

## Kogelwerende vesten

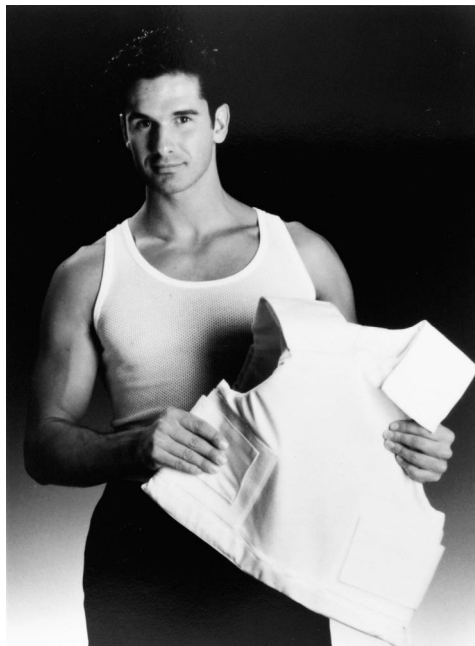
*door ir. Marga van Zundert,  
wetenschapsjournalist*

Deze Chemische Feitelikheden is geschreven in samenwerking met dr. Anton H.M. Schotman, Teijin Twaron, Applied Analysis & Polymer Physics, Postbus 9600, 6800 TC Arnhem.  
tel. 026 366 1388, e-mail: [anton.schotman@twaron.com](mailto:anton.schotman@twaron.com)

1.	Kunststof vervangt staal	196– 3
2.	Supersterke vezels	196– 4
2.1	Aramide	196– 5
2.2	Polyethyleen	196– 7
2.3	Sterk, sterker, sterkst	196– 8
2.4	Zijde	196– 9
2.5	Andere vezels	196–11
3.	Weven of plakken	196–11
4.	Een kogel stoppen	196–13
5.	Een mes stoppen	196–16
6.	Vliegtuigdeuren, helmen, handschoenen, pantserovertuigen, ...	196–16
7.	Literatuur en referenties	196–17

**1. Kunststof vervangt staal**

0886-0346



*Kogelwerend vest (foto: Teijin Twaron BV)*

Tot vijftien jaar geleden leken agenten met kogelwerende vesten nog veel op de ridders *Arthur* en *Lancelot*. Ze sleepten bijna dertig kilo staal op hun borst mee om zich te beschermen tegen kogels. De meeste agenten hadden een hekel aan de vesten en lieten ze liever thuis. Het vest maakte ze log, traag en zweterig; ze droegen het alleen wanneer het overduidelijk was dat er groot gevaar dreigde. Inmiddels is er veel veranderd. Begin 2002 besloot de politie om alle agenten een kogelwerend vest te laten dragen onder risicovolle omstandigheden. Het vest is inmiddels een „T-shirt” geworden. Het is even effectief als de dertig kilo staal van vijftien jaar geleden, maar weegt amper drie pakken melk. Het valt soepel, waardoor agenten er bijvoorbeeld gemakkelijk mee over een schuttinkje kunnen klimmen en er is inmiddels een damesmodelletje. Het moderne vest kost

een slordige 500 euro. Op internet besteld, ligt het vest dezelfde week nog op de deurmat.

Dat de vesten zoveel comfortabeler zijn, komt omdat ze van kunststof zijn gemaakt. Niet van het huis-, tuin- en keukenplastic, wat we kennen van verpakkingen en afvoerpijpen, maar van moderne supersterke en vederlichte kunststofvezels, zoals Twaron<sup>®</sup>, Kevlar<sup>®</sup>, Dyneema<sup>®</sup> en Spectra<sup>®</sup>. Deze kunststofvezels zijn zeker tien maal lichter dan staal van dezelfde sterkte.

Kogelwerende vesten zijn de laatste tijd erg populair. Niet alleen de politie schaft ze massaal aan, ook portiers en bodyguards dragen ze. Sinds de aanslagen van elf september 2001 is de vraag naar supersterke kunststofvezels groter dan het aanbod. Constructies van supersterke vezels bieden extra veiligheid en zijn daarom geschikt voor de bepantsering van auto's, vliegtuigen en helikopters. Met name naar „kogelvrije” vliegtuigdeuren is op dit moment grote vraag.

