal de test weinig invloed hebben op de vorming van whiskers. Als deze niet hetzelfde zijn zal de test wel degelijk invloed hebben. Dit is goed zichtbaar in figuur 49 en figuur 50.



Figuur 49 Maximale whisker lengte bij het gebruik van FeNi42 ‘leadframe’ gesoldeerd op een PCB met verschillende tin legeringen (SnPbAg en SnAgCu).



Figuur 50 Vergelijking van whiskergroei van componenten met een SnPb₁₀ en Sn verguld op FeNi₄₂. Wat weer gesoldeerd is op een PCB met een SnAgCu legering.

Bij beide figuren is een test gebruikt die in 2000 cycli een temperatuur verandering van -40 °C tot 85 °C heeft ondergaan met een snelheid van 5 °C/min. In figuur 49 is goed te zien dat het verwijderen van het lood uit de legeringen, een negatief effect heeft op de groei van whiskers. Figuur 50 laat zien dat als de TC's van metalen dicht bij elkaar liggen, de whiskergroei ook ongeveer gelijk zal zijn.

Als de koolstof inhoud van het metaal groter wordt, heeft dit ook een nadelige invloed op de vorming van whiskers. Het metaal moet namelijk zo zuiver mogelijk zijn om whiskergroei te voorkomen. Aangeraden wordt dan ook om het koolstofgehalte onder de 500 ppm te houden.

Tin whiskers kunnen verschillende problemen veroorzaken. Een whisker kan natuurlijk zorgen voor kortsluiting tussen het punt waar de whisker uitgroeit en een nabijgelegen component. De whiskers kunnen ook afbreken en op andere plaatsen zorgen voor een overbrugging tussen twee of meer componenten en daar een kortsluiting veroorzaken. Ook is het mogelijk dat whiskers de isolatie van componenten afschuren.

Ondanks de onzekerheden wat betreft tin whiskers zijn er een paar maatregelen die getroffen kunnen worden om tin whiskers te voorkomen.

Het selecteren van goede materialen kan zorgen dat veel problemen worden voorkomen. Er zal gelet moeten worden op zaken als TC's en de koolstofinhoud van de gebruikte metalen. Natuurlijk hangt ook de groei van 'intermetallic compound' af van de gekozen materialen.

Verder kunnen whiskers voorkomen worden door het verwarmen van het materiaal tot 150 °C zodat er een 'diffusion barrier' ontstaat. Vaak is dit echter geen optie omdat onder andere componenten als PCB's niet zo hoog verwarmd kunnen worden zonder dat er schade ontstaat.

Whiskergroei is een relatief onbekend verschijnsel, waar nog veel onderzoek naar gedaan moet worden. Vooral omdat er nog geen duidelijke oorzaak is vastgesteld. Als men meer kennis heeft over het ontstaan ervan, kan men waarschijnlijk veel beter whiskers voorkomen. Hetgeen uiteindelijk tot gevolg heeft dat men betrouwbaardere elektronische componenten kan produceren.

Tin whiskers moeten ook niet onderschat worden, er zijn al verscheidene gevallen bekend waarbij whiskergroei het uitvallen van kostbare apparatuur heeft veroorzaakt. Voorbeelden hiervan zijn de satellieten GALAXY IV en GALAXY VII, waarin tin whiskers een kortsluiting in relais hebben veroorzaakt. Hierdoor zijn de complete satellieten verloren gegaan, voordat de datum van afschrijving verstreken was. Ook op munitie gebied zijn er al verscheidene problemen gesignaleerd omtrent whiskergroei. De Phoenix Air-to-Air raket en de Patriot Missile II zijn hier enkele voorbeelden van. In onderstaande (Engelstalige tabel) is een overzicht gegeven van falen die de oorsprong hebben in whiskergroei.

De vervanging van lood door andere materialen is een EU-regel. Munitieartikelen uit andere delen van de wereld bevatten in de meeste gevallen nog wel lood.

Tabel 32 Overzicht van falen ten gevolge van whiskergroei¹³.

System	Synopsis	Reference
Heart Pacemaker	Class I Product Recall: Tin whisker short from tin-plated case of a crystal component caused a complete loss of pacemaker output.	FDA March 1986 http://www.fda.gov/ora/inspect_ref/itg/itg42.html
F-15 Radar	Tin whisker short inside hybrid package.	Nordwall, B., 'Air Force Links Radar Problems to Growth of Tin Whiskers', Aviation Week and Space Technology, June 20, 1986, pp. 65-70
U.S. Missile Program	Tin whisker from tin plated relays.	K Heutel and R. Vetter, 'Problem Notification: Tin Whisker growth in electronic assemblies', February 19, 1988, memorandum
U. S. Missile Program	Tin whisker from tin plated TO-3 transistor can shorts collector to case. Short erroneously turned on electrical unit.	J. Richardson, and B. Lasley, 'Tin Whisker Initiated Vacuum Metal Arcing in Spacecraft Electronics,' Proceedings 1992 Government Microcircuit Applications Conference, Vol. XVIII, pp. 119 - 122, November 10 - 12, 1992.
Phoenix Air to Air Missile	Tin whisker shorts inside hybrid package.	L. Corbid, 'Constraints on the Use of Tin Plate in Miniature Electronic Circuits', Proceedings 3rd International SAMPE Electronics Conference, pp. 773-779, June 20-22, 1989.
Patriot Missile II	Tin whisker from tin-plated terminals.	Anoplate, Suspected tin whisker related problems, Fall 2000 http://www.anoplate.com/news/pastnews/fall2000/tin.htm
GALAXY IV	Complete loss of satellite operation. Tin whisker short from tin plated relays	http://www.sat-index.com/failures/
GALAXY VII	Complete loss of satellite operation. Tin whisker short from tin plated relays	http://www.sat-index.com/failures/

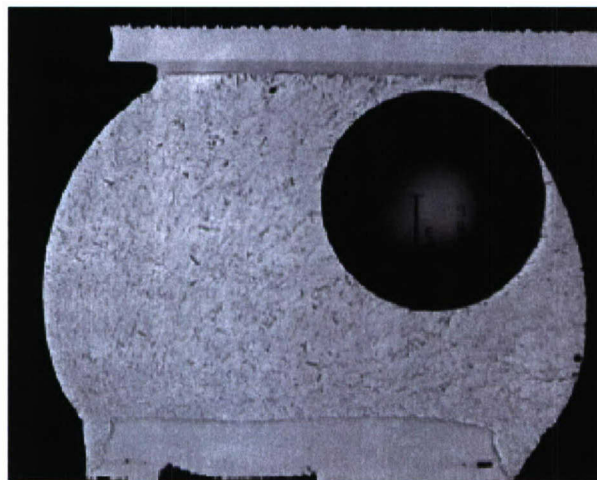
¹³ <http://www.calce.umd.edu/lead-free/tin-whiskers/TINWHISKERFAILURES.pdf>

Tabel 32 Overzicht van falen ten gevolge van whiskergroei (vervolg).

SOLIDARIDA D I	Complete loss of satellite operation. Tin whisker short from tin plated relays	Space and Tech; http://www.spaceandtech.com/digest/sd2000-25/sd2000-25-002.shtml
Additional Satellites	Three additional satellites of same general design have lost one of two redundant control processors due to tin whiskers	http://www.sat-index.com/failures/
Nuclear Utilities	Tin plated contact support arms on relays grew tin whiskers causing a resistive shunt path.	Nuclear Regulatory Agency (NRC), 1999; http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/event-status/part21/1999/1999352.html
Rocket Motor Initiator	During assembly-level testing, the rocket motor initiators were showing an ohmic short from the charge wires to the case.	See Report ROCKET MOTOR INITIATOR Failure Analysis

9.4.5 Voids

Void's zijn zwakke plekken in een soldeerverbinding. Deze zwakke plekken bestaan uit ingesloten gas dat tijdens het productieproces in de verbinding is gekomen. Omdat het ingesloten gas niet bijdraagt aan de sterkte van de verbinding is de sterkte van de verbinding afhankelijk van het aantal voids.



Figuur 51 Voids in een soldeerdruppel.

9.5 Initiële studie naar verouderde elektronica

9.5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk is een beschrijving van een dertigtal verouderde elektronische componenten, afkomstig van de Sidewinder. Deze zijn vervangen bij een update van het missile-systeem; het is echter onduidelijk of ook het einde van de levensduur is bereikt.

Omdat het functioneren van de componenten niet kan worden getest, kan de rest levensduur niet worden vastgesteld. Wel worden de componenten beschreven, gewogen en is er een gedemonteerd om te zien hoe het inwendige van de component eruit ziet. Het een en ander is gedocumenteerd met foto's.

De aanwezige elektronica is ingegoten in een epoxy hars; deze is met behulp van DMA/SDTA onderzocht op glastemperatuur overgang en start van de ontleding.

9.5.2 Verouderde elektronica

9.5.2.1 Uiterlijk onderzoek

De geleverde verouderde, elektronische componenten werden onderzocht op hun massa en uiterlijke afwijkingen. De bevindingen zijn in tabel 33 vermeld.

Tabel 33 Massa en uiterlijke beoordeling van de onderzochte elektronische componenten.

Nr.	Massa (gram)	Serie no	Opmerkingen
1	298.602		contacten vervuild?
2	302.076	06 03167	idem – of loodvlekken van soldeer?
3	298.249	06 07466	
4	298.553		
5	300.282		
6	296.710		
7	297.961		
8	307.981	0810694	
9	307.251	0810814	schone contacten
10	303.007	0603240	contacten smerig – loodvlekken?
11	302.187	06 05519	contacten aangetast?
12	302.369	081 0011	contacten schoon
13	304.111	060 3321	contacten schoon
14	298.300	06 02756	contacten schoon
15	300.875	06 02592	contacten vervuild
16	296.602	06 02380	contacten schoon
17	298.157	06 02585	contacten vervuild
18	298.792	06 02837	contacten schoon
19	300.407	06 03030	contacten vervuild
20	298.818	06 01889	contacten schoon
21	297.843	04 00815	contacten schoon
22	288.994	08 09046	contacten schoon
23	297.572	06 02088	contacten schoon
24	303.417	08 10929	contacten enigszins vervuild

Tabel 33 Massa en uiterlijke beoordeling van de onderzochte elektronische componenten (vervolg).

Nr.	Massa (gram)	Serie no	Opmerkingen
25	300.069	06 02038	contacten schoon
26	307.184	08 10768	contacten schoon
27	293.230	882705 SX 00 2705 Raytheon	contacten schoon
28	291.713	08 08934	contacten schoon
29	297.519	02 00115	contacten schoon
30	302.229	06 02580	contacten schoon

De componenten bestaan uit een zeshoekige vorm met een grootste lengte van circa 77 mm en met een dikte van circa 27 mm en een zilverkleurig uiterlijk. De componenten kunnen aan twee zijden worden vastgezet met een viertal schroefjes. Bovendien komen uit een zijde van de component een aantal draden, vermoedelijk om vast te solderen op een printplaat. Aan de andere zijde bevinden zich een aantal weerstandjes, vermoedelijk als correctiemogelijkheden van de inwendige elektronica (zie ook de foto's).

