TNO Defensie en Veiligheid

Nederlandse Organisatie voor
toegepast-natuurwetenschappelijk
onderzoek / Netherlands Organisation
for Applied Scientific Research

Lange Kleiweg 137
Postbus 45
2280 AA Rijswijk

www.tno.nl

T +31 15 284 30 00
F +31 15 284 39 91
info-DenV@tno.nl

TNO-rapport

TNO-DV 2008 A357

Inventarisatie van materialen te gebruiken in constructies ter afscherming van explosie-effecten

Datum	november 2008
Auteur(s)	ir. O.C. van der Jagt
Rubricering rapport	Ongerubriceerd
Vastgesteld door	LTZ1 ing. J. de Ruiter
Vastgesteld d.d.	24 september 2008
Titel	Ongerubriceerd
Managementuittreksel	Ongerubriceerd
Samenvatting	Ongerubriceerd
Rapporttekst	Ongerubriceerd
Exemplaarnummer	8
Oplage	11
Aantal pagina's	44 (excl. RDP & distributielijst)
Aantal bijlagen	-

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.

© 2008 TNO

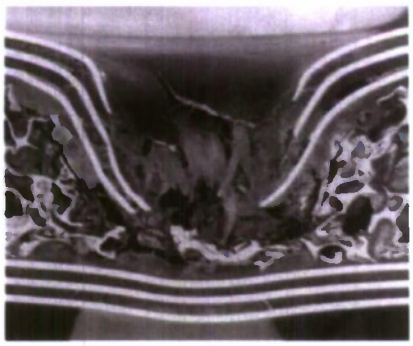
20090213213

AQ F09-05-01880

TNO | Kennis voor zaken

Inventarisatie van materialen te gebruiken in constructies ter afscherming van explosie-effecten

Tijdens ruimingen van IED's in binnen- en buitenland heeft de EOD niet de mogelijkheid om grote bouwkundige constructies op te richten zoals deze gebruikt worden in Nederland tijdens het ruimen van een UXO.
Daarom wordt binnen programma V701 onderzoek gedaan worden naar nieuwe mogelijkheden op het gebied van afschermingconstructies die gebruikt kunnen worden tijdens de verschillende ruimingoperaties (UXO's en IED's). Deze literatuurstudie is erop gericht om in kaart te brengen wat de recente ontwikkelingen zijn op het gebied van nieuwe materialen en in het bijzonder of deze nieuwe materialen potentie hebben toegepast te worden in constructies om de explosie-effecten van UXO's en IED's te reduceren.



Probleemstelling

In 2007 is een doelfinancieringsprogramma V701 gestart met als titel 'Verhogen van doelmatigheid en veiligheid van EOD-operaties tegen IED's en UXO's'. Dit programma is ondermeer gericht op het ontwikkelen van nieuwe constructies om de explosie effecten van UXO's en IED's te reduceren. Eén van de onderzoeksvragen die wordt beantwoord binnen werkpakket 4000 van V701 is:

Welke materialen kunnen gebruikt worden voor de ontwikkeling van mobiele afschermingconstructies? Dit rapport beantwoordt deze vraag.

Beschrijving van de werkzaamheden

Er is gestart met een internet scan om informatie over materiaalgebruik van huidige state-of-art afschermingconstructies te verzamelen. Van acht commercieel verkrijgbare concepten is het toegepaste materiaal zo veel mogelijk achterhaald. Daarna is door middel van een literatuuronderzoek in kaart gebracht wat relevante ontwikkelingen zijn op het gebied van materiaalonderzoek. Om dit literatuuronderzoek richting te geven zijn enkele top-level constructie-eisen opgesteld. Alleen materialen met de potentie om scherven af te vangen en/of de (effecten van) blast te reduceren zijn in ogenschouw genomen.

Resultaten en conclusies

Huidige concepten gebruiken 'traditionele' materialen zoals staal, beton, zand, water, vezelversterkte kunststoffen en keramiek. Op grond van het materiaalgebruik in huidige concepten en deze literatuurstudie kan worden geconcludeerd dat er recentelijk geen materialen zijn ontwikkeld die tot grote doorbraken hebben geleid op het gebied van bescherming tegen explosie-effecten. Materialen worden wel doorontwikkeld, maar dit is evolutionair en niet revolutionair. Een duidelijke trend die waarneembaar is, is dat steeds meer materialen gecombineerd worden in composieten, laminaten of sandwichconstructies. Zo probeert men om tot een optimale mix van eigenschappen te komen. Het gebruik van polyurethaan en polyurea in dit soort combinaties komt veelvuldig voor. Bij het ontwikkelen van sandwichconstructies wordt ook onderzoek gedaan

naar constructieve mogelijkheden om energie op te nemen.

Toepasbaarheid

De inventarisatie van materialen in dit rapport zal gebruikt worden als basis voor het ontwikkelen van nieuwe afscherming-concepten binnen V701 om explosie-effecten te reduceren. Om tot een efficiënte en effectieve constructie te komen, is het van groot belang een goed pakket van eisen en wensen te formuleren. De gebruiker moet hierin een grote rol krijgen. De materiaal-keuze moet dan ook in de context van het pakket van eisen worden gezien. Vorm, productieproces, maar ook bijvoorbeeld kosten en verkrijgbaarheid, zijn daarom ook van groot belang.

PROGRAMMA	PROJECT
Programmabegeleider Ikol R. Pijtak, EOC-KL	Projectbegeleider LTZ1 ing. J. de Ruiter, EOC-KL
Programmaleider ir. J.R. van Deursen, TNO Defensie en Veiligheid, businessunit Bescherming, Munitie en Wapens, afdeling Explosies, Ballistiek en Bescherming	Projectleider ir. O.C. van der Jagt, TNO Defensie en Veiligheid, businessunit Bescherming, Munitie en Wapens, afdeling Energetische Materialen
Programmatitel Verhogen van doelmatigheid en veiligheid van EOD-operaties tegen IED's en UXO's	Projecttitel Bureaustudie nieuwe materialen voor afschermingconstructies
Programmanummer V701	Projectnummer 032.12274
Programmaplanning Start 1 januari 2007 Gereed 31 december 2010	Projectplanning Start 1 januari 2007 Gereed 31 december 2009
Toezichthouder -	
Frequentie van overleg Met de programma/projectbegeleider werd enkele malen gesproken over de invulling en de voortgang van het onderzoek.	Projectteam ir. O.C. van der Jagt, ir. J.R. van Deursen

Contact en rapportinformatie

Lange Kleiweg 137
Postbus 45
2280 AA Rijswijk

T +31 15 284 30 00
F +31 15 284 39 91

info-DenV@tno.nl

TNO-rapportnummer
TNO-DV 2008 A357

Opdrachtnummer
-

Datum
november 2008

Auteur(s)
ir. O.C. van der Jagt

Rubricering rapport
Ongerubriceerd

Samenvatting

Bij het ruimen van groot kaliber UXO's, zoals vliegtuigbommen, wordt op dit moment een containeropstelling toegepast om de effecten en gevolgen voor de omgeving bij een accidentele detonatie te reduceren. Voor kleine munitie artikelen zal een dergelijk grote beschermingsconstructie niet worden opgebouwd daar dat te veel tijd kost. Voor de kleine munitie artikelen en IED's is het echter gewenst om een mobiele modulaire afschermingconstructie toe te kunnen passen.
Recente ontwikkelingen op het gebied van materialen zouden mogelijkerwijs kunnen leiden tot betere afschermingconstructies die geplaatst kunnen worden bij het ruimen van UXO's en IED's. Binnen WP4000 uit het programma V701 zal een concept afschermingconstructie ontwikkeld worden.

Doel van deze literatuurstudie is in kaart te brengen wat de recente ontwikkelingen zijn op het gebied van nieuwe materialen en in het bijzonder of deze nieuwe materialen potentie hebben toegepast te worden in constructies om de explosie effecten van UXO's en IED's te reduceren. De literatuurstudie zal zich richten op een *inventarisatie* van gebruikte en/of onderzochte materialen of materiaalcombinaties.

Om te bepalen welke materialen interessant zijn, en waar de literatuurstudie zich op moet richten, moet de behoefte van de EOD voor de constructie dus goed in kaart worden gebracht. Dit resulteert in een programma van eisen aan de constructie, en daarmee in eisen aan materialen. Om de literatuurstudie richting te geven zijn door TNO enkele top-level constructie-eisen gedefinieerd.
Aangezien er in de markt reeds explosiebestendige/mitigerende producten worden aangeboden, is hier een kort onderzoek naar gedaan. Hierbij is er gekeken naar de toegepaste materialen. De effectiviteit van deze producten is niet beoordeeld.

Op grond van deze literatuurstudie kan worden geconcludeerd dat er recentelijk geen materialen zijn ontwikkeld die tot grote doorbraken hebben geleid op het gebied van bescherming tegen explosie-effecten. Huidige concepten gebruiken 'traditionele' materialen zoals staal, beton, zand, water, vezelversterkte kunststoffen en keramiek. Materialen worden wel doorontwikkeld, maar dit is evolutionair en niet revolutionair. Een duidelijke trend die waarneembaar is, is dat steeds meer materialen gecombineerd worden in composieten, laminaten of sandwichconstructies. Zo probeert men om tot een optimale mix van eigenschappen te komen. Het gebruik van polyurethaan en polyurea in dit soort combinaties komt veelvuldig voor. Bij het ontwikkelen van sandwichconstructies wordt ook onderzoek gedaan naar constructieve mogelijkheden om energie te dissiperen.

De inventarisatie van materialen in dit rapport zal gebruikt worden als basis voor het ontwikkelen van nieuwe afschermingconcepten binnen V701 om explosie-effecten te reduceren. Om tot een efficiënte en effectieve constructie te komen, is het van groot belang een goed pakket van eisen en wensen te formuleren. De gebruiker moet hierin een grote rol krijgen. De materiaalkeuze moet dan ook in de context van het pakket van eisen worden gezien. Vorm, productieproces, maar ook bijvoorbeeld kosten en verkrijgbaarheid, zijn daarom ook van groot belang.

Summary

To mitigate effects to the surroundings of an accidental detonation of UXOs, like aircraft bombs, during disposal of such items, the Dutch EOD applies a container structure. For the disposal small ordnance, the construction of such a container structure is too time consuming. To assure a safe disposal of small ordnance and IEDs, a mobile, modular mitigating structure is desired.
Recent developments in material science may lead to better mitigating structures for the disposal of UXOs and IEDs. Within the framework of Work Package 4000 of the MOD program V701, a new concept mitigating structure will be developed.

The goal of this literature study is to survey recent developments in material science and especially if any new material has the potential to be used successfully in explosive effects mitigating structures caused by UXOs or IEDs. This literature study aims to make an inventory of materials used in explosion effects mitigating structures and studied materials or material combinations.

To give direction to the study, top-level structural requirements have been defined, based on the needs of the user. Some explosive effects mitigating structures are currently commercially available. The use of materials in these structures has been investigated. The effectiveness of the structures has not been established.

The conclusion of this literature study is that no new breakthrough developments in the field of material science have occurred recently, that have lead to new concepts in explosive effects mitigating structures. Current structures use 'traditional' materials like steel, concrete, sand, water, fibre reinforced plastics and ceramics.
There is progress in material development, but this is evolutionary, not revolutionary. A trend that can be established is the frequent use of combinations of materials in composites, laminates or sandwich structures. The purpose of this is to come to an optimal mix of material properties. The use of polyurethane and polyurea in these combined materials occurs frequently. Within the research of sandwich structures possibilities to use structural properties to dissipate energy is encountered regularly.

The material inventory of this report will used as a basis for the development of new explosion effects mitigating concepts within the program V701. To come to an efficient and effective structure, it is imperative to have a complete list of requirements. The end-user must have a major role in establishing this list of requirements. The choice of materials must be seen in the context of this list of requirements. Shape, production process, and also costs and material availability are important factors.

Inhoudsopgave

Managementuittreksel **2**

Samenvatting **4**

Summary **5**

Lijst met afkortingen **7**

1 Inleiding **8**
1.1 Achtergrond 8
1.2 Doel 8
1.3 Aanpak 8

2 Bestaande concepten voor explosiebestendige constructies **11**
2.1 Afschermingconstructies 11
2.2 Transportcontainers 13
2.3 Bombestendige afvalcontainers 15
2.4 Samenvatting gebruik materialen in bestaande concepten 16

3 Materialen te gebruiken in constructies ter afscherming van explosie effecten **18**
3.1 Vezelversterkte materialen 20
3.2 Metalen 22
3.3 Sandwich materialen 23
3.4 Laminaten 28
3.5 Energie absorberende materialen en concepten 31
3.6 Toevoegingen 35
3.7 Samenvatting 37

4 Conclusies **39**

5 Referenties **40**

6 Ondertekening **44**

Lijst met afkortingen

EEM	Eindige Elementen Methode
EOD	Explosieven Opruimings Dienst
FAA	Federal Aviation Authority
FML	Fibre Metal Laminates
FSP	Fragment Simulating Projectile
HE	High Explosive
IED	Improvised Explosive Device
KMC	Keramisch Matrix Composiet
MMC	Metaal Matrix Composiet
PBO	Poly(*p*-phenylene-2,6-BenzobisOxazole)
PE	Poly Ethyleen
PIPD	Poly{2,6-diImidazo[4,5-*b*:4',5'-*e*]Pyridinylene-1,4-(2,5-Dihydroxy)phenylene}
PMMA	Polymethylmethacrylaat
PP	Poly Propyleen
PU	Poly Urethaan
PVC	Poly Vinyl Chloride
RPF	Rigid Polyurethane Foam
STF	Shear Thickening Fluid
TNT	Tri-Nitro Tolueen
UHMWPE	Ultra High Moleculair Weight Poly Ethyleen
UXO	UneXploded Ordnance
VVK	Vezelversterkte Kunststoffen

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

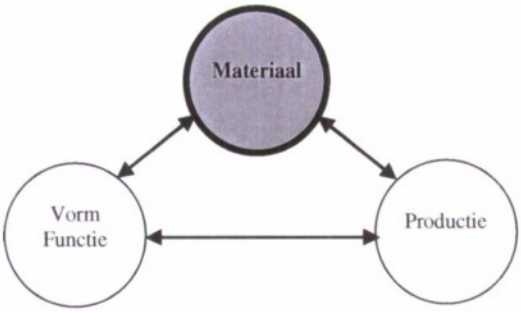
In Nederland wordt nog dagelijks munitie, variërend van relatief kleine munitie artikelen, zoals handgranaten en mortiergranaten, tot grote vliegtuigbommen uit de Tweede Wereldoorlog gevonden. In het kader van de derde hoofdtaak van Defensie worden deze munitieartikelen door de EOD onschadelijk gemaakt. Tevens wordt de ondersteuning en kennis van de EOD ingeschakeld bij het neutraliseren van IED's.
Het neutraliseren van IED's vindt zowel nationaal als internationaal, in het kader van internationale vredesmissies, plaats. Bij het ruimen van groot kaliber UXO's, zoals vliegtuigbommen, wordt op dit moment een containeropstelling toegepast om de effecten en gevolgen voor de omgeving bij een accidentele detonatie te reduceren. Voor kleine munitie artikelen zal een dergelijk grote beschermingsconstructie niet worden opgebouwd daar dat te veel tijd kost. Voor de kleine munitie artikelen en IED's is het echter gewenst om een mobiele modulaire afschermingconstructie toe te kunnen passen.
De ontwikkeling van nieuwe materialen, die ook kunnen worden toegepast voor het afschermen van explosie-effecten, heeft in het verleden al geleid tot nieuwe concepten, bijvoorbeeld de Episafe.
Recente ontwikkelingen op het gebied van materialen zouden mogelijkerwijs kunnen leiden tot betere afschermingconstructies die geplaatst kunnen worden bij het ruimen van UXO's en IED's. Binnen WP4000 uit het programma V701 zal een concept afschermingconstructie ontwikkeld worden.