## 2. Supersterke vezels

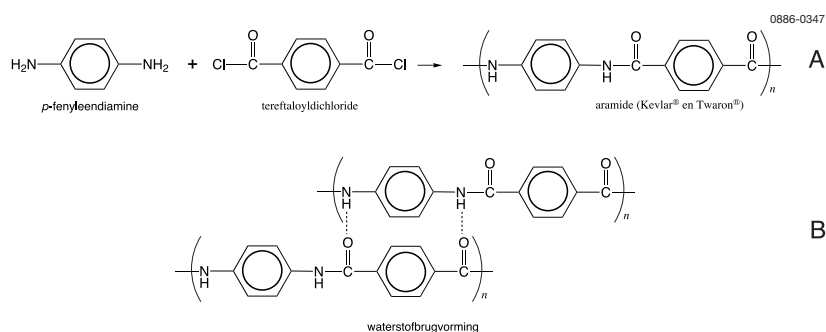
Al in de jaren dertig van de vorige eeuw berekenden wetenschappers dat kunststoffen erg sterk zouden moeten kunnen zijn. Het duurde echter meer dan vijftig jaar voordat chemici die sterke plastics ook daadwerkelijk konden maken. Om zo sterk te zijn zouden de lange ketenmoleculen, waaruit kunststoffen bestaan, namelijk vezels moeten vormen, dat wil zeggen de ketenmoleculen moeten netjes en uitgestrekt naast elkaar liggen. Ordenen is een hele klus; de ketenmoleculen zijn namelijk extreem lang, ze zijn vergelijkbaar met meterslange haren of spaghettislierten.

In normale kunststoffen liggen de ketenmoleculen chaotisch door elkaar en in elkaar. Trek je aan één van de uiteinden, dan zoekt de spanning de zwakste punten op, dat zijn de loze ruimtes tussen klussen of toevallige schuifvlakken. Daar breekt uiteindelijk het materiaal. Wanneer de ketens echter netjes uitgestrekt naast elkaar liggen, heeft het materiaal maar één zwak punt: de kracht tussen de ketens. Chemici hebben daarom naar mogelijkheden gezocht om de ketenmoleculen te ordenen. Twee typen supersterke kunststofvezels zijn inmiddels te koop: aramide en polyethyleen.

## 2.1 Aramide

Het recept voor supersterke kunststofvezels klinkt eenvoudig: zorg ervoor dat de ketenmoleculen netjes naast elkaar liggen en dat ze elkaar onderling goed „vasthouden”, zodat ze bij belasting niet van elkaar afschuiven. Wanneer dit lukt worden voornamelijk de bindingen binnenin het molecuul (tussen de atomen) belast en die zijn erg sterk.

Onderzoekers van Akzo Nobel en DuPont vonden ongeveer tegelijkertijd een kunststof die aan die eisen voldeed: aramide (figuur 1A). Aramide is een afkorting voor *aromatische polyamide*. Strikt genomen staat de naam aramide niet voor één kunststof, maar voor een klasse van kunststoffen, namelijk polyamides die aromatische groepen bevatten. Maar de naam wordt meestal gebruikt om het veruit meest geproduceerde type aan te duiden: polyparafoenyleen tereftalamide (PPTA), beter bekend onder de merknaam Twaron<sup>®</sup> of Kevlar<sup>®</sup>.



Figuur 1. Structuurformule van aramide en uitgangsstoffen. De amidebindingen vormen onderling waterstofbruggen (A). Als gevolg van interactie tussen NH en C=O in de amidebindingen ontstaan waterstofbruggen (B).

Aramide is een stijf polymeer. De aromatische ringen zijn vlak en star en om de tussengelegen amidebindingen te verbuigen is veel energie nodig. Hierdoor zijn de ketenmoleculen relatief makkelijk te ordenen, van nature liggen de ketenmoleculen namelijk al graag languit. Door de interactie tussen de amidebindingen in de keten met de dubbelgebonden O-atomen (ketonen), ontstaan bovendien

krachten tussen de ketens. Ze vormen onderling zogenaamde waterstofbruggen (zie figuur 1B).