De conclusies uit het uiterlijk onderzoek zijn:

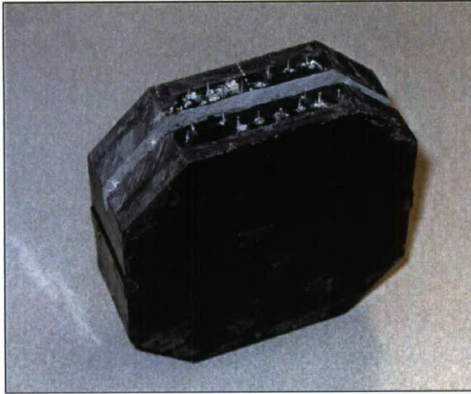
- De massa's bedragen tussen de 293 en 307 gram.
- Er is geen relatie aanwezig tussen massa en vervuiling van de contacten of andere uiterlijkheden.
- De componenten zijn van zeer uiteenlopende series afkomstig.
- De elektronische componenten zijn afgedekt met een aluminium folie die relatief gemakkelijk te verwijderen is. Daaronder verschijnt dan een zwart oppervlak dat waarschijnlijk een epoxyhars is waarmee de elektronica is ingegoten en gefixeerd. De bedoeling daarvan is de elektronische componenten en hun verbindingen onderling of met de printplaten te fixeren, zodat trillingen en andere belastingen (bijvoorbeeld kortstondige hoge temperaturen) een gereduceerde uitwerking hebben.
- Stukjes van deze hars worden onderzocht.

9.5.2.2 Foto's van de elektronische componenten

In figuur 52 is een van de elektronische componenten weergegeven; men ziet duidelijk de zeszijdige vorm, de regel weerstandjes aan de buitenzijde die afgedekt zijn met 'siliconen rubber'.



Figuur 52 Foto van de component met de inregelweerstandjes aan de buitenzijde.



Figuur 53 Bovenaanzicht van de component – men ziet de pennen voor aansluiting op een printplaat (de grijzige streep is een zaagsnede).



Figuur 54 Zaagsnede in component – men ziet duidelijk de weerstanden tussen de beide ingegoten printplaten.



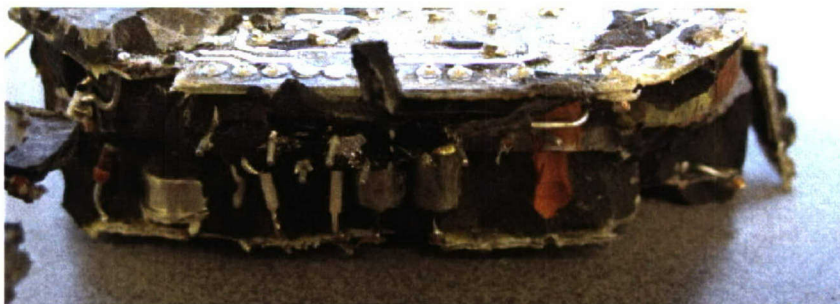
Figuur 55 Op deze foto zijn goed de verbindingspennen zichtbaar die vermoedelijk aan de printplaten zijn gesoldeerd.

9.5.2.3 Foto's van de opengewerkte elektronische componenten

Met behulp van hamer en beitel zijn de componenten geopend. Daarbij werd zichtbaar dat de component 2 printplaten bevat met daartussen weerstanden en spoeltjes.



Figuur 56 Dwarsdoorsnede van electronica blok.



Figuur 57 Dwarsdoorsnede van electronica blok.

9.5.3 Onderzoek aan epoxyhars

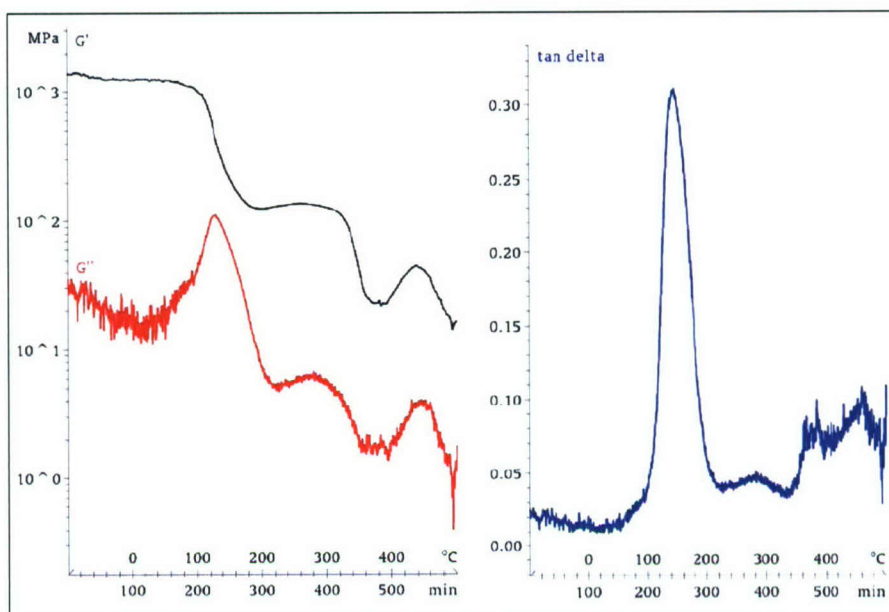
Van monsters van de epoxyhars van een component is het smelt/verweekgedrag bepaald. Met behulp van een ijzerzaag zijn brokjes gezaagd. De blokjes zijn glad afgewerkt met een vijl en vervolgens gemeten met de DMA onder de volgende meetcondities:

Apparatuur	Mettler DMA/SDTA 861 ^e
Temperatuurrange	-100 °C → 500°C
Opwarmingsnelheid	1 °C/min
Afmetingen sample	
Lengte	4,35 mm
Breedte	4,10 mm
Dikte	2,70 mm
Type belasting	Shear
Force amplitude	5 N
Displacement amplitude	0,1 µm
Frequentie	1 Hz

De curve van de DMA meting is weergegeven in figuur 58. Hierin is een aantal stappen te onderscheiden. Bij circa 140 °C vertoont het materiaal een afname in het G' signaal, gecombineerd met een piek in het G'' signaal. Een dergelijke combinatie wordt veroorzaakt door een glasovergang. De temperatuur waarbij deze overgang plaatsvindt (T_g) werd bepaald aan de hand van de piek van de tan delta curve (144 °C).

Dan volgt er een lichte stijging in G' die mogelijk wordt veroorzaakt door een nahardreactie van de thermoharder en de hars. Rond 350 °C volgt een tweede stap die hoogstwaarschijnlijk toe te kennen is aan beginnende ontleding. Deze ontleding loopt dan verder, waarbij de teststof steeds meer aan mechanische sterkte verliest. Bij 500 °C heeft de teststof nog steeds dezelfde vorm als aan het begin van het experiment. Detail hierbij is dat de teststof na het experiment wit verkleurd was.

De conclusie is dat de glastemperatuur van deze exoxyhars 144 °C is. Het temperatuurtraject waarbij het materiaal aan mechanische sterkte verliest loopt van 100 °C tot 200 °C . De stapgrootte van deze T_g is relatief klein. Over het algemeen is bij polymeren de stapgrootte rond T_g enkele decades groot. Dit houdt in dat deze epoxyhars rond T_g relatief weinig aan sterkte verliest.



Figuur 58 De moduli en de tan delta van de epoxyhars als functie van de temperatuur.

9.6 Conclusies

De volgende conclusies kunnen worden getrokken.

- Uit de uitwendige analyses, zoals massa bepaling en zoeken naar corrosie verschijnselen wordt niet duidelijk of de componenten het einde van hun levensduur hebben bereikt.
- De opbouw van de componenten, m.n. het ingieten in epoxyhars zal het effect van trillingsbelasting aanzienlijk beperken en dus de levensduur verlengen.
- De epoxyhars heeft een voldoende hoge T_g om functioneel te zijn.

Voor de vaststelling van de levensduur dienen aanvullende proeven uitgevoerd te worden, naast dat het functioneren van de component op de een of andere wijze dient te kunnen worden vastgesteld.

9.7 Conclusie en aanbevelingen

Passieve elektronica componenten hebben betere eigenschappen voor wat betreft zware omgevingsinvloeden (zoals hoge temperaturen) en verouderingseigenschappen dan halfgeleiders. Halfgeleiders (bijvoorbeeld IC's) zijn vooral door de kleinere afmetingen veel gevoeliger voor zwaardere omstandigheden. Ook gaan deze componenten minder lang mee onder normale omgevingsomstandigheden dan passieve componenten. Net zoals de onderdelen die gebruikt worden om verbindingen te maken tussen de elektronische componenten (soldeerverbindingen, kopersporen etc.) worden deze componenten beschouwd als de zwakke schakels van de elektronica.

De aspecten die goed getest moeten worden is de invloed van externe omgevingfactoren (temperatuur, trilling, vocht, straling en tijd) op elektronica. Veroudering van elektronica door gebruik (het belasten van elektronica met spanning) zal niet veel voorkomen omdat een munitieartikel maanden/jaren op de plank ligt en daarna voor maar een korte periode gebruikt zal worden. Hierdoor zal de belastingspanning op de elektronica meestal maar van korte duur zijn. Wat tot gevolg heeft dat effecten zoals HCID weinig zullen voorkomen. Er zal dus vooral veel getest moeten worden op de externe factoren die invloed hebben op de veroudering van elektronica.

Datasheets van componenten behoren AMR's te bevatten. Hieruit kan men opmaken wat de grenzen zijn van componenten van zowel operationele als omgevingsparameters (zoals voedings- en inputspanningen, gebruikstemperatuur en opslagtemperatuur). Deze informatie moet goed geraadpleegd worden tijdens het ontwerpen van de elektronica. In combinatie met informatie over het uiteindelijke milieu waar de elektronica zich in zal bevinden, kunnen de juiste componenten worden geselecteerd voor de schakeling(en). Dit zal uiteindelijk leiden tot een betrouwbaarder, veiliger en een functioneler product. Betrouwbaarder omdat het munitie artikel minder snel zal falen als de algehele fysieke kwaliteit van de elektronica beter is. Veiliger omdat er in de elektronische componenten minder snel storingen veroorzaakt worden, waardoor een munitie artikel in gebruik of tijdens opslag in een bunker niet vroegtijdig af kan gaan (waar natuurlijk al aandacht aan besteed moet worden tijdens het ontwerpen van een munitie artikel). En functioneler vanwege de langere levensduur die het munitie artikel kan krijgen als de elektronica minder snel verouderd en beter bestand is tegen 'extreme' omgevingsfactoren.

Tijdens het ontwerp en produceren van elektronica zal daarom veel zorg besteed moeten worden aan de kwaliteit van de elektronische component. Bij het ontwerpen moeten de juiste materialen, afmetingen en productieprocessen gekozen worden. Tijdens het productieproces moet men ervoor zorgen dat er secuur gewerkt wordt zodat bijvoorbeeld geen voids kunnen ontstaan.