1.2 Doel

Doel van deze literatuurstudie is in kaart te brengen wat de recente ontwikkelingen zijn op het gebied van nieuwe materialen en in het bijzonder of deze nieuwe materialen potentie hebben toegepast te worden in constructies om de explosie effecten van UXOs en IEDs te reduceren. De literatuurstudie zal zich richten op een *inventarisatie* van gebruikte en/of onderzochte materialen of materiaalcombinaties.

1.3 Aanpak

De gegevens uit deze literatuurstudie zullen worden gebruikt bij het ontwikkelen van nieuwe concepten die de explosie effecten van UXO's en IED's reduceren. Het gaat hierbij dus om constructies. Tussen constructies (vorm/geometrie, vaak voortkomend uit de functie), de daarin gebruikte materialen en het gebruikte productieproces zit een sterke samenhang (zie figuur 1).



Figuur 1 Samenhang vorm, materiaal en productie (vrij naar [1]).

1.3.1 *Programma van eisen*

Om te bepalen welke materialen interessant zijn, en waar de literatuurstudie zich op moet richten, moet de behoefte van de EOD voor *de constructie* dus goed in kaart worden gebracht. Dit resulteert in een programma van eisen aan de constructie, en daarmee in eisen aan materialen.
Om de literatuurstudie richting te geven zijn door TNO enkele top-level constructie-eisen gedefinieerd:

- snel op te zetten;
- modulair;
- licht van gewicht.

Deze top-level eisen zijn zeker nog niet volledig en zullen moeten worden uitgebreid en verfijnd. Dit zal worden uitgevoerd in werkpakket 4200 van programma V701.

1.3.2 *In kaart brengen van bestaande concepten en gebruikte materialen ('state-of-art')*

Aangezien er in de markt reeds explosiebestendige/mitigerende producten worden aangeboden, is hier een kort onderzoek naar gedaan. Hierbij is er gekeken naar de toegepaste materialen. Via searches op internet en een beperkte literatuurstudie zijn de volgende concepten van relevante explosiebestendige constructies gevonden. Van deze concepten zijn gegevens, vooral wat betreft materiaalgebruik, verzameld:

- Episafe;
- Belfortex;
- Glare Aircraft Baggage Container;
- Wastelift;
- RPI Blastec;
- American Innovations;
- Waterwall;
- Blastwrap/Blastgard.

De effectiviteit van deze producten wordt niet beoordeeld.

1.3.3 *Literatuurstudie naar materialen*

Op basis van de top-level eisen en gebruikte materialen in bestaande concepten zijn de volgende interessante materialen gedefinieerd (tussen de haakjes staan voorbeelden vermeld; deze komen niet noodzakelijkerwijs allemaal aan bod in deze studie):

- Vezels (polymeren, glas, keramiek, metaal).
- Matrix (polymeren, elastomeren, metalen, keramiek).
- Vezelversterkte materialen (combinatie van eerder genoemde vezels en matrices).
- Metalen (onder andere nieuwe legeringen).

- Gelaagde materialen (vezel-metaal laminaten (Glare), metaal laminaten, polymeer-metaallaminaten (Hylite)).
- Sandwich materialen (kern, huid, verbindingsmateriaal) (sandwichmaterialen zijn intrinsiek al een constructie).
- Energie absorberende materialen en concepten (water, zand, gel, klei, elastomeren, schuim).
- Toevoegingen (nano-deeltjes: silica, koolstof).

1.3.4 Indeling rapport

Hoofdstuk 2 beschrijft de bestaande explosie effect mitigerende concepten en in hoofdstuk 3 wordt het resultaat van de literatuurstudie gepresenteerd. Hoofdstuk 4 bevat de conclusies.

2 Bestaande concepten voor explosiebestendige constructies

De bestaande concepten die besproken worden kunnen grofweg worden ingedeeld in drie categorieën:

1 Afschermingconstructie voor (vermeende) IED's en UXO's.
2 Transportcontainers[1] voor explosieven en (vermeende) IED's.
3 Bombestendige afvalcontainers en constructies.

Opgemerkt wordt dat de opsomming in dit hoofdstuk niet pretendeert volledig te zijn.

2.1 Afschermingconstructies

2.1.1 *Episafe*

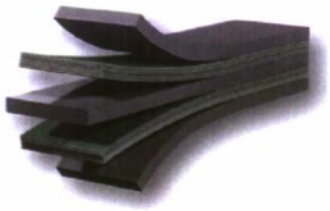
De Episafe is ontwikkeld door het Nederlandse Futura Composites in samenwerking met TNO Defensie en Veiligheid en de Koninklijke Luchtmacht. De Episafe kan worden toegepast bij IED's met een kleine lading, zoals een attachékofferbom. De buisvormige constructie is gemaakt van Dyneema® vezels in een matrix. Deze UHMWPE (Ultra High Molecular Weight Poly Ethylene) vezels hebben een groot vermogen om energie op te nemen.
De constructie is er op gericht om een blastgolf van een explosie naar boven te richten en om fragmenten met name in horizontale richting af te vangen.

Figuur 2 Episafe.

2.1.2 *ECOS3 Aircraft Baggage Container*

Glare® is een vezelmetaallaminaat dat bestaat uit dunne (0.2-0.4 mm) lagen aluminium afgewisseld met lagen glasvezelversterkte kunststof.

[1] Met transportcontainer wordt in dit geval een container bedoeld waarmee een reeds ontdekte (vermeende) IED op een veilige manier naar een andere plaats getransporteerd kan worden.



Figuur 3 Schematische weergave van een vezel-metaallaminaat.

In de Verenigde Staten wordt Glare® geproduceerd door Aviation Equipment, inc. Het bedrijf uit Californië produceert samen met Galaxy Aviation Security L.L.C. (New Yersey) gespecialiseerde bagage containers (LD-3 configuratie). Deze bagage-container voldoet aan de explosie eisen van de FAA (Draft Appendix A van ISO 6517). De ECOS3™ wordt gemaakt van Glare® panelen die op een aluminium frame worden gemonteerd. Tests uitgevoerd door de FAA hebben aangetoond dat de container de effecten van een explosie kunnen weerstaan en het vliegtuig, waarin de container is geplaatst, beschermt. In onderstaande foto's zijn beelden van de container voor en na de explosie gegeven.

Figuur 4 ECOS3™ voor en na een explosietest.

De ECOS3™ is als concept gepatenteerd [2]. Dit patent is vooral gericht op de *constructie* en niet op het gebruikte materiaal. Met name de flensen en de constructie van de hoekverbindingen hebben een andere benadering dan tot dan toe gebruikelijk. Namelijk, in plaats van het steeds maar versterken en daarmee verstijven van de hoekverbindingen, wordt de verbinding wel sterk genoeg gemaakt, maar niet verstijfd. Dit voorkomt het opbouwen van extra spanningen in de verbindingen tijdens een explosie. Dit is gedaan door een beperkte mate van beweging toe te laten.

2.1.3 Waterwall®

Het Waterwall® concept van het Engelse bedrijf Cintec gaat uit van water als middel om fragmenten af te vangen. Het bestaat uit weefsel gecoat met PVC, vergelijkbaar met een springkussen voor kinderen. Het is verkrijgbaar in verschillende vormen en afmetingen (zie figuur 5 voor voorbeelden).
De constructie wordt opgeblazen met lucht, vervolgens geplaatst en gevuld met water. De lucht ontsnapt door een ventiel op het hoogste punt.

Figuur 5 Het Waterwall® concept van Cintec.

Het water werkt als remmend middel voor eventueel vrijkomende fragmenten. Tijdens de explosie zelf zorgt het water dat vrijkomt voor een reductie van de blastgolf.
Cintec claimt dat de piekdruk van de blastgolf met 95% kan worden gereduceerd.

2.2 Transportcontainers

2.2.1 *Belfortex*

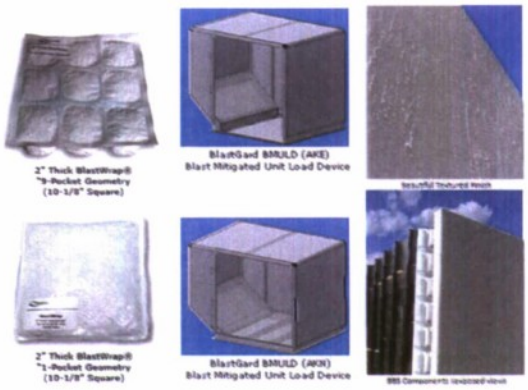
De explosiebestendige container van het Wit-Russische Belfortex is bedoeld om explosieven en IED's veilig te vervoeren naar een plaats waar de explosieven onschadelijk gemaakt kunnen worden. Het bestaat uit een cilindervormige constructie die vast op een aanhangwagen gemonteerd is.
Net als bij de Episafe is het de bedoeling de blastgolf naar boven te richten en fragmenten zoveel mogelijk af te vangen.
De buitenzijde is van metaal, hoogstwaarschijnlijk staal. Aan de binnenzijde is een keramische laag aangebracht. De verpulvering van de keramische laag is een belangrijk mechanisme in de opname van de energie van de explosie.

Figuur 6 Belfortex explosieveilige transportcontainer.

Het hele systeem (inclusief aanhanger) weegt 1890 kg. Belfortex claimt dat het systeem bestand is tegen een explosie van 5 kg TNT eq.

2.2.2 *Blastwrap*

Blastwrap is een verpakking met daarin vulkanisch puimsteen. Deze puimsteen is poreus en in staat om schokgolven te smoren. Doordat het flexibel is, is het in allerlei producten toe te passen zoals luchtvaart bagagecontainers, vuilnisemmers en muren (figuur 7).



Figuur 7 Blastwrap (links) en twee toepassingen: luchtvaartcontainers (midden), en blastgard muur (rechts).

Ook is een explosiebestendige container ontwikkeld op basis van blastwrap (figuur 8).

Figuur 8 Explosiebestendige container gebaseerd op blastwrap.

Blastwrap is er uitdrukkelijk voor bedoeld om de blast te reduceren en de hittestraling af te schermen. Het werkt niet of nauwelijks tegen fragmenten.

2.3 Bombestendige afvalcontainers

2.3.1 *Wastelift*

De Wastelift (figuur 9) is ontwikkeld door de Dijkstra Group B.V. In samenwerking met TNO Defensie en Veiligheid is een explosiebestendige versie ontwikkeld [3].
Een groot deel van de Wastelift bevindt zich ondergronds. Aangezien de Wastelift zich grotendeels ondergronds bevindt, kan bij een ondergrondse explosie de omringende grond ook worden aangemerkt als een explosie effect mitigerend materiaal. Deze prullenbak is ook bestand tegen een explosie bovengronds.

Figuur 9 Wastelift afvalcontainer tijdens een test.

2.3.2 *RPI Blastec*

RPI is een Amerikaans bedrijf gespecialiseerd in het inrichten van buitenruimtes.
Eén van de producten die ze in het assortiment hebben, is de explosiebestendige afvalcontainer Blastec (zie figuur 10).

Figuur 10 RPI Blastec explosiebestendige afvalcontainer.

In tegenstelling tot de Wastelift (paragraaf 2.3.1 op pagina 15) bevindt deze container zich niet ondergronds. De fabrikant claimt dat de container bestand is tegen pijpbomexplosies met een TNT equivalent van 1.65 lbs (ongeveer 0.75 kg).
De container bestaat uit een binnen- en een buitenliner van staal (¼" en ⅜" dik) met daartussen een 'schokabsorberend materiaal'. Het bovendeksel is van aluminium of

glasvezelversterkte kunststof. De afvalcontainer met een inhoud van 132 liter weegt ongeveer 180 kg.

2.3.3 *American Innovations*

American Innovations is eveneens een Amerikaans bedrijf dat een explosiebestendige afvalcontainer maakt. Dit bedrijf maakt niets bekend over de gebruikte materialen of de dreiging waartegen de container bestand is, maar wel dat het concept uit drie 'liners' bestaat en dat de bovenring is gemaakt van gegalvaniseerd staal of roestvast staal.

Figuur 11 Explosiebestendige afvalcontainer van American Innovations Inc.

2.4 Samenvatting gebruik materialen in bestaande concepten

In tabel 1 worden de gebruikte materialen in de beschreven explosie-effect mitigerende concepten samengevat en in tabel 2 staat een overzicht van de fabrikanten en hun websites.

Tabel 1 Materialen in bestaande explosie-effect mitigerende concepten.

		Episafe	Belfortex	ECOS3	Wastelift	RPI Blastec	American Innovations	Waterwall	Blastwrap
Vezel-versterkte kunststof	Dyneema versterkte kunststof	x							
	Glasvezel/thermoharder					x			
	Textielweefsel/PVC							x	
Keramiek			x						
Metaal	Staal, roestvast staal		x				x		
	Aluminium			x		x			
Gelaagde materialen	Glare			x					
	Metaallaminaat					x			
Energie absorberende materialen[1)]	Water, grond, puimsteen				x			x	x

[1)] Hiermee wordt bedoeld niet-constructieve energie absorberende materialen.