Een verdere groei in de elektronica technologie (en dus ook de munitie technologie) kan alleen gemaakt worden als er aandacht besteed wordt aan het voorkomen van verschijnselen als whisker groei en corrosie. Het steeds kleiner worden van componenten en het dichter op elkaar neerzetten ervan, zorgen ervoor dat zulke verschijnselen steeds gemakkelijker storingen kunnen veroorzaken in elektronica.

Effecten van hoge temperatuur belasting op elektronica

Elektronica verouderd ongeacht of de elektronica wel of niet in gebruik is.

Omgevingsfactoren hebben grote invloed op de mate van veroudering en daarmee ook op het uitvalpercentage gedurende het 'Useful Life' stadium van de 'Bath-tub failure rate' curve (figuur 28).

De omgevingsfactor, temperatuur heeft een grote invloed op veel verouderingsverschijnselen. Zo kunnen snelle temperatuurswisselingen (thermal shock) door uitzetting en krimp scheurtjes veroorzaken in bijvoorbeeld soldeerverbindingen. Daar waar verschillende metalen of verschillende type materialen elkaar raken (verbinden) kan doordat elk materiaal een verschillende mate van uitzetting of krimp vertoont, scheurtjes in de verbindingen ontstaan als gevolg thermal shock. Woestijnachtige omgevingen zijn bijvoorbeeld omgevingen waar grote verschillen tussen dag en nachttemperaturen voorkomen, waarbij het verschil in temperatuur relatief snel kan optreden.

Hoge temperaturen versnellen veel verouderingsprocessen. Hierdoor zal de 'mean time to failure' (MTTF) verkort worden. Daarnaast zal de 'failure rate' toenemen (procentueel meer uitval gedurende 'useful life'). Temperatuur veranderingen kunnen in het algemeen bepaalde 'failure' mechanismen triggeren. In tabel 34 zijn voor veel voorkomende componenten, temperatuur afhankelijke mechanismen vermeld als mede welke type temperatuursverandering de 'trigger' is.

Tabel 34 Failure mechanisme per component.

Component type	'failure' mechanism	Triggering thermal stimuli
Semiconductors and IC's	Crack or Die	Temperature cycling
	Delamination at chip-resin interface	Temperature cycling
	Cracking of resin	Thermal shock
	Cracking of encapsulation	High temp., thermal shock
	Die-bond defect, package-seal defect, mismatch in thermal coeff. Of expansion, substrate defect	Temperature cycling, thermal shock
	Metallization defect, corrosion, bulk silicon defects	High storage temperatures
	Increase in leakage current, hot-electron effects	Low temperature
PCB's	Discoloration, warping, delamination, measling	High temperature during soldering or use, thermal shock
Coatings such as conformal coatings on PCB's	Cracking of coating leading to lack of protection for coated surface	High temperature during soldering or use, thermal shock
Resistors	Discoloration, charring, change of resistance, open circuit, melting of wire in wire wound resistors	Temperature cycling, thermal shock, high temperature during use
Inductors and transformers	Open circuit	Temperature cycling, thermal shock, high temperature during use
Capacitors	Change in capacitance, change in dielectric strength, change in insulation resistance, change in electrical characteristics, surface cracking	High temperatures

Tabel 34 Failure mechanisme per component (vervolg).

Component type	'failure' mechanism	Triggering thermal stimuli
Electrolytic capacitors	Damage to hermetic seal, drying of electrolyte, leakage of electrolyte	Thermal shock, high temperature during storage or use, prolonged high temperature during soldering
Plastic dielectric capacitors	Softening of dielectric	High temperature during soldering or use
Ceramic capacitors	Cracking near leads and body	High soldering temperature
Chip capacitors	Cracks in body/attachment joints	Temperature cycling
Porcelain/glass dielectric capacitors	Cracking of dielectric	Thermal shock
Crystals and crystal oscillators	Drift in oscillation frequency	Change in temperature
All electric, electronic and electromechanical parts including cables and connectors	Damage to mechanical joints, loosening of terminations, softening of insulation, opening of solder seals, change in electrical characteristics	Thermal shock, high soldering temperature, high temperature during use

Hoge temperaturen hebben een versnellend effect op 'failure' mechanismen. In onderstaande tabel zijn van een paar mogelijke 'failure' mechanismen van semi-conductoren de versnellingsfactoren gegeven. Deze factoren zijn vastgesteld door gedefinieerde versnelde 'stress' testen uit te voeren. Voor deze factoren wordt 25 °C als referentie aangehouden.

Tabel 35 Failure mechanisme als functie van temperatuur.

Failure mechanisme and corresponding activation energy	T = 85 °C	T = 105 °C	T = 125 °C	T = 150 °C	T = 175 °C
Corrosion, 0,45eV	19	41	82	178	355
Gate-oxide defect, 0,3 to 0,5 eV	26	62	134	317	682

Failure mechanism = a physical or chemical defect that results in partial degradation or complete failure of a product.

De interpretatie van een dergelijke tabel is als volgt: voor een 'failure' mechanisme met een activeringsenergie van 0,45eV is 19 uur bij 25 °C gelijk aan 1 uur bij 85 °C. Elke 20 graden stijging halveert de MTTF. Stel een 'life' test wordt voor de duur van 1000 uur uitgevoerd bij 85 °C. de 'failures' die zich nu voordoen, doen zich normaal bij 25 °C in 1000xf uren voor, waarbij f de versnellingsfactor is voor het 'failure' mechanisme. Bij bijvoorbeeld een E_A van 0,45eV, een temperatuur van 85 °C en een tijdsduur van 1000 uur. Dan komen er net zoveel problemen voor als in $1000 * 19 = 19000$ uur bij 25 °C.

Vibratie

Gedurende transport zijn elektronische componenten onderhevig aan vibraties. Deze vibraties kunnen ook voor een hogere uitval zorgen. In onderstaande tabel zijn voor een aantal componenten mogelijke effecten van vibratie weergegeven.

Tabel 36 Effect van belasting op component.

Component	Effecten als gevolg van vibratie
PCB's	Loosening of interconnections
Semiconductors	Wire-bond defects, die-bond defects, presence of contaminant particles, intermittent-connectivity problems (opens and shorts), substrate cracks, cracking of seals, failure of soldered joints, fracture of connecting leads
Connectors	Loose contacts, intermittent connectivity problems
Cables and interconnections	Loose contacts, interconnections problems, ESD effects due to vibration (triboelectric charging)
Fuses	Loose contacts
Switches	Loose contacts
Heat sinks, accessories	Mounting sturdiness, contact interface coupling
Coils, transformers	Weak construction, loose mechanical mounting of cores
Resistors, capacitors	Loose end terminations
Sockets, holders	Loose contacts, gripping sturdiness
Soldered assembly	Loosening of soldered connections, soldering faults, such as presence of trapped or adhering solder

Testen

Bovenstaande geeft aan dat het noodzakelijk is om diverse testen uit te voeren om bepaalde factoren vaststellen waarmee uitvalvoorspellingen en MTTF verkorting berekend kunnen worden. Hiervoor zijn allerlei modellen en testen ontwikkeld, die ook terug te vinden zijn in MIL-HDBK-217. Daarnaast beschrijft MIL-STD-833G de 'environmental', 'mechanical' en 'Electrical' testen, alsmede testprocedures. Door het complete traject van productie, tot gebruik, tot uitval goed in ogenschouw te nemen kan een goed beeld gevormd van mogelijke uitval van componenten. Dit biedt ook de mogelijkheid om hierop vroegtijdig te anticiperen, door bijvoorbeeld een streng selectiebeleid voor de te gebruiken componenten en/of tijdige vervanging. Daarnaast blijft het noodzakelijk om periodiek testen uit te voeren. Hierdoor is uitval door toedoen van elektronische componenten in bijvoorbeeld wapensystemen te minimaliseren.

Aanbeveling

Ondanks het feit dat er binnen TNO Defensie en Veiligheid weinig informatie over de veroudering van elektronica bekend is, dienen de gevolgen van een dergelijke veroudering in combinatie met de whisker groei niet te worden onderschat. Bij vervolgvactiteiten is het wenselijk dit aspect nader, in samenspraak met de industrie/fabrikanten in kaart te brengen.

9.8 Referenties

- 1 G. Herder, Bepaling thermisch-mechanisch gedrag epoxyhars, Analyse rapport 06 DV3/2563.
- 2 NN, Military Handbook Electronic reliability design Handbook (MIL-HDBK-338B).
- 3 Environmental-stress screening improves electronic-design reliability, V. Lakshminarayanan, 20 September 2001, www.ednmag.com
- 4 Alternative lead-free solder joint integrity under room temperature mechanical load, Phil Geng, 2004 intersociety conference on thermal phenomena.
- 5 The electronics handbook, J.C. Whitaker, 1996.

10 Afdichtingen in munitie

10.1 Inleiding

Afdichtingen komen in enorme aantallen voor, in een verscheidenheid aan technische toepassingen. Net zo enorm is de diversiteit aan vormen, materialen en applicaties die worden gebruikt bij afdichtingen. Een greep uit het aantal materialen dat wordt gebruikt:

Aluminium	Asbest
Butyl rubber	Kurk
Ethyleen-propyleen rubber	Fluorocarbon elastomeer
Neopreen rubber	Nylon
Polybuteen	Polysulfide rubber
Polyurethaan	Teflon
Silicone rubber	
Tetrafluoroethylene/propylene rubber (FEPM => fluor-ethylene-propylene monomeer)	
etc.	

De keuze van materiaal hangt af van de toepassing. Sommige afdichtingen zijn primair bedoeld om gassen, vloeistoffen (en soms vaste stoffen) tegen te houden, andere hebben meer een klemfunctie. Ook qua vorm kunnen de verschillende typen afdichtingen verschillen. Vaak wordt een zogenaamde O-ring gebruikt, zowel voor afdichten als voor klemmen, maar ook schijfvormige, holle en meer complexe vormen worden gebruikt (zie figuur 59).

De keuze van materiaal hangt af van de toepassing. Sommige afdichtingen zijn primair bedoeld om gassen, vloeistoffen (en soms vaste stoffen) tegen te houden, andere hebben meer een klemfunctie. Ook qua vorm kunnen de verschillende typen afdichtingen verschillen. Vaak wordt een zogenaamd O-ring gebruikt, zowel voor afdichten als voor klemmen, maar ook schijfvormige, holle en meer complexe vormen worden gebruikt (zie figuur 59).



Figuur 59 Afdichtingen.

Al deze materialen zijn in meer of mindere mate onderhevig aan veroudering. Deze veroudering manifesteert zich als gevolg van blootstelling aan thermische, chemische of mechanische (over)belasting. In sommige gevallen kunnen deze invloeden zeer extreem van aard zijn (bijvoorbeeld in motorblokken, industriële reactoren of in de ruimtevaart).

Ook in munitieartikelen wordt veelvuldig gebruik gemaakt van afdichtingen. Het verouderingsgedrag van de toegepaste materialen is verhoudingsgewijs beperkt, danwel onbekend, mede gezien de vaak geringe thermische en mechanische belastingen die de artikelen ondergaan. In sommige gevallen is de energetische component in munitieartikelen vele malen gevoeliger voor veroudering als gevolg van verhoogde temperatuur dan de afdichtingen in het systeem. Hierin schuilt echter ook het gevaar van aantasting van de afdichting door corrosieve ontledingsproducten die vrijkomen bij de veroudering van energetische materialen. Met name de combinatie van chemische aantasting, de mechanische belasting (die zorgt voor de afdichting of klemming) en een eventuele temperatuurverhoging, kan leiden tot het disfunctioneren van de betreffende afdichting, wat weer kan leiden tot falen van het artikel. In dit verband is het van grote noodzaak dat de mechanische eigenschappen van de afdichting bekend zijn en periodiek gecontroleerd worden.

10.2 Lichtpatroon nr. 338 van 40 mm voor granaatwerper

Dit artikel bevat een afdichting van het type O-ring, waarvan TNO het type polymeer niet heeft kunnen vaststellen en bepalen op basis van beschikbare informatie, die voor een waterdampdichte verbinding moet zorgen tussen de ballistische kap en het granaatlichaam. In het artikel bevinden zich meerdere afdichtingen, echter die in de ballistische kap is waarschijnlijk het meest kritisch voor de juiste werking. De rubberen O-ring moet namelijk het lichtelement beschermen tegen waterdamp uit de buitenlucht.

Het lichtelement bevat een hoeveelheid magnesiumpoeder, wat erg gemakkelijk reageert met water(damp) onder vorming van waterstofgas volgens de reactievergelijking:



Het gevaarsaspect wat een dergelijke reactie met zich meebrengt is de vorming van waterstof, hetgeen een logistiek probleem (opbolling) en veiligheidsprobleem (ontvlambaarheid van waterstof) met zich meebrengt.

Om de werking van de O-ring te testen is een tweetal testseries uitgevoerd, te weten:

- karakterisering O-ring met behulp van DMA, (on)verouderd;
- waterdampdoorlaatbaarheid.

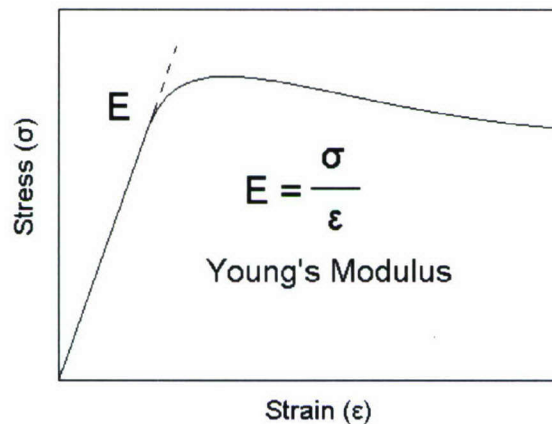
De veroudering onder H₂-conditie is praktisch complex, en kan alleen middels een doorstroomcel worden uitgevoerd. Vanwege het ontbreken van dergelijke faciliteiten bij TNO is de aanname gemaakt dat de aantasting gedurende de thermische belasting in het artikel heeft plaatsgevonden.

Uit deze testseries zou een eenduidig beeld gevormd moeten worden over het gedrag van de O-ring onder verschillende klimatologische omstandigheden. Bij de DMA experimenten wordt de thermisch-mechanische respons van het materiaal gemeten,

terwijl bij de waterdampdoorlaatbaarheid de prestaties onder hoge luchtvochtigheid worden gemeten.

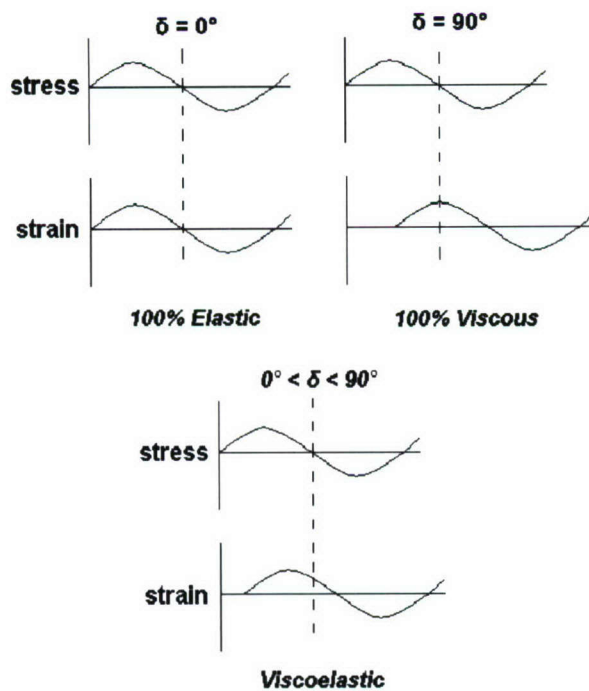
10.3 Beschrijving DMA-techniek

Elk voorwerp is onderhevig aan een bepaalde mechanische belasting. De oorzaak van deze belasting kan variëren van de zwaartekracht op een voorwerp in rust tot en met een hoogfrequent trillen van een stuwstof in een opstijgende raket. In het eerste geval spreekt men van een statische belasting en in het tweede geval spreekt men van een dynamische belasting. Deze mechanische belastingen hebben invloed op de eigenschappen van een materiaal. Zo is de stijfheid of E-modulus (ook wel Young's modulus of complexe modulus genoemd) onder meer afhankelijk van de kracht per oppervlakte eenheid (de spanning of stress) die op een bepaald materiaal werkt en de aanwezige temperatuur. In figuur 60 is een 'stress-strain' diagram afgebeeld. In een dergelijk diagram wordt de stress uitgezet tegen de rek ('strain') als gevolg van de opgelegde kracht. De initiële E-modulus wordt in zo'n diagram weergegeven door de helling van een raaklijn aan de curve, meestal in het eerste deel van de belasting.



Figuur 60 Typische stress-strain curve van een polymeer.

Deze afhankelijkheid van de E-modulus van de opgelegde kracht en de temperatuur komt met name tot uiting bij (visco-elastische) polymeren. Wordt op een polymeer een dynamische, sinusvormige stress opgelegd met een zekere frequentie en amplitude, dan zal de respons (strain) van dit materiaal in het extreme geval elastisch, danwel viskeus zijn (zie figuur 61).



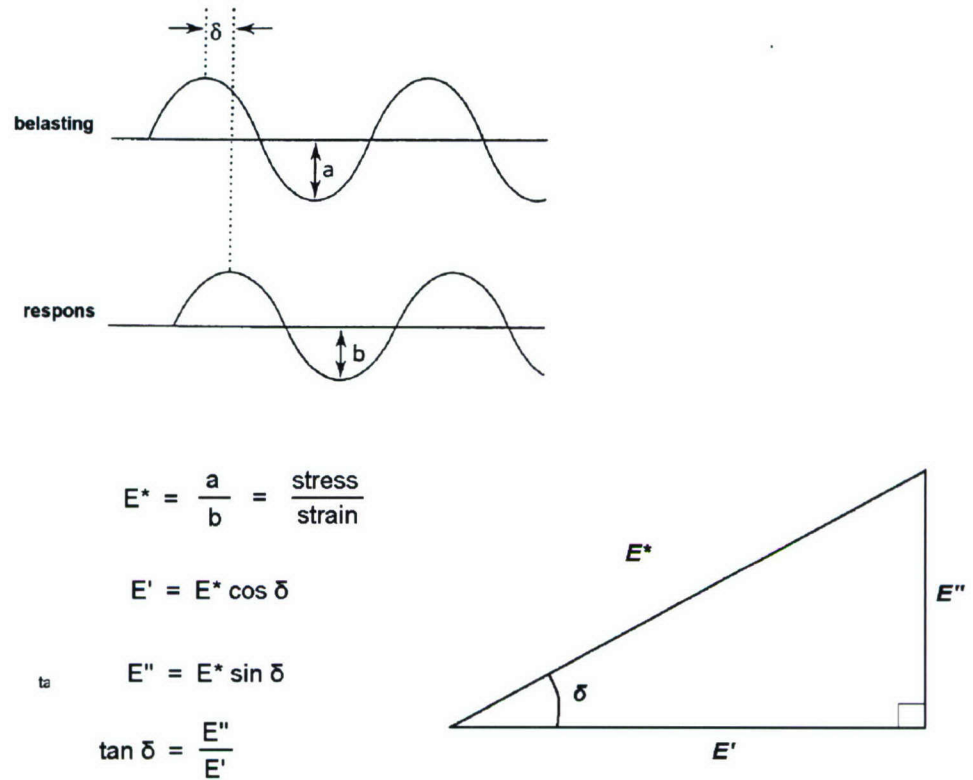
Figuur 61 Respons (strain) van een visco-elastisch materiaal op een belasting (stress).

Young's Modulus

Over het algemeen vertonen polymeren een viscoelastisch gedrag, wat betekent dat de respons op een opgelegde belasting zowel elastisch als viskeus is en er een zekere faseverschuiving tussen stress en strain optreedt. Wordt uit deze stress-strain gegevens een elasticiteitsmodulus berekend dan kan dit resulteren in curven van de verschillende E-moduli (te weten: de loss modulus, de storage modulus en de Young's modulus) en de verliesfactor als functie van de temperatuur. De storage modulus (E') geeft in dit verband het elastische deel van het materiaal weer, dus het deel wat volledig elastisch terugveert naar de beginsituatie na wegnemen van een aangebrachte spanning op het materiaal. De loss modulus (E'') geeft het viskeuze deel van het materiaal weer, dus het deel wat niet terugveert naar de beginsituatie, maar wordt gedissipeerd in warmte. De Young's modulus ($|E^*|$) is de complexe modulus, afgeleid uit E' en E'' volgens:

$$|E^*| = E' + iE'' \quad (i^2 = -1)$$

Dit wordt toegelicht in figuur 62.



Figuur 62 Afleiding van de storage modulus, de loss modulus en de Young's modulus.

De verliesfactor ($\tan \delta$) geeft de verhouding weer tussen de loss modulus en de storage modulus (E''/E') en is een maat voor de relatieve energiedissipatie (damping) van het materiaal. $\tan \delta$ is afhankelijk van de frequentie van een opgelegde trilling en van de temperatuur en vertoont een maximum bij een overgangstemperatuur (bijvoorbeeld bij de glasovergang). In figuur 61 was reeds te zien dat δ gelijk aan de faseverschuiving tussen stress en strain is.

Relatie E-moduli met energetische materialen

Aangezien energetische materialen vaak in polymeer matrices worden toegepast of van zichzelf mechanische eigenschappen hebben die overeenkomen met polymeren, is het mogelijk om met behulp van TMA en/of DMA statische, respectievelijk dynamische belastingprofielen op een energetisch materiaal op te leggen om zo de verschillende E-moduli en $\tan \delta$ te bepalen. Bij de bepaling van deze parameters kan een aantal factoren van invloed zijn op het uiteindelijke resultaat van de meting. Middels een overzicht van deze factoren en de mate van invloed op de meting kan duidelijk worden in hoeverre de betreffende parameters moeten worden beschouwd als significante bronnen van afwijking.