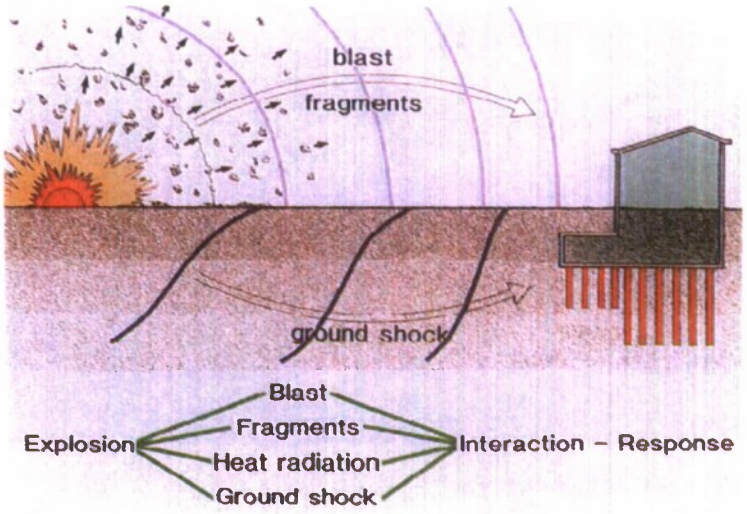
Tabel 2 Fabrikanten en websites.

Naam/omschrijving	Naam fabrikant	Land	Website
Episafe	Futura Composites	Nederland	www.futuracomposites.nl
Bomb containment trailer	Belfortex	Wit-Rusland	www.belfortex.com
ECOS3 Aircraft Baggage Container	Galaxy Aviation	VS	www.galaxyavsec.com
Wastelift	Dijkstra Groep	Nederland	www.wastelift.nl
Blastec	RPI	US	www.rpiweb.com
Blast mitigation trash receptacles	American Innovations	US	www.bombdetection.com
Waterwall	Cintec	UK	www.waterwallblastprotection.com
Blastwrap	Blastgard International Inc.	US	www.blastgardintl.com

Tabel 1 toont aan dat de in de huidige 'state-of-art' producten nog veelvuldig gebruik wordt gemaakt van conventionele beschermende materialen, zoals staal, water, zand. Er wordt slechts sporadisch gebruik gemaakt van vezelversterkte kunststoffen en dan nog vaak in secundaire onderdelen, dat wil zeggen zonder wezenlijke bijdrage aan een mitigerend effect. Uitzonderingen hierop vormen de Episafe en de ECOS3.

3 Materialen te gebruiken in constructies ter afscherming van explosie effecten

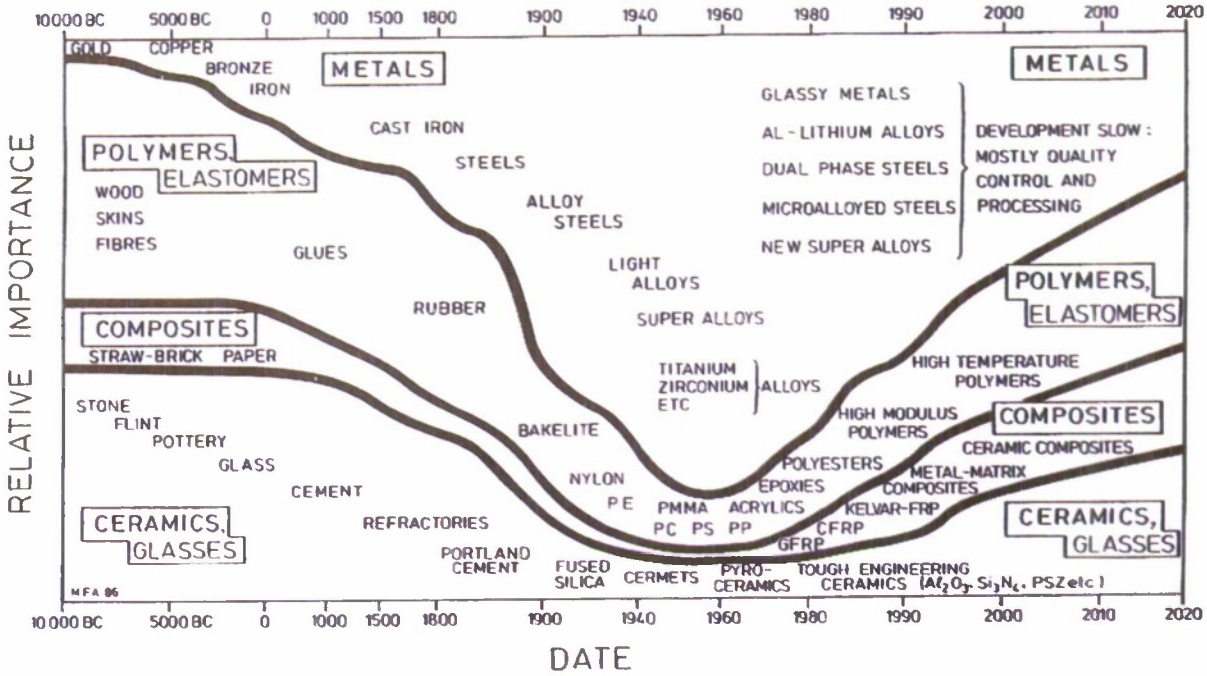
Om gericht een literatuurstudie uit te voeren, moet bekend zijn welke explosie-effecten afgeschermd moeten worden.
In figuur 12 is een schets gegeven van de explosie-effecten van High Explosive (HE)-explosies. De schets is een voorbeeld van een explosie op het maaiveld. Het figuur laat duidelijk het onderscheid zien tussen de explosie-effecten:
- schokgolf (*blast*);
- fragmenten (*fragments*);
- hitte straling (*heat radiation*);
- grondschok (*ground shock*).



Figuur 12 Overzicht explosie effecten.

Om de materialen in kaart te brengen, is gekeken naar de afscherming voor twee effecten, die tot op grootte afstand van de explosie schade/letsel kunnen veroorzaken:
1 blast;
2 fragmenten.

Omdat in deze studie de materialen geïsoleerd van de constructie worden beschouwd, wordt alleen rekening gehouden met de primaire fragmenten, dat wil zeggen met de fragmenten van de IED of UXO zelf.
Er is dus gericht gezocht naar fragmentwerende en blastbestendige of blast-mitigerende materialen. In de literatuur is veel onderzoek gedaan naar de ballistische weerstand van materialen. Ballistische impact is vaak één kogel of Fragment Simulating Projectile (FSP), niet een wolk aan fragmenten. Toch geeft de ballistische weerstand een indicatie van de fragmentwerendheid en zal ook in de literatuurstudie worden meegenomen.



Figuur 13 Evolutie van constructie materialen [1].

Figuur 13 uit [1] geeft een beeld weer van de evolutie van materialen door de eeuwen heen. Wat opvalt, is dat in de laatste decennia het relatieve belang van composieten, polymeren en keramiek toeneemt, ten koste van het belang van metaal. In [1] wordt verwacht dat deze trend zich doorzet.

In [4] is onderzocht welke materiaaltypen het meeste potentieel hebben om bepaalde materiaaleigenschappen met 20-25% te verbeteren in 2020, ten opzichte van de huidige 'state of the art'. Dit is samengevat in tabel 3.

Tabel 3 Potentieel om bepaalde materiaaleigenschappen met 20-25% te verbeteren in 2020, ten opzichte van de huidige 'state of the art' volgens [4].

	Sterkte	Taaiheid	Stijfheid	Dichtheid	Weerstand tegen omgevings-invloeden	Bestendigheid tegen hoge temperaturen
Metalen	Nee	Nee	Nee	Nee	Ja	Ja, stijging met ≈100 °C
MMC's	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja	Nee
Keramische materialen	Ja	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee
KMC's	Ja	Ja	Ja	Ja	Nee	Ja
Polymeren	Ja	Ja	Ja	Nee	Nee	Nee
VVK's	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

MMC = metaal matrix composiet; KMC = keramisch matrix composiet; VVK = vezelversterkte kunststoffen.

Volgens [4] is met name het verbeteren van het productieproces van belang om dit potentieel te ontsluiten. Dit illustreert het belang om vorm/functie, materiaal eigenschappen en productieprocessen integraal te betrekken in het ontwerp (zie ook figuur 1 en [1]).

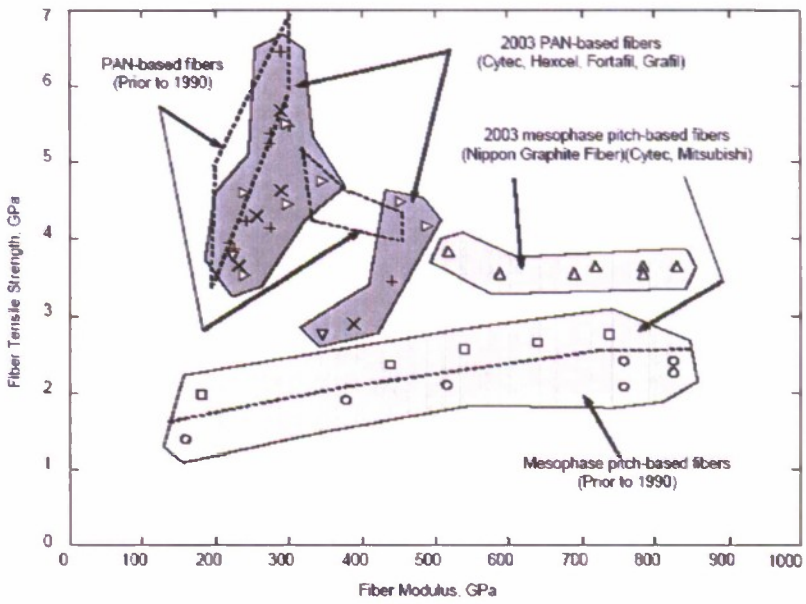
3.1 Vezelversterkte materialen

In dit rapport bekijken we de materialen apart van de constructie. Vezelversterkte materialen vormen een aparte groep, omdat deze zijn opgebouwd uit afzonderlijke materialen. Het gaat hier om vezels ingebed in een matrix. Ontwikkelingen die relevant zijn voor fragment en blastbestendige afschermingconcepten zullen worden besproken. Voor een deel gaat het om ontwikkelingen van vezels, voor een deel om ontwikkelingen van matrix materialen en voor een deel om ontwikkelingen van vezel/matrix combinaties (vezelversterkte materialen).

3.1.1 Vezels

De vezels kunnen worden ingedeeld naar materiaal, maar ook naar vezellengte. Typisch onderscheiden we kort vezelversterkte materialen, waarbij een vezellengte niet langer is dan ongeveer enkele centimeters, en lang vezelversterkte materialen, waarbij de typische lengte van de vezel even lang is als het product, of langer. Verder kunnen we nog onderscheid maken naar willekeurig georiënteerde vezels en georiënteerde vezels, die in een vooraf gekozen richting liggen. Deze indeling heeft vooral te maken met het gekozen productieproces en is van grote invloed op de uiteindelijke product-eigenschappen. Omdat de focus ligt op het materiaal, maken we hier gebruik van een indeling naar materiaalsoort.

Een belangrijke groep polymeer vezels zijn de koolstofvezels. Deze worden al decennia toegepast, met name in de luchtvaart en ruimtevaart, en sinds ongeveer 15 jaar ook in allerlei andere producten, zoals sportartikelen en fietsen. De trend in ontwikkeling is dat gezocht wordt naar sterkere vezels, stijvere vezels, maar vooral goedkopere vezels. Deze trend is evolutionair, niet revolutionair [5]. Dit wordt geïllustreerd door figuur 14.



Figuur 14 Verbetering van de sterkte (Fiber Tensile Strength – y-as) en stijfheid (Fiber Modulus – x-as) van koolstofvezels tussen 1990 en 2003 [5].

Een andere belangrijke groep vezels zijn de anorganische polymeer vezels. Hiertoe behoren bijvoorbeeld aramidevezels (Twaron, Kevlar, etc.), polyethyleenvezels (Dyneema, Spectra, etc.), PBO vezel (Zylon) en PIPD vezel (M5). Deze voorbeelden zullen kort worden besproken.

Aramide en PE vezels worden veelvuldig toegepast in fragment- en kogelwerende vesten en soortgelijke beschermingsmiddelen. In de afgelopen jaren zijn ook hier geen grote stappen gezet en kan gesproken worden van een evolutie. Veel onderzoek richt zich op het verbeteren van *producten*.
PBO-vezels kampen nog steeds met de zwakheden zoals een lage UV-bestendigheid [6] en een lage compressiesterkte [7]. Vooralsnog zijn daar geen verbeteringen in geboekt [8].
PIPD-vezels (handelsnaam M5) vormen al jaren een belofte. Deze vezel is in de jaren negentig door Akzo Nobel ontwikkeld. In potentie heeft deze vezel goede mechanische eigenschappen en kan in veel toepassingen gebruikt worden [9]. Ook voor ballistische toepassingen is deze vezel veelbelovend [10]. Na enige tijd te zijn doorontwikkeld door Magellan Systems International, is de technologie in 2005 gekocht door DuPont. Sindsdien is er weinig meer over deze vezel openbaar gemaakt. In elk geval is de vezel op dit moment niet commercieel verkrijgbaar.

In [11] is de ballistische response van natuurlijke vezels tegen Fragment Simulating Projectiles (FSP's) onderzocht. De vezels die onderzocht zijn, zijn vlas, hennep en jute. Er is getest op composiet. De vezels waren ingebed in een matrix van Poly-Propyleen (PP). Vlasvezel versterkt composiet presteerde het beste, jutevezel versterkt composiet presteerde het minst. Ten opzichte van gewoon staal presteert vlasvezel versterkt composiet per eenheid van gewicht ongeveer 20% beter, hennepvezel versterkt composiet ongeveer 5% minder en jutevezel versterkt composiet ongeveer 30% minder.

3.1.2 Matrix

Volgens [5] ligt een belangrijk potentieel ter verbetering van de huidige composiet materialen in de matrix én in de verbetering van de productieprocessen.
Wat hierbij ook van belang is, is de interactie tussen de matrix en de vezels ('optimale hechting').