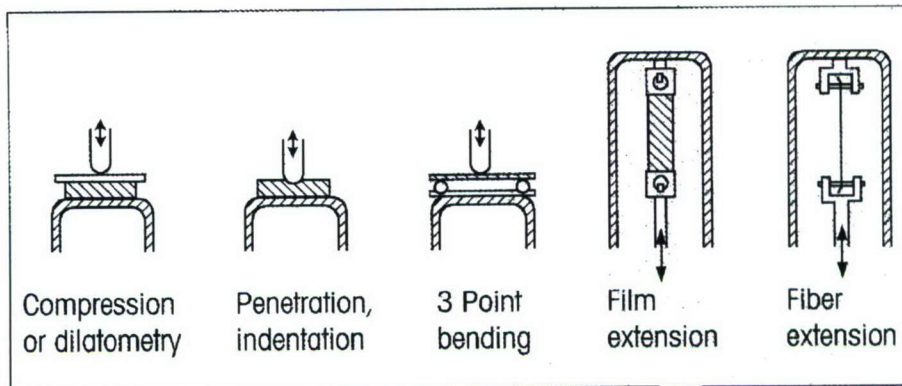
Met behulp van DMA is het mogelijk de 'storage' modulus (E') en de 'loss' modulus (E'') van diverse materialen onder een oscillerende belasting te bepalen als functie van tijd en/of temperatuur. De grenzen waarbinnen deze metingen mogelijk zijn, liggen in het frequentiegebied van 0,001 tot en met 1000 Hz (7 decades). Met deze techniek worden de rheologische eigenschappen, in het bijzonder de elasticiteitsmoduli en damping gemeten.

Dynamisch Mechanische Analyse heeft het voordeel van een duizendmaal grotere gevoeligheid dan TMA en/of DSC, wanneer glasovergangsvormingen worden bestudeerd. Ook heeft DMA het vermogen om secundaire bewegingsovergangen bij lage temperaturen te ontdekken die invloed hebben op de fysische eigenschappen. Op basis van de gemeten grootheden is het mogelijk de E-moduli te bepalen, zoals eerder toegelicht.

Inwendige wrijvingseffecten zijn sterk temperatuur en frequentieafhankelijk. In een breed temperatuur - frequentiegebied kan men het volgende waarnemen;

De elasticiteitsmodulus (E of E') neemt sterk toe in een kritisch gebied wanneer de frequentie toeneemt of de temperatuur afneemt.
de verliesmodulus (E'') en de verliesfactor (of $\tan(\delta)$) gaan door een maximum in dat kritische gebied.

Monsters worden normaal getest op 'buigen' waarbij het monster stevig is ingeklemd aan beide, danwel een uiteinde(n) en het middelpunt sinusvormig wordt bewogen door een kracht-aangedreven drukpunt. Andere vormen van testen zijn weergegeven in figuur 63.



Figuur 63 Verschillende testvormen voor TMA en DMA.

Buiging kan naast de meest geëigende methode (single cantilever) ook in een dual cantilever methode (3-point) gemeten worden. Naast de complexe, oscillerende, metingen is het ook mogelijk statische metingen uit te voeren in de compression mode.

De techniek vindt zijn waarde in projecten in de reeks van de productie van energetische materialen tot aan de levensduurvoorspelling van energetische materialen (explosieven, kruiden en raketstuwstoffen). Binnen deze reeks vallen ook diverse polymeren welke in raketmotor systemen gebruikt worden. Tevens is het een techniek welke voor mechanische compatibiliteit gebruikt kan worden.

10.4 DMA aan rubberen O-ring, (on)verouderd

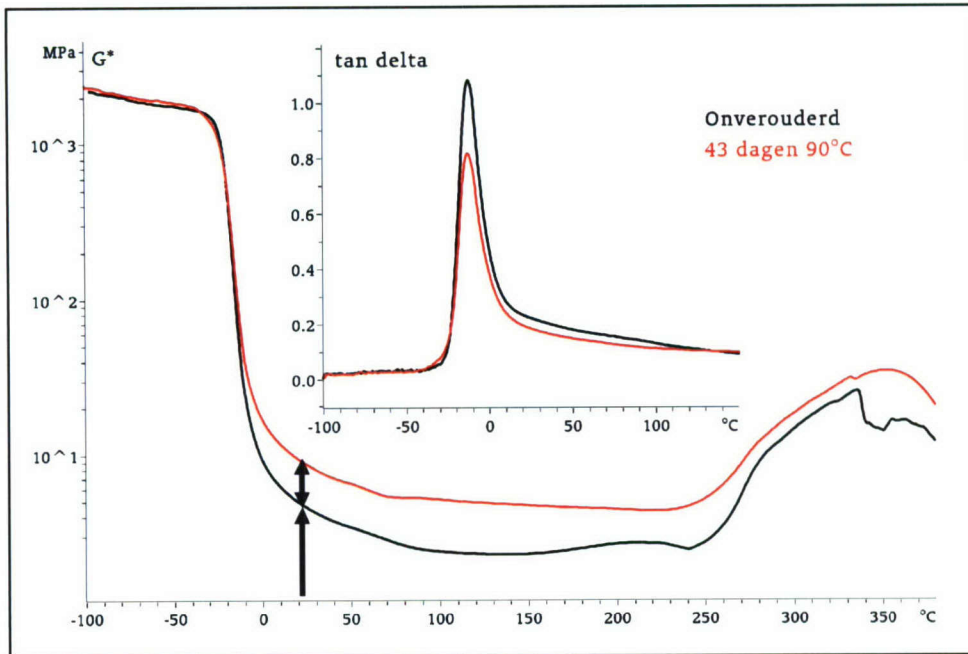
Over het algemeen vertonen polymeren viscoelastisch gedrag. Dit betekent dat de respons op een opgelegde belasting zowel elastisch als viskeus is en er een zekere faseverschuiving tussen stress en strain optreedt. Wordt uit deze stress-strain gegevens een elasticiteitsmodulus berekend dan kan dit resulteren in curven van de verschillende E-moduli (te weten: de loss modulus, de storage modulus en de Young's modulus) en de verliesfactor als functie van de temperatuur of tijd. Aangezien energetische materialen vaak in polymeer matrices worden toegepast of van zichzelf mechanische eigenschappen hebben die overeenkomen met polymeren, is het mogelijk om met behulp van TMA en/of DMA statische, respectievelijk dynamische belastingprofielen op een energetisch materiaal op te leggen om zo de verschillende E-moduli en $\tan \delta$ te bepalen. Met behulp van de constant load mode is het mogelijk een lineaire temperatuurscoëfficiënt, een glasovergangstemperatuur of een verwekingspunt te bepalen.

De gemeten waarden zijn niet alleen afhankelijk van de materiaaleigenschappen maar ook van de condities waaronder gemeten wordt en de eigenschappen van het meetapparaat zelf, alsmede van de keuze van het type, het materiaal, massa en de geometrie van de probe. Ook ongewenste verschijnselen van chemische en/of fysische aard, zoals condensvorming, het ontwijken van vluchtige componenten (weekmakers), ontmenging en chemische reacties kunnen tijdens het meten worden geregistreerd.

Voor de karakterisering met behulp van DMA is een thermische veroudering opgelegd van 43 dagen bij 90 °C. Deze conditie is aangenomen als een worst-case scenario, om effecten zichtbaar te maken. De DMA-experimenten zijn in duplo uitgevoerd aan verouderd en onverouderd materiaal onder de volgende condities:

Apparatuur	: Mettler DMA/SDTA 861 ^e
Temperatuurrange	: -100 °C → 500 °C
Opwarmingsnelheid	: 2 °C/min
Nominale afmetingen sample	
Diameter	: 1,5 mm
Dikte	: 0,6 mm
Type belasting	: shear
Force amplitude	: 1 N
Displacement amplitude	: 5 µm
Frequentie	: 1 Hz

Van deze duplo metingen zijn representatieve curves weergegeven in figuur 64. Hierin zijn de curven tot circa 350 °C opgenomen, aangezien boven deze temperaturen ontleding van het rubber optreedt waardoor dit deel van de curve niet bruikbaar is.



Figuur 64 DMA meting aan O-ring 40 mm lichtpatroon.

In figuur 64 is te zien dat de glasovergangstemperatuur (T_g) bij $-13\text{ }^\circ\text{C}$ nauwelijks verschuift als functie van de veroudering. Dit blijkt ook uit tabel 37 waarin een overzicht gegeven is van de temperatuurverschillen van T_g en bij $20\text{ }^\circ\text{C}$. De curve van het verouderde materiaal ligt in zijn geheel iets hoger dan die van het onverouderde materiaal. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door een combinatie van oxidatieve (versnelde) veroudering en chemisch/fysische verandering van het rubber. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk dat er bepaalde hulpstoffen uit het rubber diffunderen of ontlede bij verhoogde temperatuur. Dit is wellicht de oorzaak zijn van de sterke stijging van G^* vanaf $250\text{ }^\circ\text{C}$.

Tabel 37 Meetresultaten DMA-meting O-ring 40 mm lichtpatroon.

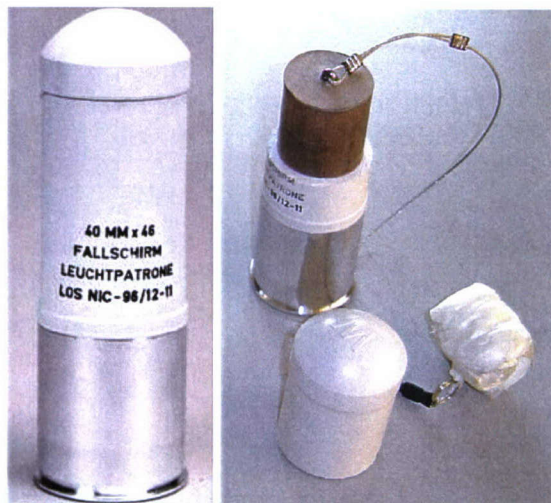
	Onverouderd	Verouderd		
G^* bij $20\text{ }^\circ\text{C}$ [MPa]	5,0	4,8	9,5	9,4
T_g [$^\circ\text{C}$]	-13,1	-13,1	-13,4	-13,5

Naar alle waarschijnlijkheid behoudt de O-ring zijn afdichtende werking, ook na het relatief zware verouderingstraject. Bij kamertemperatuur blijft het materiaal rubberachtig van karakter, waardoor de afdichtende kracht blijft bestaan. De glasovergangstemperatuur is wel relatief hoog voor een munitieartikel dat ook in koude klimaatzones wordt gebruikt. Volgens de beschrijving van het artikel kan het gebruikt worden tussen $-20\text{ }^\circ\text{C}$ en $+50\text{ }^\circ\text{C}$. De G^* modulus heeft bij $-20\text{ }^\circ\text{C}$ echter een waarde van circa 550 MPa , wat aangeeft dat het materiaal al een deel van zijn rubberachtige karakter heeft verloren. Overigens speelt bij deze temperaturen de luchtvochtigheid uiteraard geen rol meer, zodat reactie met magnesiumpoeder niet aan de orde is. Wel is het gevaar van breuk van de O-ring bij deze temperaturen groter, aangezien het materiaal zich gedeeltelijk in de glasfase bevindt en dan veel brosser wordt. Dit zou de afdichtende werking onder gematigde klimatologische omstandigheden negatief kunnen beïnvloeden.