3.1.2.1 Polymeren en elastomeren

Wat opvalt, is de belangstelling voor polyurethanen. Dit is een veelzijdige groep polymeren, die al naar gelang de precieze samenstelling, polymeer lengte en kristalliniteit heel verschillende eigenschappen kan bezitten; van rubberachtig tot glasachtig. Een voorbeeld van relevant onderzoek naar polyurethanen is [12]. Daarin wordt onder andere beschreven hoe sommige polyurethanen zich gedragen bij hoge reksnelheden. Interessant daarbij is dat bij lage reksnelheden (10^{-3} – 10^{0} s^{-1}) deze materialen zich rubberachtig gedragen, terwijl bij hoge reksnelheden (10^{3} – 10^{4} s^{-1}) deze materialen meer glasachtig zijn. Hoge reksnelheden doen zich voor bij blast belastingen en bij ballistische inslag.
Een andere weg die ingeslagen kan worden, is het gebruik van schuim als matrix materiaal. Dit wordt onder andere beschreven in [13], waarin kort-vezelversterkt epoxy-schuim wordt onderzocht. Het grote voordeel is de lagere dichtheid ten opzichte van niet-geschuimd epoxy. Ten opzichte van onversterkt schuim wordt de compressiesterkte en afschuifsterkte tot 85% hoger. Het blijkt dat in deze studie aramide vezels een beter effect hebben dan glasvezel, maar dat wordt met name geweten aan het ontbreken van een 'coupling agent' die de hechting tussen de matrix en de vezel verbetert.

3.1.2.2 Metalen

Metaal-matrix composieten vormen een brede groep materialen. In [14], [15] en [16] doet Karamis onderzoek naar de mechanismen die een rol spelen bij het stoppen van een Armour Piercing (AP) projectiel door verschillende aluminium legeringen versterkt met silicium carbide of aluminium oxide deeltjes. Hier blijkt dat met name wrijving en

de schurende werking van het metaal-matrix composiet zorgt voor een stoppende werking van het AP projectiel.
Uiteraard zijn er vele combinaties tussen versterking en metaal mogelijk. In [17] wordt een overzicht gegeven van mogelijkheden om op titanium en staal gebaseerde metaal-matrix composieten te produceren door middel van spuitgieten.

3.1.2.3 *Keramiek*

In [18] doen Koch et al. onderzoek naar de optimale[2] hechting tussen verschillende vezels en keramische matrices. Door de optimale hechting te kiezen kan de scheur-weerstand van dit soort (brosse) materialen worden verbeterd. Een andere richting die onderzocht is, is de toepassing van minder sterke matrix materialen om de scheurweerstand te verbeteren.

In [19] wordt melding gemaakt van ballistische tests op een mulliet-mulliet composiet (mulliet vezels in een mulliet matrix). Mulliet is een zeldzaam kleimineraal, een aluminiumsilicaat met de chemische formule $Al_6Si_2O_{13}$. Hoewel de exacte ballistische prestaties niet duidelijk gegeven zijn, blijkt uit dit onderzoek dat dit materiaal aanzienlijk reststerkte heeft na ballistische impact. Bovendien wordt geclaimd dat een achterplaat ter voorkoming van 'spall' (secundaire fragmenten) niet nodig is bij dit materiaal.

3.2 Metalen

Metalen en met name (pantser)staal zijn goed in staat fragmenten af te vangen en blasteffecten te reduceren. Ook bij metalen zijn de verbeteringen evolutionair en niet revolutionair. Veel onderzoek vindt plaats om bepaald materiaalgedrag beter te kunnen begrijpen en modelleren, bijvoorbeeld [20], waarin het dynamisch gedrag van een aluminium legering wordt onderzocht om de constructie van lichtgewicht shelters beter te kunnen modelleren. Ook [21] en [22] zijn voorbeelden van onderzoek waarbij wordt getracht het gedrag onder blast- dan wel impactbelasting van een bekend materiaal (staal en titanium) beter te begrijpen.
In [23] wordt een methode voorgesteld om de eigenschappen van gehard martensitisch staal te ontwerpen. Deze methode is gebaseerd op een goed begrip van de invloed van chemische samenstelling, procesparameters en resulterende microstructuur van het staal op de (ballistische) eigenschappen. Op die manier wordt het mogelijk om gecontroleerd de gewenste (balans van) eigenschappen te verkrijgen. Afhankelijk van de gekozen procesparameters is het mogelijk om staal te creëren in de categorieën zoals beschreven in tabel 4.

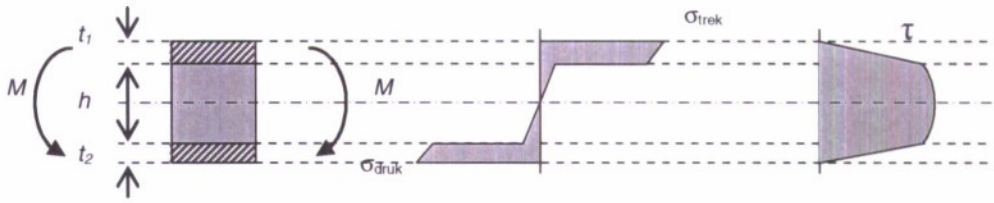
Tabel 4 Classificatie van martensitisch pantserstaal volgens [23].

	Martensitische starttemperatuur (°C)	Dikte (mm)	Eigenschappen
Groep 1	<210	4.5-6.0	Goede ballistische eigenschappen
Groep 2	210-260	8.5-20.0	Hoge sterkte en redelijke ballistische eigenschappen
Groep 3	>260	30	Hoge taaiheid en slechte ballistische eigenschappen

[2] In dit geval wordt nadrukkelijk niet gezocht naar de *beste* hechting maar naar de *optimale* hechting.

3.3 Sandwich materialen

Sandwich materialen bestaan uit een onder- en een bovenhuid, met daartussen een kern. Wanneer een sandwich-constructie belast wordt op buiging, nemen de huiden met name trek- en drukkrachten op. De kern wordt dan met name belast door schuifkrachten. Dit wordt geïllustreerd in figuur 15. In figuur 15 is t de dikte van de huid en h de hoogte van de kern. M is het buigend moment (de belasting) en σ en τ zijn de resulterende materiaalspanningen.

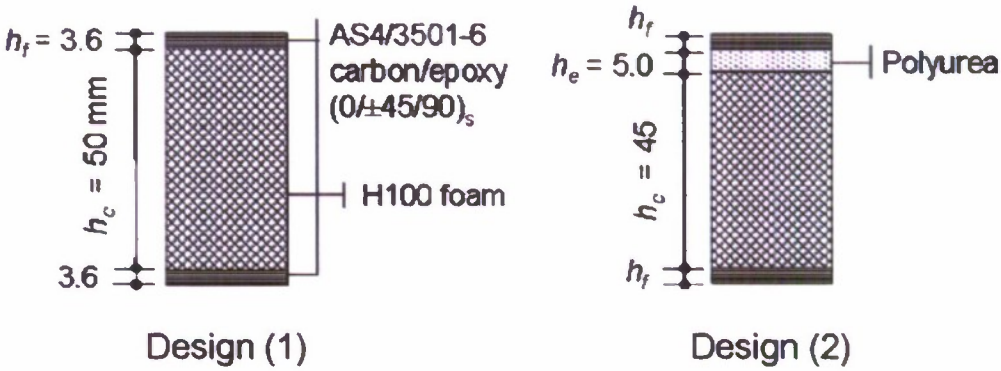


Figuur 15 Schematische weergave van de spanningsverdeling in een sandwich materiaal onder invloed van buiging.

Sandwich materialen zijn dus eigenlijk constructies.

Voor opbouw van sandwich materialen zijn veel combinaties mogelijk. Toch zijn er wel een aantal materialen veel voorkomend. Voor de huid worden vaak dunne composietplaten of metaalplaten gebruikt. Voor de kern zijn honingraat (vaak van metaal, maar ook aramide (Nomex®) en zelfs papier) en schuim (bijvoorbeeld epoxy, PUR of metaal) veel gebruikt.

Wat betreft het materiaalgebruik in sandwichconstructies is ook hier geen revolutie geweest. In [24] wordt het effect van een polyurea[3] tussenlaag op de blastrespons van een sandwich-constructie onderzocht. Figuur 16 laat de 2 onderzochte configuraties zien.



Figuur 16 Opbouw van twee sandwich materialen om het effect van een polyurea tussenlaag te onderzoeken [24].

De keuze voor een polyurea tussenlaag is gemaakt, omdat eerder onderzoek had aangetoond dat polyurea zich bij hoge reksnelheden zich anders gedraagt. [12] is een recent voorbeeld van soortgelijk onderzoek. Voor de onderzochte configuraties leverde de toevoeging van de polyurea laag een verbetering in energieopname bij een blastbelasting van ongeveer 40% op.

[3] Polyurea is een resultaat van het reactieproduct tussen een isocyanate en een polymeer met een aminegroep als uiteinde. Het is dus een materiaalgroep. Voor een exacte definitie zie [25].

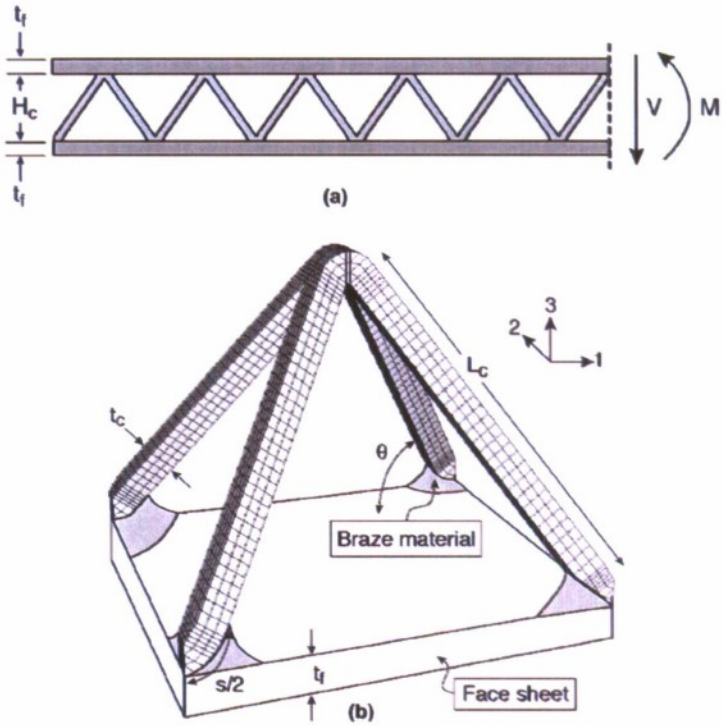
In [26] wordt een stap verder gegaan en wordt de gehele kern van polyurea gemaakt. De huidvelden bestaan uit E-glas/vinylester composiet. Deze sandwich-constructie werd experimenteel vergeleken met alleen composiet (E-glas/vinylester) en een 'halve' sandwich van één huidveld (E-glas/vinylester) met polyurea. De conclusie was dat de volledige sandwich 1.6 keer zo zwaar is als alleen de huid, maar 2 keer zo goed presteert (2 keer zo sterk) bij de blastbelasting en randvoorwaarden zoals in dit onderzoek.

Doordat sandwich materialen erg efficiënt[4] zijn onder buigbelasting en omdat de kern vaak ook veel energie kan opnemen bij een globale belasting, zijn ze zeer geschikt om een blastbelasting te weerstaan. Veel onderzoek is er dan ook op gericht om de blastbestendigheid van sandwichconstructies te bepalen en/of te modelleren/simuleren. Recente voorbeelden van dergelijk onderzoek zijn [27], [28], [29], [30] en [31].
In [27] is een ingeklemde cirkelvormige sandwichplaat onder blastbelasting doorgerekend met behulp van EEM. Als kern werd een tetragonale vakwerkconstructie gebruikt. Met name het correct modelleren van de kern bleek lastig door het anisotrope karakter, gecombineerd met knikverschijnselen. Doel van het onderzoek was om een goede vergelijking tussen massieve platen en sandwichconstructies met een vakwerkkern mogelijk te maken.
[28] behandelt de problematiek van de dynamische response (bijvoorbeeld het door een blastbelasting opgewekte trillingsgedrag) voor verschillende inklemmingen, belastingen en configuraties. Wel is het onderzoek beperkt tot vlakke platen. Met de analytische aanpak (dus zonder gebruik te maken van EEM) zijn generieke vergelijkingen berekend voor verschillende soorten blastbelasting. In [29] breiden dezelfde onderzoekers hun model uit naar dubbelgekromde sandwichpanelen.
In [30] wordt met behulp van EEM een sandwichconstructie met een metaalschuim kern doorgerekend en worden de resultaten vergeleken met experimenten.
Ten slotte wordt in [31] met behulp van de EEM gekeken of een bepaald type sandwichmateriaal verbeterd kan worden. Daarbij wordt de energieopname per mechanisme (bijvoorbeeld loslaten van de huiden van de kern, crushing van de kern, (plastische) vervorming van de gebruikte materialen) als maatstaf gebruikt.

Behalve de response van sandwichconstructies op blastbelasting, wordt ook de impactbestendigheid van sandwichconstructies onderzocht. Vaak gaat het hier om lage snelheidsimpact (impactsnelheid <100 m/s), maar ook ballistische inslag wordt onderzocht. Een voorbeeld hiervan is [32]. In dit onderzoek wordt de ballistische inslag van zowel ronde, als stompe projectielen op een aluminium sandwich constructie analytisch gemodelleerd met behulp energiebalansen, en wordt dit model geverifieerd met testen. Nadeel van dit soort benaderingen is dat de gevonden modellering vaak alleen geschikt is voor de betreffende dreiging/doel/snelheid-combinatie.

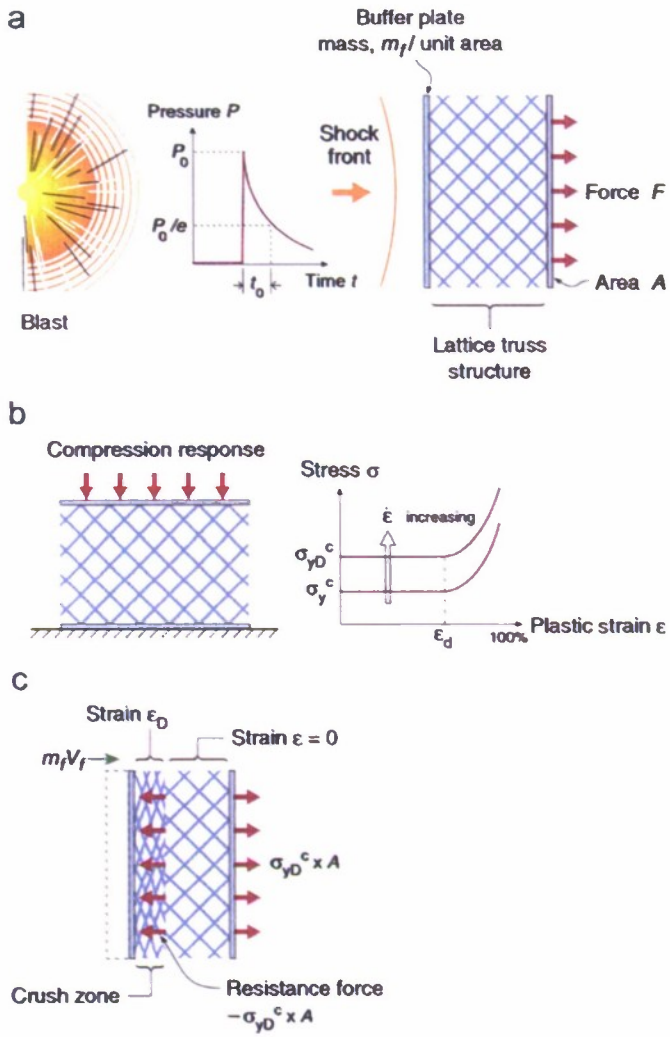
Relatief nieuw, sinds ongeveer 1999, is wel het toepassen van een truss-kern of piramide kern voor blastbestendige sandwichconstructies. Dit is dus niet zozeer de toepassing van een nieuw materiaal, als wel een 'nieuw' soort constructieconcept. Een voorbeeld is gegeven in figuur 17 uit [33].

[4] Efficiënt wil in dit geval zeggen een goede prestatie (sterkte, doorbuiging) per eenheid van gewicht.

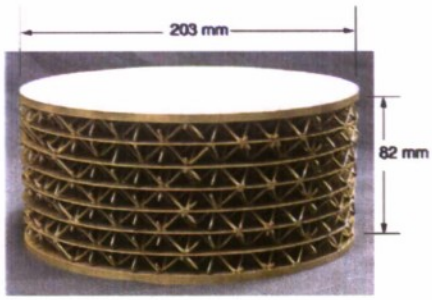


Figuur 17 Voorbeeld van een truss-core sandwichconstructie concept (a) sandwich panel (b) unit-cell gebruikt in de berekeningen in [33].

Voordelen van deze constructie zijn structurele efficiëntie (quasi-statisch), de mogelijkheid voor actieve koeling/verwarming door de open structuur en een goede blastbestendigheid. De blastbestendigheid wordt verkregen doordat de vakwerkconstructie in compressie (gedeeltelijk) zal verkreukelen (lokale knik), wat veel energie kost (zie figuur 18).



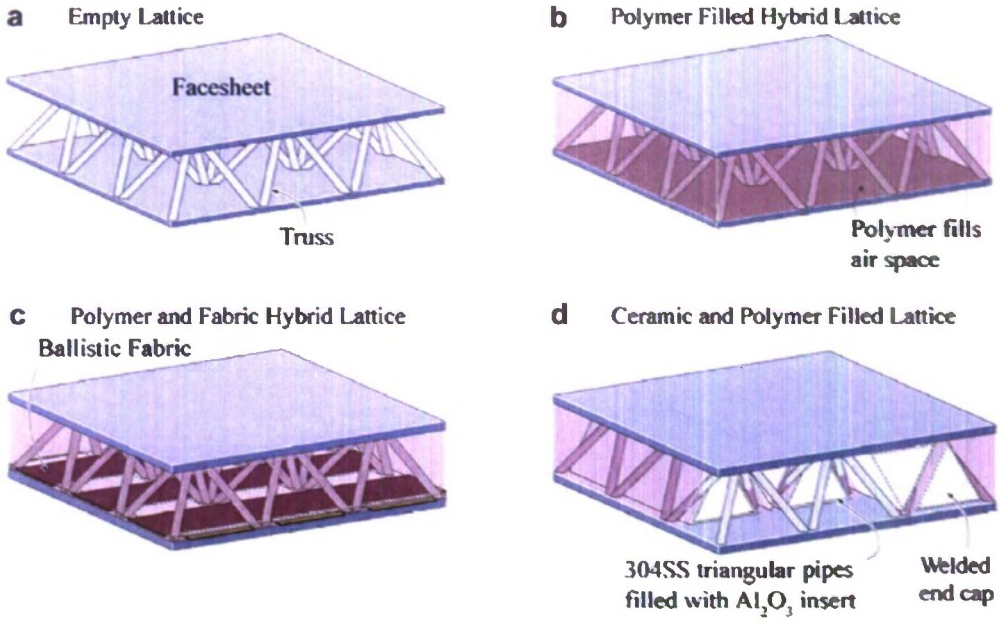
Figuur 18 Schematische weergave van het energieopname-mechanisme van een sandwichconstructie onder onderwaterschokbelasting [34]; (a) toont de schokgolf die aankomt bij de constructie; (b) toont schematisch het gedrag van de constructie onder invloed van een opgelegde compressie-belasting; de rechterzijde laat het veranderende gedrag bij toenemende reksnelheid (dε/dt); (c) toont het mechanisme van het dempende effect.



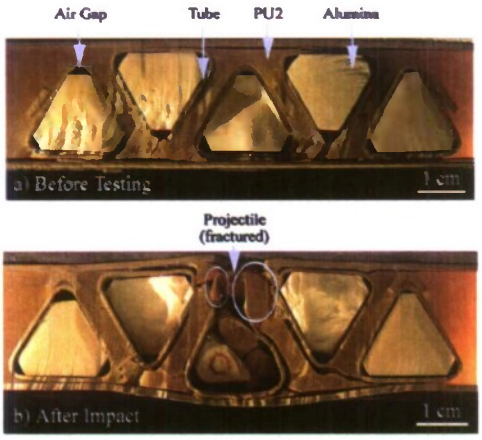
Figuur 19 Voorbeeld van een RVS sandwichconstructie voor het opvangen van onderwaterschokbelasting [34].

Figuur 19 toont een voorbeeld van een dergelijke constructie, uitgevoerd in RVS, voor onderwatertoepassing.

Bij toepassing van het juiste materiaal voor de huid en door opvullen van de ruimte tussen de vakwerkconstructie, kan ook een goede ballistische weerstand worden verkregen. In [35] worden de resultaten gepresenteerd van een onderzoek naar de mogelijkheden om de ballistische weerstand van vakwerk sandwichconstructies te verbeteren. Figuur 20 toont een schematische weergave van de vakwerksandwich-constructies die in [35] onderzocht zijn.



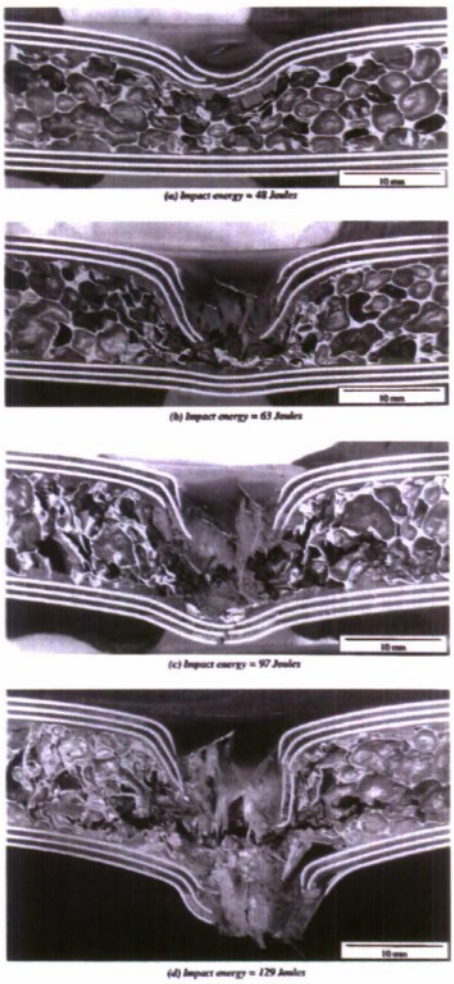
Figuur 20 Schematische weergave van de vakwerksandwichconstructies die in [35] onderzocht zijn: (a) niet gevulde vakwerk kern; (b) vakwerk kern gevuld met polymeer; (c) extra laag met ballistisch weefsel en vakwerkkern gevuld met polymeer; (d) 304 SS alumina in de prismatische ruimtes en de overige ruimte gevuld met polymeer.



Figuur 21 Resultaat van een impacttest op configuratie (d) uit figuur 20 met een bolvormig RVS-projectiel met een diameter van 12 mm en een snelheid van 613 m/s [35].

Zoals door de onderzoekers verwacht had configuratie (d) uit figuur 20 de beste ballistische prestatie voor dit type projectiel door de toevoeging van de keramiek, maar nam het gewicht per oppervlakte eenheid met een factor 3.8 toe ten opzichte van de ongevulde constructie.

In [36] wordt het impactgedrag onderzocht van een sandwich met een laminaat als huid (zie voor laminaten paragraaf 3.4) en een aluminium schuimkern. De gelaagde huid bestond uit aluminium/glasvezel-polypropyleen composiet. Dreiging was een cilindrisch, stalen projectiel van 54 g, met een halfronde kop en een diameter van 10 mm. Inslagsnelheden waren in de orde van 60 m/s.

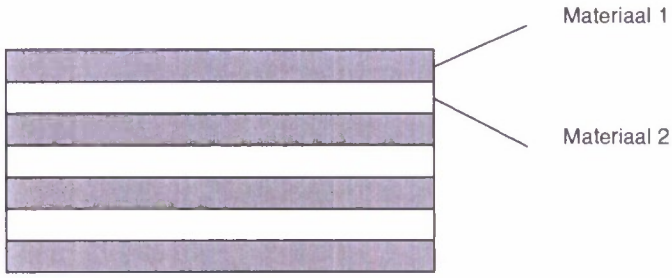


Figuur 22 Opname van de resultaten van impact op een sandwichconstructie met FML huiden en een aluminium schuimkern [36].

In [36] wordt geclaimd dat deze configuratie 23% efficiënter is dan een composiet versie van hetzelfde materiaal.

3.4 Laminaten

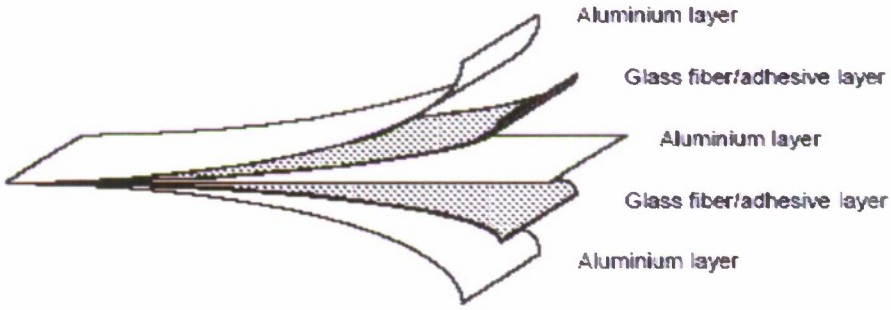
Laminaten (gelaagde materialen) onderscheiden zich van sandwichmaterialen door hun opbouw. Waar sandwichmaterialen bestaan uit een onder- en bovenhuid en een kern (zie paragraaf 3.3 voor een korte beschrijving van een sandwichmateriaal), bestaan laminaten uit verschillende lagen van verschillend materiaal, vaak om en om, maar dit is niet perse noodzakelijk.



Figuur 23 Schematische weergave van een laminaat.

3.4.1 *Vezel-metaallaminaten*

Zoals de naam al zegt, bestaan vezel-metaallaminaten of Fibre Metal Laminates (FML), uit laagjes metaal, afgewisseld met composiet. Eén van de bekendste families van FML's is Glare®. Dit bestaat uit laagjes aluminium (2024-T3) en S2-glasvezel/epoxy composiet. Oorspronkelijk is dit materiaal ontwikkeld voor vermoeiingsgevoelige luchtvaartonderdelen, met name de romp. Zie voor meer gedetailleerde algemene beschrijving bijvoorbeeld [37] en [38]. Glare® is toegepast in een blastbestendige luchtvaartbagagecontainer (zie paragraaf 2.1.2).

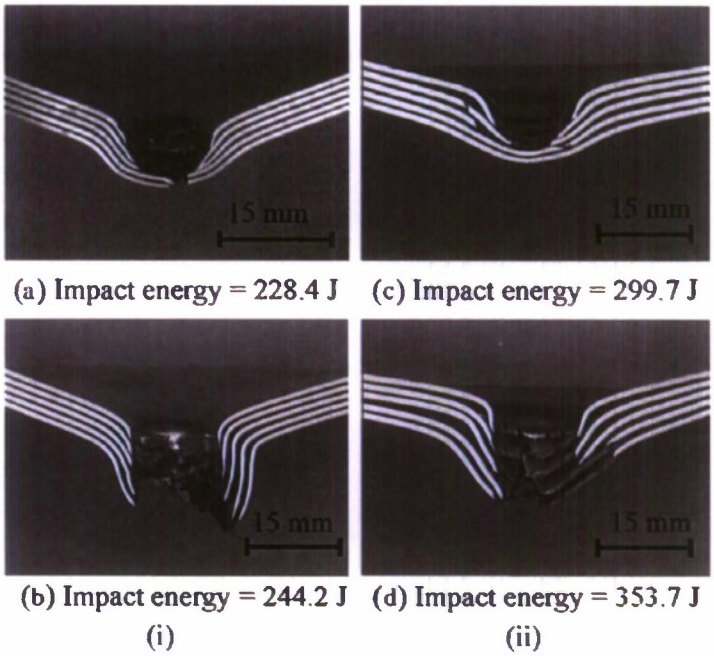


Figuur 24 Schematische opbouw van Glare® [39].