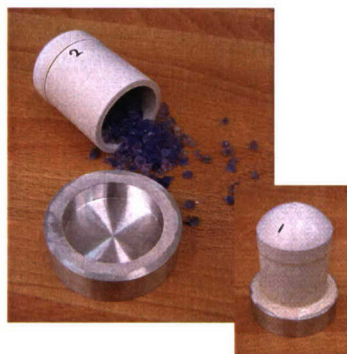
10.5 Waterdampdoorlaatbaarheid

De waterdampdoorlaatbaarheid van de O-ring in de ballistische kap van het 40 mm lichtpatroon werd gravimetrisch bepaald aan de hand van NEN-ISO 2528. Deze norm beschrijft een methode voor de bepaling van de waterdampdoorlaatbaarheid van folies en plaatmateriaal. Met een aantal aanpassing kan het principe van deze methode ook worden toegepast op de 40 mm lichtpatroon, en dan met name op de bovenste helft waarin de O-ring zich bevindt.

Voor dit onderzoek werd een aantal patronen open gezaagd en de parachute en lichtelement verwijderd (zie figuur 65). De bovenste helft werd gevuld met silicagel en op een aluminium bakje geplaatst waarna de naden dicht werden gekit (zie figuur 66).



Figuur 65 Demontage 40 mm lichtpatroon.



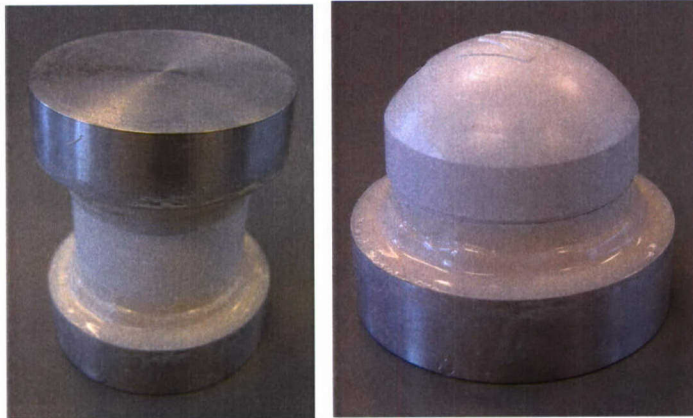
Figuur 66 Patroon, gevuld met silicagel.

Dit geheel werd in duplo weggezet onder hoge luchtvochtigheid bij een temperatuur van 40 °C. De silicagel in het patroon absorbeert het vocht wat eventueel naar binnen dringt, waardoor het in massa toeneemt. Door de massa periodiek te bepalen kan de mate van waterdampdoorlaatbaarheid worden bepaald. Vanwege het ontbreken van een referentiewaarde wordt bij 1 patroon de O-ring verwijderd voor het experiment en wordt 1 patroon helemaal dicht gekit (zie figuur 67). Op die manier kunnen ook twee uitersten worden meegenomen om te vergelijken. Tevens wordt hiertoe een segment van een patroon genomen en ingeklemd tussen twee aluminium bakjes (zie figuur 68)

en een patroon vlak onder de ballistische kap af gezaagd en in een aluminium bakje geplaatst. Deze laatste twee patronen zijn bedoeld om het effect van waterdampdoorlaatbaarheid van het buismateriaal zelf mee te nemen.

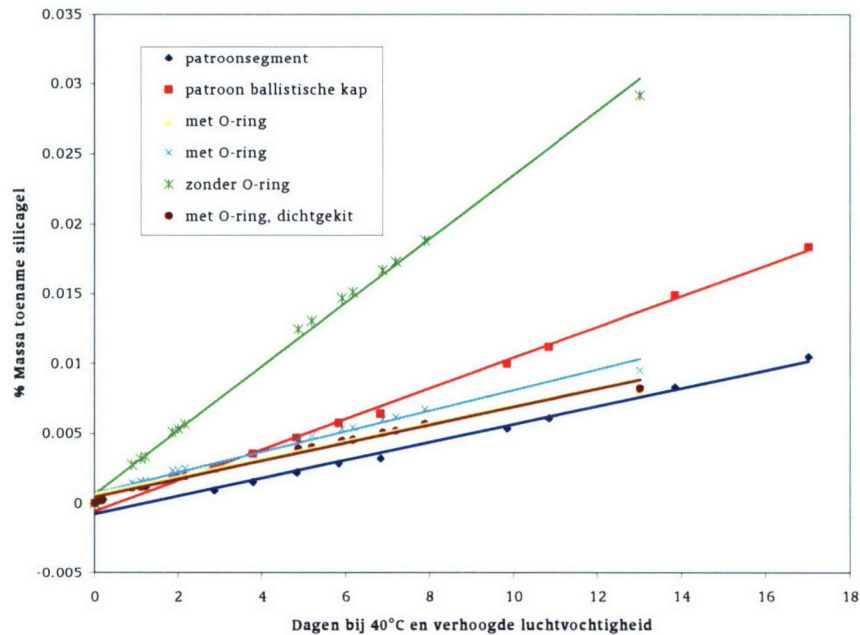


Figuur 67 Patroon dichtgekit.



Figuur 68 Waterdampdoorlaatbaarheid van buismateriaal.

De genoemde patronen werden opgeslagen bij een luchtvochtigheid van >90% in een excicator bij 40 °C. Hierbij werd met verschillende intervals de massa(toename) gemeten van de patronen met inhoud. De resultaten van deze metingen zijn samengevat in figuur 72. Hierin is het percentage massatoename van de silicagel uitgezet tegen de tijd.



Figuur 69 Massatoename silicagel als gevolg van verhoogde luchtvochtigheid.

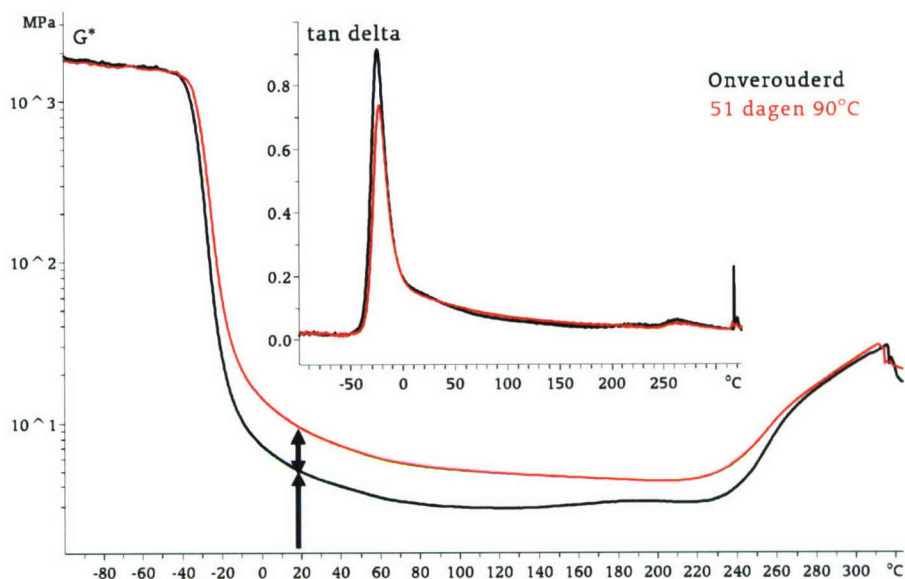
In figuur 69 valt meteen op dat de lijn van het patroon waar de O-ring uit verwijderd is, het sterkst oploopt. Dit geeft aan dat de functie van de O-ring voor de afdichting uiterst belangrijk is. De overige lijnen lopen eveneens op, maar minder steil. Van deze overige lijnen ligt die van het patroonsegment (blauw) het laagst. Het belangrijkste verschil tussen het patroonsegment en de overige patronen is, dat de eerstgenoemde geen ballistische kap meer heeft. Het lijkt er dus op dat de ballistische kap eveneens een rol speelt in de waterdampdoorlaatbaarheid van dit artikel. Dit beeld lijkt te worden bevestigd door de lijn van het patroon die vlak onder de ballistische kap was afgezaagd (rood). De procentuele massatoename verloopt hier iets sneller dan de overige patronen (uitgezonderd die zonder O-ring). Dit zou te maken kunnen hebben met de specifieke eigenschappen van de ballistische kap en het granaatlichaam. Aangezien er geen informatie voorhanden is omtrent de typen polymeer die hier gebruikt zijn, is het moeilijk hier een sluitende conclusie aan te verbinden.

10.6 Houder nr. 25 voor seingranaat nr. 65 - karakterisering O-ring (KM-artikel)

Ook in dit artikel bevindt zich een aantal O-ringen waarvan TNO het type polymeer niet heeft kunnen vaststellen en bepalen op basis van beschikbare informatie. Onderzocht is of de ringen mogelijkgevoelig zijn voor veroudering en daardoor de werking van het artikel kunnen belemmeren. De O-ringen werden los aangeleverd door de opdrachtgever met de vermelding dat het jaar van aanmaak 2001-2002 is en dat de ringen alleen 'natuurlijk' zijn verouderd tijdens opslag van de artikelen in het magazijn. Er zijn DMA-experimenten in duplo uitgevoerd onder de volgende condities:

Apparatuur : Mettler DMA/SDTA 861°
 Temperatuurrange : -100 °C → 500 °C
 Opwarmingssnelheid : 1 °C/min
 Nominale afmetingen sample
 Diameter : 3 mm
 Dikte : 1,7 mm
 Type belasting : shear
 Force amplitude : 1 N
 Displacement amplitude : 1 µm
 Frequentie : 1 Hz

De ringen zijn gemeten 'als ontvangen' en gemeten na versnelde veroudering gedurende 51 dagen bij 90 °C. Representatieve curven zijn weergegeven in figuur 70. Ook hier is de data boven 320 °C niet weergegeven vanwege ontleding van het rubber.



Figuur 70 DMA curven O-ringen uit houder nr. 25 voor seingranaat nr. 65.

De meetresultaten van de curven zijn samengevat in tabel 34. Hierin is te zien dat T_g een aantal graden stijgt en G^* bij 20 °C ongeveer verdubbelt als functie van de veroudering. Zowel de stijging in T_g als de stijging in G^* zal naar verwachting niet voor problemen zorgen voor wat betreft de afdichtende werking.

Tabel 38 Meetresultaten DMA meting O-ring houder nr. 25 voor seingranaat nr. 65.