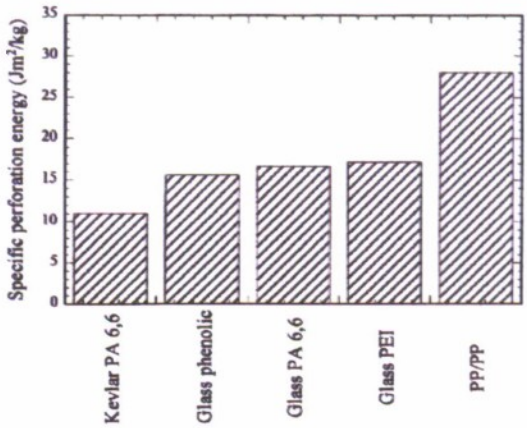
In [39] worden voor een bepaald type Glare® de ballistische eigenschappen onderzocht. Het in [39] onderzochte type Glare® presteerde in dit geval 15% beter dan aluminium 2024-T3 met eenzelfde oppervlaktegewicht.
In [40], [41] en [42] wordt de blastresponse van FML's bestaande uit aluminium en glas-polypropyleen composiet onderzocht. De reden om in plaats van een thermoharder (epoxy) een thermoplast (polypropyleen) als matrixmateriaal te gebruiken zijn verwachte betere impact prestaties, mogelijk snellere productieprocessen en een hogere kerf-taaiheid. In [40] en [41] wordt echter geen vergelijking gemaakt met andere (matrix) materialen, maar wordt getracht het faalmechanisme te beschrijven. In [42] wordt het verschil in materiaalgedrag tussen een uniform aangebracht blastbelasting en een niet-uniforme blastbelasting beschreven.
In [43] wordt nog een variant met PolyAmide (PA) beschouwd. Ook hier wordt alleen het gedrag onder blastbelasting beschreven, maar wordt er niet vergeleken met andere materialen.

Een andere opbouw die onderzocht is op impact prestaties is een FML bestaande uit aluminium en een PolyPropyleen/ PolyPropyleen (PP/PP) composiet (polypropyleen vezels in een polypropyleen matrix). In [44] worden verschillende FML configuraties getest tegen een cilindrisch, stalen projectiel van 46.7 g met een halfronde kop en een

diameter van 12 mm. Figuur 25 toont de vervormingen bij verschillende impact-snelheden (99, 102, 113 en 123 m/s) van één van de geteste configuraties.



Figuur 25 Opname van de resultaten van een impact van een stalen projectiel op een FML bestaande uit aluminium 2024-O en PP/PP in een 5/4 lay-up [44].



Figuur 26 Resultaten van de tests uit [45] (PP/PP) vergeleken met andere eerder gepubliceerde resultaten [44].

Figuur 26 toont dat volgens [44] FML's met PP/PP 1.6 tot 2.5 keer beter presteren dan andere FML's per eenheid van oppervlaktegewicht.

In [45] wordt een FML beschreven met magnesium als metaallaag. Alleen lage snelheidsimpact en vermoeiingsgedrag is onderzocht.

3.4.2 *Andere laminaten*

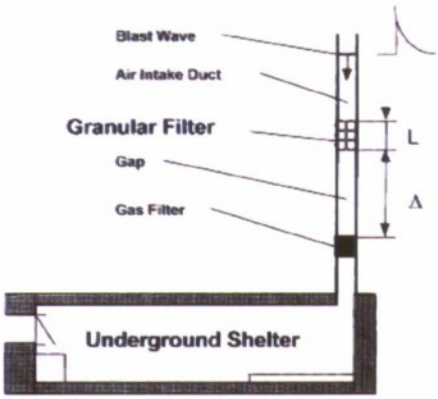
Veel verschillende combinaties van gelaagde materialen zijn gemaakt en onderzocht op verschillende aspecten. Bekend is onder andere Hylite®, een laminaat van aluminium en PP [46]. Dit materiaal is ontwikkeld voor automobieltoepassingen en voor zover bekend

niet onderzocht op ballistische eigenschappen of schokbestendigheid. Dat is wel gebeurd met een andere combinatie, namelijk een laminaat van polycarbonaat en roestvast staal [47]. In deze studie wordt het gedrag van periodieke laminaten onder schokbelasting gemodelleerd en vergeleken met experimentele resultaten.
Een combinatie die interessant zou kunnen zijn voor ballistische bescherming is die van metaal-keramiek, omdat het de goede ballistische weerstand van keramiek zou kunnen combineren met de taaiheid van een metaal. In [48] wordt het mechanische gedrag van een nikkel-alumina laminaat gemodelleerd, echter niet op ballistische eigenschappen of schokbestendigheid.

3.5 Energie absorberende materialen en concepten

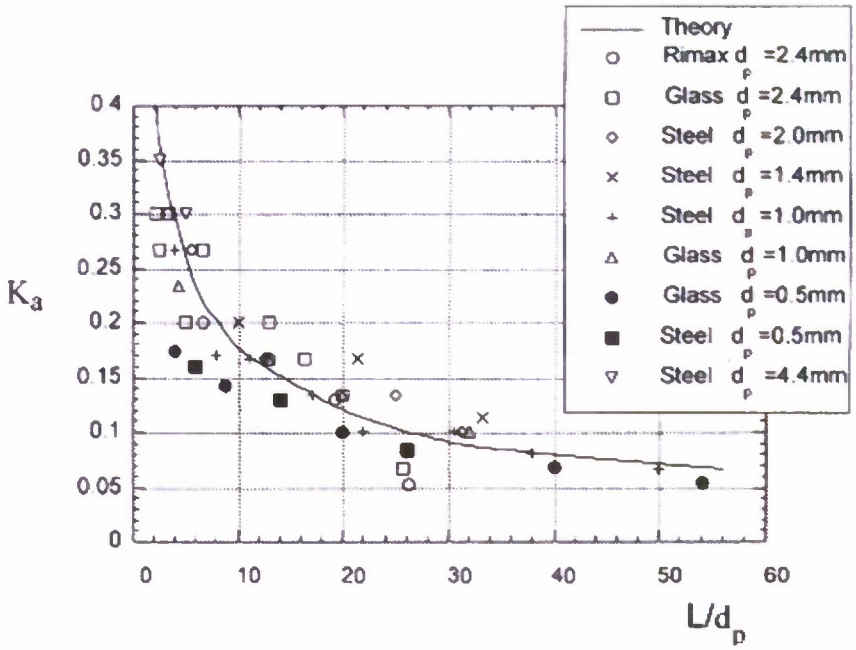
Onder energie absorberende materialen en concepten vallen een aantal materialen, die niet als klassiek constructiemateriaal gebruikt worden, maar die wel in potentie de energie van een explosie kunnen absorberen en zo de gevolgen van een explosie kunnen beperken. Dit geldt zowel voor blast als voor fragmenten. De materialen en concepten die hier besproken worden, hebben vooral tot doel de blasteffecten van de explosie te reduceren.

In [49] wordt beschreven hoe met behulp van granulair filters schokgolven kunnen worden gedempt. Deze filters kunnen worden toegepast in ventilatiekanalen van schuilkelders om de inkomende schokgolf te dempen (figuur 27).



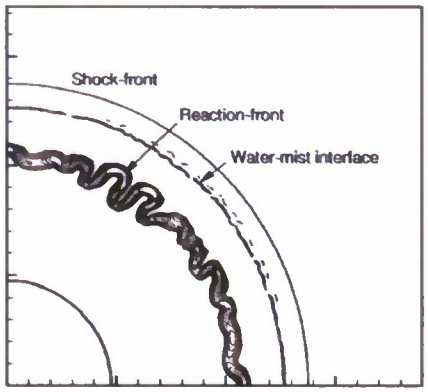
Figuur 27 Voorbeeld van een toepassing van de een granulair filter voor de reductie van een luchtschok [49].

Van verschillende materialen en configuraties is de demping als functie van de genormaliseerde filterlengte onderzocht, zie figuur 28 voor een overzicht. Rimax is een keramisch materiaal ($ZrSiO_4$).



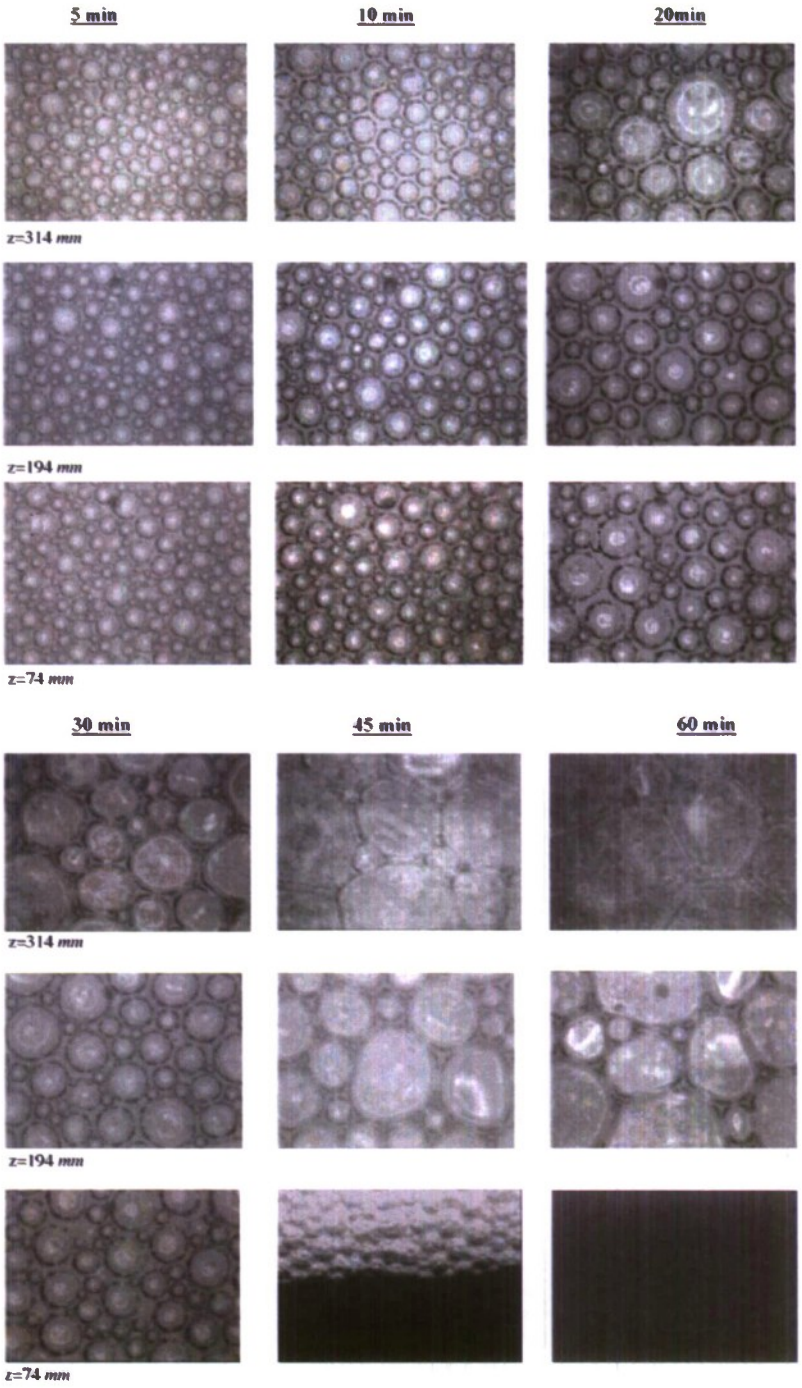
Figuur 28 Resultaten van de tests uit [49]. In deze grafiek staat op de y-as de dempingsfactor en op de x-as de genormaliseerde filterlengte.

In [50] wordt een water mist om explosie effecten te reduceren gemodelleerd. Gebaseerd op deze modellen en resulterende simulaties wordt geconcludeerd dat een watermist meer dempend effect heeft op de schokgolf dan eenzelfde hoeveelheid water die niet verneveld is. Mechanismen die een rol spelen zijn impulsoverdracht van de schokgolf op de waterdeeltjes, verdamping (en daardoor verlaging van de temperatuur) en deelname van het water in chemische reacties in het detonatiefront. Sommige mechanismen blijken een belangrijkere rol te spelen dan andere. Met name de impulsoverdracht is een belangrijke factor volgens deze simulaties.



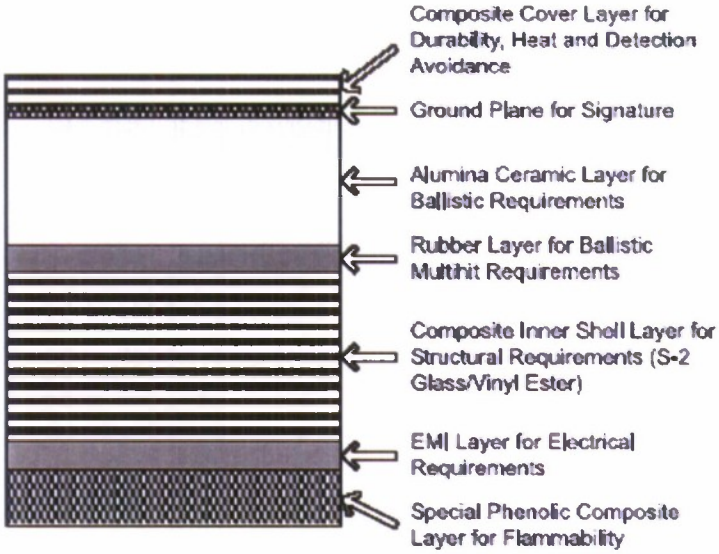
Figuur 29 Resultaat van een simulatie van een detonatie van 2.12 kg TNT (kwart cirkel linksonder) op 1 ms na de detonatie [50].

Een variant op het gebruik van een watermist is de toepassing van schuim ('aqueous foams'). Dit principe is al tientallen jaren bekend. In [51] wordt onderzoek gedaan naar de invloed van drainage (weglekken van water) uit het schuim en de invloed daarvan op de dempende werking. Figuur 30 toont resultaten van dit onderzoek. Het blijkt dat 'vers' schuim (kolom '5 min' in figuur 30) het beste dempt en dat na verloop van tijd (kolom '60 min' in figuur 30) de dempende werking nihil is geworden.

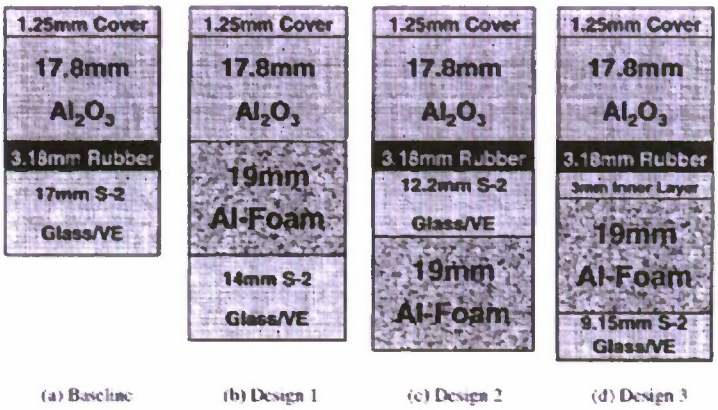


Figuur 30 Verloop van het uitzakken van water in een schuim in verloop van de tijd. z geeft de hoogte in een kolom aan. Duidelijk is te zien dat de omvang van de bubbels in het schuim in de tijd toeneemt en dat het water zich onderin verzamelt (plaatje rechtsonder z=74 mm na 60 min) [51].