	Onverouderd		Verouderd	
G^* bij 20 °C [MPa]	5,5	5,0	11,1	9,2
T_g [°C]	-23,2	-23,2	-21,1	-21,7

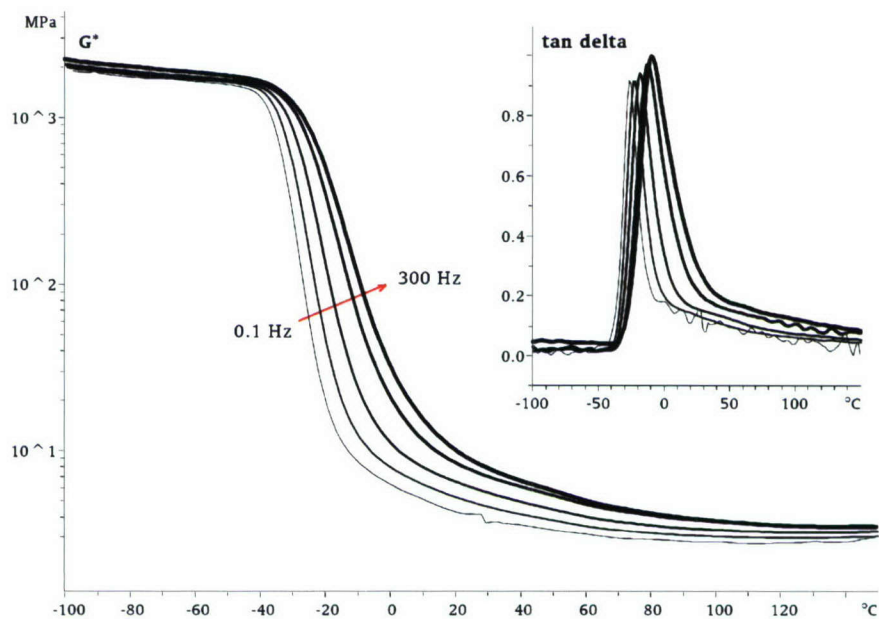
10.6.1 Frequentieafhankelijk gedrag

De O-ringen uit dit artikel zijn ook getest op frequentie-afhankelijk gedrag. Het is bekend van voornamelijk polymeren dat het elastisch gedrag afhankelijk is van de frequentie van een opgelegde mechanische trilling. De trillingsbron zou bijvoorbeeld afkomstig kunnen zijn van een voer-, vaar- of vliegtuig en deze zou de afdichtende

werking kunnen beïnvloeden. Op de hierboven genoemde O-ringen zijn DMA-experimenten uitgevoerd bij verschillende frequenties om het frequentie-afhankelijk gedrag in kaart te brengen. De DMA-experimenten zijn uitgevoerd aan de hand van de volgende parameters:

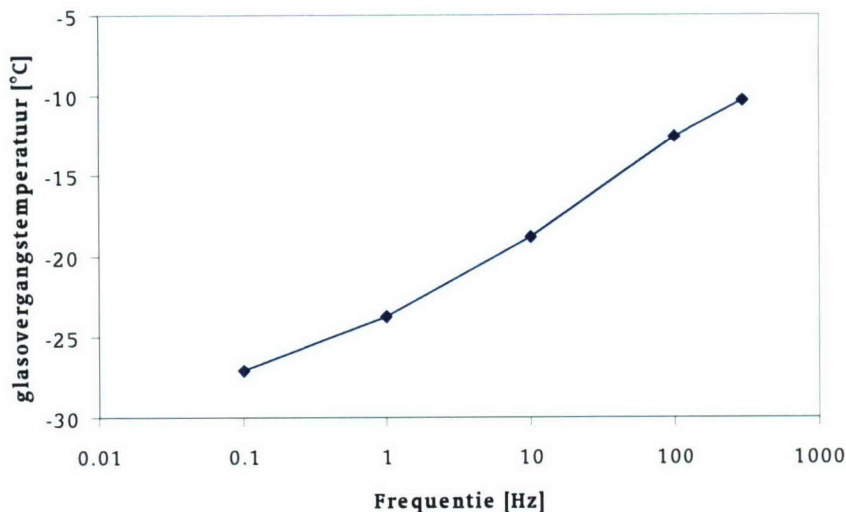
Apparatuur	: Mettler DMA/SDTA 861°
Temperatuurrange	: -100 °C → 150 °C
Opwarmingsnelheid	: 1 °C/min
Nominale afmetingen sample	
Diameter	: 3 mm
Dikte	: 1,8 mm
Type belasting	: shear
Force amplitude	: 1 N
Displacement amplitude	: 1 µm
Frequentie	: 300 - 0,1 Hz

De resulterende curves zijn weergegeven in figuur 71.



Figuur 71 Frequentieafhankelijk gedrag van O-ringen uit houder nr. 25 voor seingranaat nr. 65.

Zoals verwacht verschuift T_g als functie van de frequentie naar hogere waarden. Deze verschuiving wordt nog eens verduidelijkt in figuur 72, waarin de T_g (bepaald aan de hand van de top van de tan delta curve) als functie van de frequentie staat weergegeven.



Figuur 72 T_g verandering als functie van mechanische trillingsfrequentie.

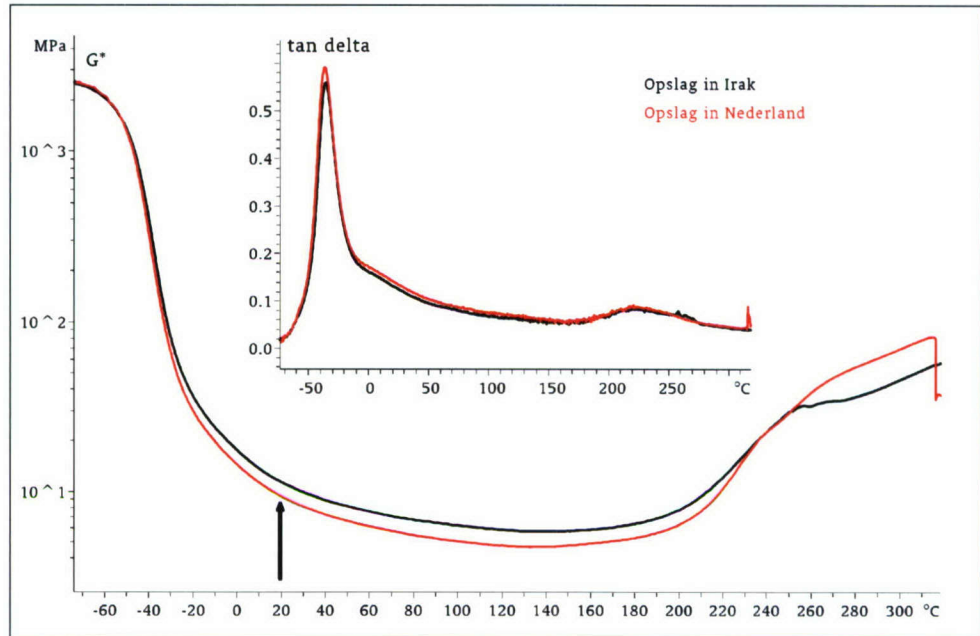
Hierin is duidelijk te zien hoe de glasovergangstemperatuur wordt beïnvloed door de opgelegde mechanische frequentie. Dit verband heeft belangrijke consequenties. Mogelijkerwijs schuift de glasovergangstemperatuur naar kritische waarden bij nog hogere frequenties waarbij de O-ring zijn rubberachtige karakter verliest bij een hogere temperatuur dan verwacht. De hogere stijfheid kan leiden tot broser worden van de O-ring, waardoor breuk gemakkelijker kan optreden. Overigens wordt dit effect bij veel materialen voorkomen door de toevoeging van bepaalde hulpstoffen. Zolang echter de compositie van het rubber van de O-ring niet bekend is, is hier niets over te zeggen.

10.7 Retourmunitie

Uit 60 mm mortiermunitie (beschikbaar gesteld door de KM) is de rubber O-ring waarvan TNO het type polymeer niet heeft kunnen vaststellen en bepalen op basis van beschikbare informatie. De ring komt uit het bodemstuk en is onderzocht op mechanische eigenschappen. Hierbij werd een vergelijking gemaakt tussen artikelen die een bepaalde tijd in Irak waren opgeslagen en artikelen uit een opslag in een bunker in Nederland. Doel was om te kijken in hoeverre de opslag in Irak invloed zou hebben op het dynamisch mechanisch gedrag van deze O-ring. Hiertoe is een aantal DMA-experimenten in duplo uitgevoerd onder de volgende meetcondities:

Apparatuur	: Mettler DMA/SDTA 861°
Temperatuurrange	: -75 °C → 500 °C
Opwarmingsnelheid	: 1 °C/min
Nominale afmetingen sample	
Diameter	: 2 mm
Dikte	: 1,3 mm
Type belasting	: shear
Force amplitude	: 1 N
Displacement amplitude	: 1 µm
Frequentie	: 1 Hz

Representatieve curven zijn weergegeven in figuur 73.



Figuur 73 DMA curven van O-ringen, opgeslagen in Irak en in Nederland.

In tabel 35 zijn de meetresultaten weergegeven uit figuur 76.

Tabel 39 Meetresultaten DMA meting O-ring, opgeslagen in Irak en Nederland.

	Nederland		Irak	
G* bij 20 °C [MPa]	9,3	7,8	11,3	10,6
Tg [°C]	-37,3	-36,5	-36,8	-36,6

Ook hier wordt duidelijk dat de gemeten parameters niet sterk veranderen als functie van de veroudering zoals in dit geval tijdens opslag in Irak. De glasovergangstemperatuur verandert nauwelijks en de modulus bij 20 °C stijgt slechts licht. Dit zal naar alle waarschijnlijkheid geen invloed hebben op de afdichtende werking van de O-ring. Hierbij moet worden opgemerkt dat niet bekend is hoe de munitieartikelen waren opgeslagen in Irak. Mocht het geconditioneerde opslag betreffen, dan spreekt het voor zich, dat de materiaalparameters niet al te zeer verschillen met die van de artikelen die in Nederland waren opgeslagen.

10.8 Overzicht gebruikstemperaturen en chemische belasting

In onderstaande tabel 40, is een overzicht gegeven van de gebruikstemperaturen van verschillende rubber soorten in een passieve (geen druk, geen chemische invloed) belasting.

Tabel 40 Gebruikstemperaturen voor polymeren.