In [52] wordt een integraal pantser voorgesteld op basis van aluminium schuim. Hoewel dit te beschouwen is als sandwich of gelaagd materiaal, staat het hier toch apart, omdat het uitgangspunt is dat vele functies in dit pantser gecombineerd worden. Niet alleen blastreductie/bescherming en fragment- en kogelwerendheid, maar bijvoorbeeld ook afscherming tegen elektromagnetische straling (figuur 31).



Figuur 31 Toekomstig integraal pantser volgens [52].



Figuur 32 Onderzochte configuraties in [52].

Tegen een 20 mm FSP met 838 m/s voldeed Design I (figuur 32b) het best.

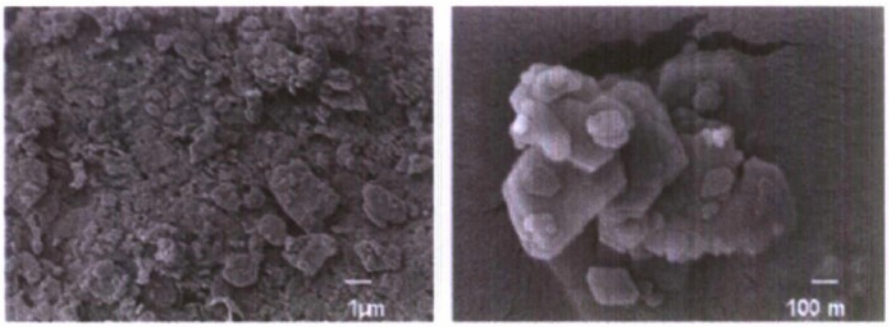
In [53] wordt een aantal onderzoeken van Sandia Laboratories (USA) naar de potentie van Rigid Polyurethane Foams (RPF) om explosie effecten te reduceren samengevat. De conclusie van Scandia is dat RPF een bijdrage kunnen leveren aan het beschermen van gebouwen tegen blast. Een laag van 9 inch (ongeveer 23 cm) dik schuim met een dichtheid van 96 tot 128 kg/m^3 aangebracht op een betonnen muur voorkomt spall (secundaire fragmenten) grotendeels. RFP bieden geen bescherming tegen primaire fragmenten.

[54] beschrijft een methode om glas blastbestendig en kogel/scherfwerend te maken. Hiertoe wordt een laag transparante polyurethaan op het glas aangebracht. Ten opzichte van bestaand transparant pantser is vooral het vermogen om meerdere inslagen te weerstaan verbeterd.

3.6 Toevoegingen

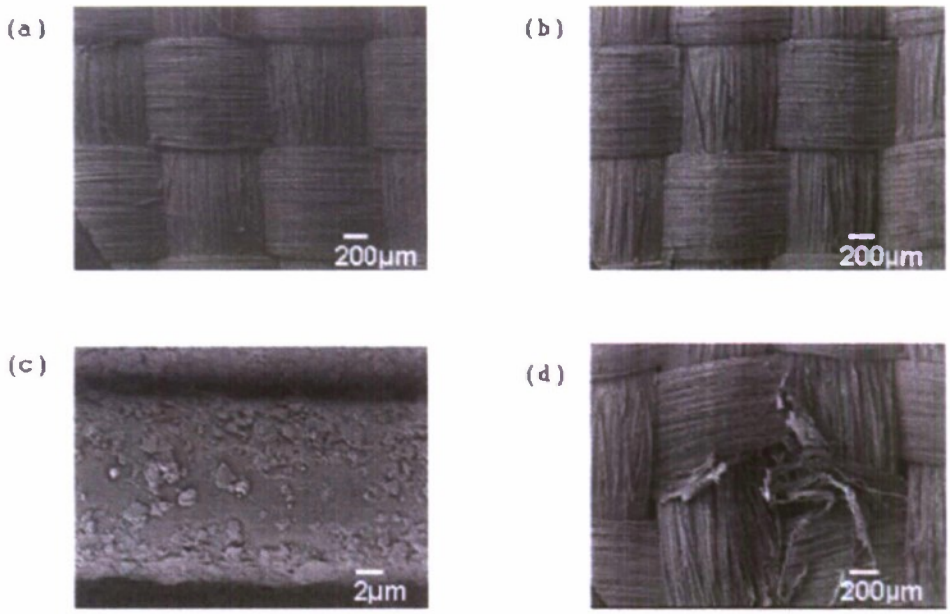
3.6.1 Shear Thickening Fluids

Shear Thickening Fluids (STF) bestaan uit deeltjes in een vloeistof. Bij bepaalde mengsels en verhoudingen kan een mengsel ontstaan dat bij snelle vervormingen (afschuiving: shear) zich anders (stroperiger, 'stijver') gedraagt dan bij langzamere vervorming. Dit materiaalgedrag leent zich goed om gebruikt te worden in persoonlijke beschermingsartikelen zoals kogelwerende vesten. Tijdens het dragen (langzame vervorming) moet het comfortabel zijn en soepel kunnen bewegen, maar tijdens de inslag van een kogel of een fragment moet het zich stijver gedragen.
In [55] wordt gebruikt gemaakt van Kevlar® weefsel geïmpregneerd met een STF bestaande uit ethyleen glycol met als toevoeging silicadeeltjes. Dit materiaal is getest tegen een 1.1 g FSP. Inslagsnelheid lag rond de 250 m/s. Uitkomst was dat de penetratiediepte van geïmpregneerde weefsel minder was dan niet geïmpregneerde weefsels.
In [56] worden niet alleen ronde, maar ook onregelmatige deeltjes (figuur 33) gebruikt om de STF te maken, waarmee het Kevlar® weefsel geïmpregneerd wordt. Gekeken wordt naar een aantal dreigingen, waaronder snijden en steken. Ook wordt het ballistische gedrag onderzocht met een bolvormig stalen projectiel van 0.62 g. Nu wordt wel een verhoging van de ballistische weerstand gevonden ten opzichte van niet-geïmpregneerd Kevlar weefsel (een factor 2.5 hogere V_{50}[5]).



Figuur 33 SEM opname van de onregelmatige deeltjes voor impregnatie van Kevlar weefsel [56].

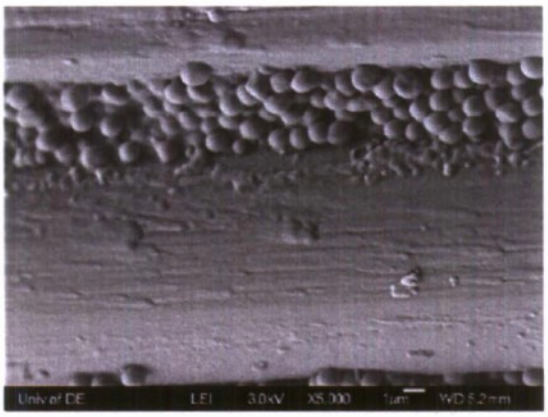
[5] V_{50} is de inslagsnelheid waarbij er 50% kans is dat het projectiel door het doel wordt gestopt.



Figuur 34 (a) niet-geïmpregneerd Kevlar weefsel (b, c) geïmpregneerd Kevlar weefsel met STF voorzien van onregelmatige gevormde deeltjes (figuur 33) en (d) een geïmpregneerd Kevlar weefsel na een quasi-statische test met een scherp object [56].

In [57] wordt een STF met bolvormige deeltjes onderzocht, maar nu van kunststof PolyMethylMethAcrylaat (PMMA) (figuur 35). Reden daarvoor is dat de silica deeltjes door hun hardheid de Kevlar filamenten zouden beschadigen. Ook hier wordt gekeken naar een aantal dreigingen, waaronder snijden en steken. Het ballistische gedrag is onderzocht met een bolvormig stalen projectiel van 0.62 g. De ballistische resultaten staan zijn minder goed dan in [56] (verhoging V_{50} met een factor 1.5 ten opzichte van niet-geïmpregneerd Kevlar weefsel).

Figuur 35 SEM opname van PMMA deeltjes gebruikt in STF [57].



Figuur 36 SEM opname van met PMMA-STF geïmpregneerd Kevlar [57].

3.6.2 *Andere toevoegingen*

Met een grote verscheidenheid aan toevoegingen wordt geprobeerd de mechanische eigenschappen van materialen te verbeteren. In [58] wordt dit goed geïllustreerd. Allerlei toevoegingen worden gedaan aan epoxy om met name de taaiheid en impact bestendigheid te verbeteren. Tabel 5 illustreert de trial-and-error benadering die de meeste onderzoekers toepassen. Er werden buigtests en lage snelheids impacttests uitgevoerd. Met name de toevoeging van de rubberdeeltjes had positieve invloed op de lage snelheids impact weerstand van het materiaal.

Tabel 5 Volume fracties van onderzochte combinaties van materialen uit [58].

Batch no.	1	2	3	4
Epoxy	100	40	40	40
Microballoon	0	57.6	47.6	37.6
Crumb rubber	0	0	10	20
Nanoclay	0	1.6	1.6	1.6
Microfiber	0	0.8	0.8	0.8

3.7 Samenvatting

Doel van deze literatuurstudie is om tot een lijst van materialen te komen, die in constructies kunnen worden toegepast die bescherming bieden tegen de effecten van explosies. In principe kunnen alle genoemde materialen worden toegepast om ofwel fragmenten te weren, ofwel de blast (of de gevolgen van blast) te reduceren, of een combinatie van deze twee. Het doel van een constructie is om dit zo efficiënt (per eenheid van gewicht, of per eenheid van kosten) en zo effectief mogelijk te doen. Daarom wordt in tabel 6 een *kwalitatief* overzicht gegeven van de potentie van de beschreven materialen om in nieuwe, betere explosie-effect reducerende constructies te worden gebruikt. Een kwantitatieve vergelijking is ook niet te geven, omdat de tests en testmethoden uit de hier aangehaalde literatuur zich niet laten vergelijken.
Een + geeft aan dat een materiaal in potentie meer geschikt is dan de andere materialen, een – geeft aan dat een materiaal in potentie minder geschikt is dan de ander materialen of ongeschikt. Als er niets is aangegeven, is het materiaal gemiddeld geschikt, of zijn er onvoldoende gegevens om een uitspraak te doen over de relatieve geschiktheid.

Tabel 6 Potentieel om in nieuwe afschermingconstructies tegen explosie effecten gebruikt te worden.

			Blast	Fragmenten	Referenties
Vezelversterkte kunststof	*Vezel*	*Matrix*			
	UHMWPE	divers		+	
	Aramide	divers		+	
	PBO	divers		+	6, 7, 8
	PIPD	divers		+	9, 10
	Jute	PP			11
	Vlas	PP			11
	Hennep	PP			11
	divers	PU		+	12
	Aramide	Epoxyschuim			13
	Glas	Epoxyschuim			13
Metaal-Matrix composiet	SiC	Aluminium		+	14, 15, 16
	Al_2O_3	Aluminium		+	14, 15, 16
	divers	Titanium			17
	divers	Staal			17
Keramiek-Matrix composiet	algemeen			+	18
	Mulliet	Mulliet		+	19
Metaal	Aluminium		+	+	20
	Titanium		+	+	22
	Staal		+	+	21, 23
Sandwich	*Huid*	*Kern*			
	CFRP/Polyurea	Schuim	+		23, 25
	GFRP	Polyurea	+		26, 25
	divers	Metaalschuim	+		30
	divers	Vakwerkconstructie	+	+	33, 34, 35
	Aluminium/glasvezel-PP laminaat	Aluminium schuim			36
Laminaten	Aluminium/S2-glasvezel epoxy (Glare)		+		37, 38, 39
	Aluminium/glasvezel-PP				40, 41, 42
	Aluminium/glasvezel-PA				43
	Aluminium/PP vezel-PP				44
	Magnesium/				45
	Aluminium/PP (Hylite)				46
	Roestvaststaal/PC				47
	Nikkel/Alumina				48
Energie absorberende materialen/ concepten	Granulaire filters		+	-	49
	Water mist		+	-	50
	Waterig schuim		+	-	51
	Integraal pantser		+		52
	RPF		+	-	53
	Transparant pantser op basis van glas/PU		+	+	54
Toevoegingen	STF		+		55, 56, 57
	diversen				58

Het moge duidelijk zijn dat de materiaaleigenschappen alleen niet de effectiviteit en efficiëntie van de constructie bepalen. Het gaat hier om de samenhang tussen materiaal, vorm en productieproces (zie figuur 1). Bovendien moet de geschiktheid van een materiaal gezien worden in de context van het pakket van eisen. Daar spelen ook zaken mee als kosten en verkrijgbaarheid van het materiaal.

4 Conclusies

Op grond van deze literatuurstudie kan worden geconcludeerd dat er recentelijk geen materialen zijn ontwikkeld die tot grote doorbraken hebben geleid op het gebied van bescherming tegen explosie-effecten.

Huidige concepten gebruiken 'traditionele' materialen zoals staal, beton, zand, water, vezelversterkte kunststoffen en keramiek.

Materialen worden wel doorontwikkeld, maar dit is evolutionair en niet revolutionair. Veel onderzoek is gericht op een beter begrip van het materiaalgedrag onder bepaalde belastingen zoals impact en blast. Op grond van dit verbeterde begrip kan het materiaal of de constructie verbeterd worden. Ook leidt dit betere begrip tot betere modellen, zodat door middel van simulaties de constructierespons als gevolg van een impact of blastbelasting beter kan worden voorspeld.

Een duidelijke trend die waarneembaar is, is dat steeds meer materialen gecombineerd worden in composieten, laminaten of sandwichconstructies. Zo probeert men om tot een optimale mix van eigenschappen te komen.
Het gebruik van polyurethaan en polyurea in dit soort combinaties komt veelvuldig voor. Bij het ontwikkelen van sandwichconstructies wordt ook onderzoek gedaan naar constructieve mogelijkheden om energie te dissiperen. Het gebruik van vakwerk-constructies als kern maakt het mogelijk energie op te nemen door middel van (lokale) knik.

De inventarisatie van materialen in dit rapport zal gebruikt worden als basis voor het ontwikkelen van nieuwe afschermingconcepten binnen V701 om explosie-effecten te reduceren. Om tot een efficiënte en effectieve constructie te komen, is het van groot belang een goed pakket van eisen en wensen te formuleren. De gebruiker moet hierin een grote rol krijgen. De materiaalkeuze moet dan ook in de context van het pakket van eisen worden gezien. Vorm, productieproces, maar ook bijvoorbeeld kosten en verkrijgbaarheid, zijn daarom ook van groot belang.

5 Referenties

[1] Ashby, M.F., *Materials selection in Mechanical Design*, ISBN 0-08-041907-0, Pergamon Press Ltd., 1993.

[2] *Explosion resistant assembly including mutually engageable flanges*, US Patent 6,089,389, 18 juli 2000.

[3] Deursen, van, J.R., et al., *Development of an explosion resistant Wastelift*, TNO-rapport TNO-DV 2006 C235, juli 2006 (Bedrijfsvertrouwelijk).

[4] *Materials Research to Meet 21st Century Defense Needs*, Committee on Materials Research for Defense After Next, National Research Council, ISBN: 0-309-08700-7, 2003.

[5] Gillespie, J.W. (Ed.), *High-Performance Structural Fibers for Advanced Polymer Matrix Composites*, Committee on High-Performance Structural Fibers for Advanced Polymer Matrix Composites, National Research Council, ISBN 0-309-54943-4, 2005.

[6] Said, M.A. , et al., *Investigation of ultra violet (UV) resistance for high strength fibers*, Advances in Space Research 37, pp. 2052–2058, 2006.

[7] *ZYLON® (PBO fiber) Technical Information*, Toyobo brochure, revision 2005.6, 2005.

[8] Andres Leal, A., et al., *Assessment of compressive properties of high performance organic fibers*, Composites Science and Technology 67, pp. 2786–2794, 2007.

[9] Jagt, van der O.C., et al., *The potential of a new rigid-rod polymer fibre ('M5') in advanced composite structures*, Polymer, Volume 40, Issue 4, pp 1035-1044, februari 1999.

[10] Cunnif, P.M., et al., *High performance "M5" fiber for ballistics/structural composites*, Proceedings of the 23rd Army Science Conference, Orlando, FL, 2002.

[11] Wambua, P., et al., *The response of natural fibre composites to ballistic impact by fragment simulating projectiles*, Composite Structures 77, pp. 232–240, 2007.

[12] Yi, J., et al., *Large deformation rate-dependent stress–strain behavior of polyurea and polyurethanes*, Polymer 47, pp. 319–329, 2006.

[13] Alonso, M.V., et al., *Short-fiber-reinforced epoxy foams*, Composites: Part A 37, pp. 1952–1960, 2006.

[14] Karamis, M.B., *Analyses of metallurgical behavior of Al–SiCp composites after ballistic impacts*, Composite Structures 64 pp. 219–226, 2004.

[15] Karamis, M.B., et al., *Surface characteristics of projectiles after frictional interaction with metal matrix composites under ballistic condition*, Wear 261 pp. 738–745, 2006.

[16] Karamis, M.B., *Tribology at high-velocity impact*, Tribology International 40 pp. 98–104, 2007.

[17] Hezhou Yea, et al., *Fabrication of metal matrix composites by metal injection molding—A review*, Journal of materials processing technology 200, pp. 12–24, 2008.

[18] Koch, D., et al., *Ceramic fiber composites: Experimental analysis and modeling of mechanical properties*, Composites Science and Technology 68 pp. 1165–1172, 2008.

[19] Boccaccini, A.R., et al., *Fracture behaviour of mullite fibre reinforced–mullite matrix composites under quasi-static and ballistic impact loading*, Composites Science and Technology 65, pp. 325–333, 2005.

[20] Clausen, A.H., et al., *Flow and fracture characteristics of aluminium alloy AA5083–H116 as function of strain rate, temperature and triaxiality*, Materials Science and Engineering A 364 pp. 260–272, 2004.

[21] Jacob, N., et al., *The effect of stand-off distance on the failure of fully clamped circular mild steel plates subjected to blast loads*, Engineering Structures 29, pp. 2723–2736, 2007.

[22] Meyer JR, H.W., et al., *Modeling the high strain rate behavior of Titanium undergoing ballistic impact and penetration*, International Journal of Impact Engineering 26, pp. 509-521, 2001.

[23] Majewa, K., et al., *The design of advanced performance high strength low-carbon martensitic armour steels- Microstructural considerations*, Materials Science and Engineering A 480, pp. 160–166, 2008.

[24] Bahei-El-Din, Y.A., et al., *A blast-tolerant sandwich plate design with a polyurea interlayer*, International Journal of Solids and Structures 43, pp. 7644–7658, 2006.

[25] http://www.polyurea.com/spps/ahpg.cfm?spgid=94 (2008).

[26] Tekalur, A.S., et al., *Blast resistance of polyurea based layered composite materials*, Composite Structures 84, pp. 271–281, 2008.

[27] Xue, Z. en Hutchinson, J.W., *Preliminary assessment of sandwich plates subject to blast loads*, International Journal of Mechanical Sciences 45, pp. 687–705, 2003.

[28] Hause, T. en Librescu, L., *Dynamic response of anisotropic sandwich flat panels to explosive pressure pulses*, International Journal of Impact Engineering 31, pp. 607–628, 2005.

[29] Hause, T. en Librescu, L., *Dynamic response of doubly-curved anisotropic sandwich panels impacted by blast loadings*, International Journal of Solids and Structures 44, pp. 6678–6700, 2007.

[30] Radford, D.D., et al., *The response of clamped sandwich plates with metallic foam cores to simulated blast loading*, International Journal of Solids and Structures 43, pp. 2243–2259, 2006.

[31] Bahei-El-Din, Y.A., et al., *Enhancement of blast resistance of sandwich plates*, Composites: Part B 39, pp. 120–127, 2008.

[32] Hoo Fat, M.S. et al., *Perforation of honeycomb sandwich plates by projectiles*, Composites: Part A 31, pp. 889–899, 2000.

[33] Zok, F.W., et al., *A protocol for characterizing the structural performance of metallic sandwich panels: application to pyramidal truss cores*, International Journal of Solids and Structures 41, pp. 6249–6271, 2004.

[34] Wadley, H., et al., *Compressive response of multilayered pyramidal lattices during underwater shock loading*, International Journal of Impact Engineering 35, pp. 1102–1114, 2008.

[35] Jungwirth, C.J., et al., *Experiment assessment of the ballistic response of composite pyramidal lattice truss structures*, Composites: Part B 39, pp. 556–569, 2008.

[36] Reyes Villanueva, G., *The high velocity impact response of composite and FML-reinforced sandwich structures*, Composites Science and Technology 64, pp. 35-54, 2004.

[37] Vlot, A., *Glare, history of the development of a new aircraft material*, Delft University of Technology, Kluwer Academic Publishers, 2001.

[38] Beumler, Th., *Flying Glare*, Thesis Delft University of Technology, Delft University Press, ISBN: 90-407-2481-4, 2004.

[39] Hoo Fat, M.S., et al., *Ballistic impact of GLAREe fiber–metal laminates*, Composite Structures 61, pp. 73–88, 2003.

[40] Langdon, G.S., et al., *Behaviour of fibre–metal laminates subjected to localised blast loading: Part I—Experimental observations*, International Journal of Impact Engineering 34, pp. 1202–1222, 2007.

[41] Lemaniski, S.L., et al., *Behaviour of fibre metal laminates subjected to localised blast loading—Part II: Quantitative analysis*, International Journal of Impact Engineering 34, pp. 1223–1245, 2007.

[42] Langdon, G.S., et al., *The response of fibre metal laminate panels subjected to uniformly distributed blast loading*, European Journal of Mechanics A/Solids 27, pp. 107–115, 2008.

[43] Langdon, G.S., et al., *Localised blast loading of fibre–metal laminateswith a polyamide matrix*, Composites: Part B 38, pp. 902–913, 2007.

[44] Abdullah, M.R., et al., *The impact resistance of polypropylene-based fibre–metal laminates*, Composites Science and Technology 66, pp. 1682–1693, 2006.

[45] Cortés, P., et al., *The fracture properties of a fibre–metal laminate based on magnesium alloy*, Composites: Part B 37, pp. 163–170, 2006.

[46] Burchitz, I., et al., *Highlights of designing with Hylite – a new material concept*, Materials and Design 26, pp. 271–279, 2005.

[47] Molinari, A., et al., *Modeling plastic shocks in periodic laminates with gradient plasticity theories*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids 54, pp. 2495-2526, 2006.

[48] Mekky, W., et al., *Modeling constrained metal behavior in ceramic/metal laminates*, Composites: Part B 39, pp. 497–504, 2008.

[49] Britan, A., et al., *Shock wave attenuation by granular filters*, International Journal of Multiphase Flow 27, pp. 617-634, 2001.

[50] Schwer, D.A., et al., *Numerical simulations of the mitigation of unconfined explosions using water-mist*, Proceedings of the Combustion Institute 31, pp. 2361–2369, 2007.

[51] Britan, A., et al., *Drainage effects on shock wave propagating through aqueous foams*, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 309, pp. 137–150, 2007.

[52] Gama, A.B., et al., *Aluminium foam integral armor: a new dimension in armor design*, Composite Structures 52, pp. 381-395, 2001.

[53] Woodfin, R.L., *Using Rigid Polyurethane Foams (RPF) for Explosive Blast Energy Absorption in Applications Such as Anti-Terrorist Defenses*, Sandia report SAND2000-0958, 2000.

[54] *Method of armoring a window*, Patent PCT/NL2007/050516, WO2008/051077 A1, 2008).

[55] Lee, Y.S., et al., *Advanced body armor utilizing shear thickening fluids*, Proceedings of 23rd Army Science Conference. Orlando, FL. 2-5 december 2002.

[56] Rosen, B.A., et al., *Multi-threat performance of kaolin based shear thickening fluid (STF)-treated fabrics*, Proceedings of SAMPE 2007, Baltimore, MD. 3-7 juni 2007.

[57] Kalman, D.P., et al., *Polymer dispersion based shear thickening fluid-fabrics for protective applications*, Proceedings of SAMPE 2007, Baltimore, MD. 3-7 juni 2007.

[58] Guoqiang, L., et al., *A crumb rubber modified syntactic foam*, Materials Science and Engineering A 474, pp. 390–399, 2008

6 Ondertekening

Rijswijk, november 2008

TNO Defensie en Veiligheid

dr. ir. J.L. Verolme
Afdelingshoofd

ir. O.C. van der Jagt
Auteur

ONGERUBRICEERD

REPORT DOCUMENTATION PAGE
(MOD-NL)

1. DEFENCE REPORT NO (MOD-NL)	2. RECIPIENT'S ACCESSION NO	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO
TD2008-0149	-	TNO-DV 2008 A357
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO	**5. CONTRACT NO**	**6. REPORT DATE**
032.12274	-	November 2008
7. NUMBER OF PAGES	**8. NUMBER OF REFERENCES**	**9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED**
44 (excl RDP & distribution list)	58	Final

10. TITLE AND SUBTITLE

Inventory of materials to be used in explosive effects mitigating structures
(Inventarisatie van materialen te gebruiken in constructies ter afscherming van explosie-effecten)

11. AUTHOR(S)

O.C. van der Jagt, MSc

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)

EOC-KL, Gutenbergweg 10, 4104 BA Culemborg

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))

Recent developments in material science may lead to better mitigating structures for the disposal of UXOs and IEDs. Within the framework of Work Package 4000 of the MOD program V701, a new concept mitigating structure will be developed. The goal of this literature study is to survey recent developments in material science and especially if any new material has the potential to be used successfully in explosive effects mitigating structures. This study aims to make an inventory of materials used in explosion effects mitigating structures and studied materials or material combinations. The conclusion is that no new breakthrough developments in the field of material science have occurred recently, that have lead to new concepts in explosive effects mitigating structures. Current structures use 'traditional' materials like steel, concrete, sand, water, fibre reinforced plastics and ceramics. There is progress in material development, but this is evolutionary, not revolutionary. The material inventory of this report will used as a basis for the development of new explosion effects mitigating concepts within the program V701. To come to an efficient and effective structure, it is imperative to have a complete list of requirements. Shape, production process, and also costs and material availability are important factors.

16. DESCRIPTORS		IDENTIFIERS
Blast mitigation Fragment resistant	Materials	-

17a. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT)	17b. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE)	17c. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT)
Ongerubriceerd	Ongerubriceerd	Ongerubriceerd

18. DISTRIBUTION AVAILABILITY STATEMENT	17d. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES)
Unlimited Distribution	Ongerubriceerd

ONGERUBRICEERD

Distributielijst

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

1	DMO/SC-DR&D (inclusief digitale versie op cd-rom)
2/3	DMO/DR&D/Kennistransfer
4	Programmabegeleider Defensie, EOC-KL, lkol R. Pijtak
5	Projectbegeleider Defensie, EOC-KL, LTZ1 ing. J. de Ruiter
6/8	Bibliotheek KMA
9	Programmaleider TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Rijswijk businessunit Bescherming, Munitie en Wapens, ir. J.R. van Deursen
10	DMO/DWS&B/RZS&B/PLTFT/Signatuur en EM Technologie (SIGEMT), ing. J.M. Parent
11	TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Rijswijk, Business Unit Bescherming, Munitie en Wapens, ir. O.C. van der Jagt

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, ing. J.V. Elsendoorn
1 ex	TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Rijswijk Manager Bescherming, Munitie en Wapens (operaties), ir. P.J.M. Elands
1 ex	TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Rijswijk, Bescherming, Munitie en Wapens (kennis), dr. A.G.T.M. Bastein
1 ex	TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Rijswijk, Bescherming, Munitie en Wapens (markt), dr. ir. L.H.J. Absil
1 ex.	TNO Defensie en Veiligheid, Directie Directeur Operaties, drs. H.J. Vink
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), ir. B. Dunnebier PDeng
1 ex.	TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Den Haag, Manager Informatie en Operaties (operaties), ir. P. Schulein
1 ex.	TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Rijswijk, Manager Biologische en Chemische Bescherming (operaties), ir. R.J.A. Kersten