Document ID	Description	Temp min [°C]	Temp max [°C]
ML-PRF-23586 F(2)	silicone rubber	-55	230
ML-S-4303C NOT 2	DUNA-N (nitrile) (ND 3)	-22	110
ML S 46897E NOT 1	polyurethane foam	E4	93
ML-C-47121 NOT 1	polysulfide rubber	-F4	117
ML-S-29574(1)	polythioether	-E2	1E0
ML-S-48112 NOT 1	butylrubber	-E4	1C7
M33213A NOT 2	fluorosilicone rubber	-EC	1E0
SAE-AMS3684	polyimide	250	315
SAE-AMS7255	tetrafluoroethylene/propylene rubber (FEPM)	-1E	2E0
SAE-AMS7257	perfluorocarbon (TFM) rubber	-2C	220
SAE-AMS7259	fluorocarbon (FKM) rubber	-2B	2L4
SAE-AMS7261	phosphonitrilic (FZ) fluoropolymer	-EE	150
SAE-AMS7262	ethylene propylene (EPM) rubber	-EE	130
ML-S-21481	neoprene rubber	-4E	120
ML-P-70341(1) NOT 2	polytetrafluoroethylene (PTFE)	-250	4E0
SAE-AMS3217E	fluorosilicone	-EL	2E0

Uit de tabel blijkt dat bij een ‘passieve’ belasting de kans op problemen minimaal is, al kunnen temperaturen tot -35 °C bij arctische oefeningen wel optreden. Op basis van deze tabel is nog geen uitspraak te doen, bij een belasting onder druk en/of chemische belasting (zie tabel 41). Deze gewenste informatie wordt ook niet door de fabrikanten gegeven.

Tabel 41 Chemische invloed op polymeren.

Materiaal afdichting	HNO3	CH2O	CO	H2	NH4Cl	HCl	NH3	NOx	N2O	N2O4	H2O
Fluorocarbon	-	4	4	4	4	-	1	2	4	4	3
Nitrile	1	-	4	-	4	-	4	2	4	4	4
Polyurethane	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-
Styrene Butadiene	1	-	3	3	4	1	4	-	-	4	3
Buna-N (Nitrile)	1	4	4	4	3	1	4	-	-	4	4
Fluorosilicone	-	-	3	2	1	-	-	4	-	4	4
Natural Rubber	1	-	2	3	4	-	4	4	-	4	4
Polyacrylate	1	-	-	3	4	1	1	1	-	4	1
Polyurethane	-	2	4	4	3	2	3	4	-	4	4
Teflon, Virgin	4	-	4	4	4	-	4	-	-	1	4
Butyl	1	4	4	4	4	4	4	4	-	3	4
Ethylene-Propylene	-	4	4	4	4	2	4	4	4	-	4
Neoprene	-	1	4	4	4	1	4	-	-	4	3
Polysulfide	1	3	1	-	4	1	4	-	-	4	1
Silicone	-	-	4	2	2	-	4	3	4	4	3

- 1 slecht, niet aanbevelen;
- 2 allen als ‘passieve’ afdichting;
- 3 redelijk;
- 4 goed, geen compatibiliteitsprobleem.
- geen data beschikbaar.

Op basis van tabel 41 blijkt dat er vooral bij salpeterzuur (HNO_3) en zoutzuur (HCl) problemen te verwachten zijn. En dat zijn juist de stoffen die gevormd worden uit de ontledingsproducten van de toegepaste energetische materialen, als vuurwapenkruit, pyrotechniek en stuwstoffen.

10.9 Conclusie

Alle afdichtingen die in dit onderzoek zijn meegenomen vertonen slechts kleine veranderingen als gevolg van de verouderingscondities. Dit zou kunnen betekenen dat de toebedachte functionaliteitsverslechtering niet of nauwelijks optreedt bij deze afdichtingen. In dit onderzoek is echter slechts een beperkt aantal parameters gemeten. Deze parameters geven weliswaar een redelijk compleet beeld van de dynamisch mechanische eigenschappen van het materiaal, maar beschrijven (of voorspellen) niet het volledige gedrag van de afdichtingen tijdens gebruik en op lange termijn. Uit de frequentieafhankelijke metingen blijkt al dat de tijdsfactor een belangrijke rol speelt in de interpretatie van mechanische eigenschappen van de hier onderzochte materialen en van polymeren in het algemeen. Toch kan geconcludeerd worden dat de hier onderzochte afdichtingen hun functionaliteit waarschijnlijk zullen behouden tijdens de levensduur van de betreffende artikelen.

Voor wat betreft de 40 mm artikelen zou het buismateriaal wat meer aandacht verdienen. De mogelijkheid bestaat dat het buismateriaal en de ballistische kap een rol spelen voor wat betreft de waterdampdoorlaatbaarheid van het artikel. Aangezien de aanwezigheid van water(damp) in het artikel hier serieuze consequenties heeft (vorming van waterstofgas) moet duidelijk zijn in hoeverre de materialen waaruit de onderdelen van het artikel bestaan, waterdampdoorlaatbaar zijn. Vervolgonderzoek zou dit uit kunnen wijzen.

Inzake het juist functioneren van diverse polymeren als afdichting onder actieve belasting danwel in relatie tot de chemische resistentie is alleen algemene informatie beschikbaar. Een manco in deze is nog het bekend zijn van de daadwerkelijke compositie zoals gebruikt in het artikel, als ook de invloed van ontledingsproducten. Dit tezamen geeft de wens aan voor nader onderzoek aan dit aspect, om ook bij de combinatie (zoals bij out-of-area missies) van hoge temperaturen en chemische belasting een onderbouwde uitspraak te doen.

11 Ondertekening

Rijswijk, december 2006

TNO Defensie en Veiligheid



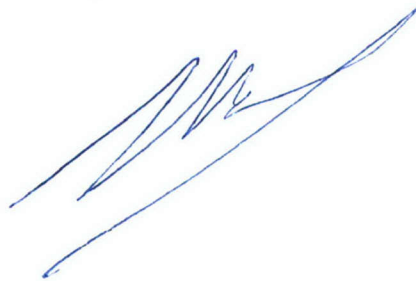
dr. ir. J.L. Verolme
Groepshoofd



ing. W.P.C. de Klerk



ir. H.L.J. Keizers
Programmaleider V012



ir. M.N. Boers
Auteur



drs. W. Colpa
Auteur



ing. A.C. Hordijk
Auteur



ing. G. Herder
Auteur



ing. J.J.T.G. Weijl
Auteur

ONGERUBRICEERD
REPORT DOCUMENTATION PAGE
(MOD-NL)

1. DEFENCE REPORT NO (MOD-NL) TD2006-0156	2. RECIPIENT'S ACCESSION NO	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO TNO-DV 2006 A477
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO 014.15046	5. CONTRACT NO A00KL400	6. REPORT DATE December 2006
7. NUMBER OF PAGES 128 (excl RDP & distribution list)	8. NUMBER OF REFERENCES -	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Final
10. TITLE AND SUBTITLE Report of POEMA-2 (Function Failure Analysis, Database, Electronics and Sealings) (Rapportage POEMA-2 (Functie Faalanalyse, Database, Elektronica en Afdichtingen))		
11. AUTHOR(S) W.P.C. de Klerk, MSc, W. Colpa, MSc, M.N. Boers, MSc, G. Herder, BSc, A.C. Hordijk, BSc and J.J.T.G. Weijl, BSc		
12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) TNO Defence, Security and Safety, P.O. Box 45, 2280 AA Rijswijk, The Netherlands Lange Kleiweg 137, Rijswijk, The Netherlands		
13. SPONSORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) LBB-ABWM, P.O. Box 1000, 8084 ZX 't Harde, The Netherlands		
14. SUPPLEMENTARY NOTES The classification designation Ongerubriceerd is equivalent to Unclassified, Stg. Confidentieel is equivalent to Confidential and Stg. Geheim is equivalent to Secret.		
15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS (1044 BYTE)) Lifetime of ammunition is influenced by external conditions like the climate. Not only the energetic part of the article will be the critical one, also items as sealings or electronics could have a large impact on the safe and functional lifetime. To keep this information available, a database is set up which could act as a main input parameter for the function-failure-analysis (FFA).		
16. DESCRIPTORS FFA, Functionality, Munition, Ageing, Electronics, Sealings	IDENTIFIERS -	
17a. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT) Ongerubriceerd	17b. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE) Ongerubriceerd	17c. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT) Ongerubriceerd
18. DISTRIBUTION AVAILABILITY STATEMENT Unlimited Distribution	17d. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES) Ongerubriceerd	

ONGERUBRICEERD

Distributielijst

Onderstaande instanties/personen ontvangen een volledig exemplaar van het rapport.

- 1 DMO/SC-DR&D
standaard inclusief digitale versie bijgeleverd op cd-rom
- 2/3 DMO/DR&D/Kennistransfer
- 4 Programmabegeleider Defensie
ing. H. Hoeneveld, LBBKL
- 5 Ministerie van Defensie, Oldenbroek, KL, Afdeling Beproevingen Wapens en Munitie, Projectbegeleider Defensie
dr. ir. C.D. Sagel-Ransijn
- 6/8 Bibliotheek KMA
- 9 TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Rijswijk
Manager Bescherming, Munitie en Wapens (operaties), ir. P.J.M. Elands
- 10 TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Rijswijk,
Bescherming, Munitie en Wapens (kennis), ir. W. Karthaus
- 11 TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Rijswijk,
Bescherming, Munitie en Wapens (markt), dr. ir. L.H.J. Absil
- 12 Programmaleider TNO Defensie en Veiligheid
ir. H.L.J. Keizers
- 13/14 TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Rijswijk,
Informatie- en Documentatiedienst
- 15 Ministerie van Defensie, Den Haag, KLu
Lkol J. Paap
- 16 Ministerie van Defensie, Den Haag, KLu
Elt. L.J.J.W.G Verhoeven
- 17 Ministerie van Defensie, Den Helder, KM
ing. M.E. de Koning
- 18 Ministerie van Defensie, Utrecht, KL
Kapt. ing. R. Liebrechts
- 19/25 TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Rijswijk,
Business Unit Bescherming, Munitie en Wapens,
ir. M.N. Boers, ing W.P.C. de Klerk, dr. A.E.D.M. van der Heijden,
drs. W. Colpa, ing. A.C. Hordijk, ing. G. Herder en ing. J.W. Weijl

Onderstaande instanties/personen ontvangen het managementuittreksel en de distributielijst van het rapport.

- 4 ex. DMO/SC-DR&D
- 1 ex. DMO/ressort Zeesystemen
- 1 ex. DMO/ressort Landsystemen
- 1 ex. DMO/ressort Luchtsystemen
- 2 ex. BS/DS/DOBBP/SCOB
- 1 ex. MIVD/AAR/BMT
- 1 ex. Staf CZSK
- 1 ex. Staf CLAS
- 1 ex. Staf CLSK
- 1 ex. Staf KMar
- 1 ex. TNO Defensie en Veiligheid, Algemeen Directeur,
ir. P.A.O.G. Korting
- 1 ex. TNO Defensie en Veiligheid, Directie
Directeur Operaties, ir. C. Eberwijn
- 1 ex. TNO Defensie en Veiligheid, Directie
Directeur Kennis, prof. dr. P. Werkhoven
- 1 ex. TNO Defensie en Veiligheid, Directie
Directeur Markt, G.D. Klein Baltink
- 1 ex. TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Den Haag,
Manager Waarnemingssystemen (operaties), dr. M.W. Leeuw
- 1 ex. TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Den Haag,
Manager Informatie en Operaties (operaties), drs. T. de Groot
- 1 ex. TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Rijswijk,
Manager BC Bescherming (operaties), ir. R.J.A. Kersten
- 1 ex. TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Soesterberg,
Manager Human Factors (operaties), drs. H.J. Vink