Aramide wordt gesynthetiseerd door polymerisatie van p-fenyleen diamine (PPD) en tereftaloyl dichloride (TDC). De reactie vindt plaats in het organische oplosmiddel N-methyl-2-pyrrolidon (NMP), en levert uiteindelijk een poedervormig product op. Hierin liggen de ketenmoleculen kriskras door elkaar. Het oriënteren van de ketenmoleculen gebeurt in een spinproces. Het poeder wordt opgelost in heet (85°C), geconcentreerd zwavelzuur. Deze oplossing wordt door een spindop geperst, een soort „douchekop” met duizend piepkleine gaatjes. Na de spindop is een luchtspleet van ongeveer een centimeter breed, met daaronder een waterbak. De dunne stralen polymeeroplossing belanden in de waterbak waarin het polymeer, het aramide, neerslaat, zodat dunne, vaste draden ontstaan die over spoelen door een lange waterbak getrokken worden. Doordat aan het eind aan de draden getrokken wordt, worden de draden verstrekt tot maximaal tien maal de oorspronkelijke lengte. De draden, ook wel filamenten genoemd, zijn uiteindelijk zo'n twaalf micrometer dik en met het oog net zichtbaar. Het spinnen en de aard van de kunststof zorgen ervoor dat de ketenmoleculen zich in de lengterichting oriënteren. In de waterbak wordt ook het zwavelzuur uitgewassen, waarna de bundel van duizend draden gedroogd en op spoelen gewikkeld wordt.

Geconcentreerd zwavelzuur is zeer corrosief en zeker geen prettig oplosmiddel, maar het is ook het enige oplosmiddel dat goed werkt. Alle apparatuur, wasbakken en stoffilters die in het spinproces gebruikt worden, zijn van een speciale zuurbestendige materialen gemaakt. Bij het opstarten van de spinlijn dragen werknemers die in de buurt moeten zijn van de spindop speciale beschermingspakken. Het zwavelzuur mag niet worden geloosd. Het wordt vaak moment ingedampt tot 78% en verkocht, maar omdat het aanbod groter is dan de vraag ontwikkelen fabrikanten processen om het zwavelzuur nog verder in te dampen en in de fabriek te recyclen.

De aramiden zijn sinds eind jaren zeventig op de markt. Er zijn twee producenten: het Amerikaanse DuPont (merknaam: Kevlar<sup>®</sup>) en het Japans/Nederlandse Teijin Twaron (merknaam: Twaron<sup>®</sup>). Twaron was tot 2000 eigendom van Akzo Nobel.

DuPont en Akzo Nobel hebben jarenlang een verhitte en geldverblindende patentstrijd gevoerd. De bedrijven verweten elkaar inbreuk te maken op patenten. DuPont stelde dat Akzo Nobel een patent over de spintechniek, met name de luchtspleet, schond. Akzo Nobel meende het alleenrecht te hebben op de polymerisatie in N-methyl-2-pyrrolidon (NMP). Uiteindelijk is het tot een soort uitruil van rechten gekomen.

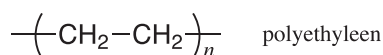
## 2.2 Polyethyleen

Polyethyleen (vaak afgekort tot polyetheen, polytheen of PE) is een veel gebruikte kunststof in onder meer opbergdozen, verpakkingsfolie, flessen, kratten, isolatiemateriaal etc. Voor toepassingen in kogelvrije vesten wordt polyethyleen gebruikt van extreem lange, onvertakte ketenmoleculen, in vaktaal: *ultra high molecular weight polyethyleen* (UHMW-PE). Producenten zijn het Nederlandse DSM, merknaam Dyneema<sup>®</sup>, en het Amerikaanse Honeywell, merknaam Spectra<sup>®</sup>. Spectra<sup>®</sup> is ontwikkeld door Allied-Signal, dat gebruik maakt van een licentie van DSM. Allied-Signal is nu een onderdeel van het Honeywell concern.

Polyethyleen (zie figuur 2) is in tegenstelling tot aramide een zeer flexibel ketenmolecuul. Ook vertonen de ketens onderling geen speciale aantrekkingskrachten. Op het eerste gezicht dus geen echt logische kandidaat voor een supersterke kunststofvezel. Toch is polyethyleen op dit moment de sterkste kunststofvezel op de markt. Het „geheim” zit vooral in de extreme lengte van de ketenmoleculen. Een gemiddeld ketenmolecuul telt meer dan honderdduizend schakels. Trekken we de vergelijking met spaghetti weer, dan komen we uit op slierten van wel honderd meter lang.

Hoewel polyethyleen ketenmoleculen onderling geen waterstofbruggen vormen of andere bindingen, houden de ketenmoleculen elkaar toch enigszins vast. Zoals alle moleculen oefenen ze namelijk Van der Waalskrachten op elkaar uit. Dit zijn elektrische aantrekkingskrachten die ontstaan door elektronenwolken om atomen. De kracht is erg zwak, maar als twee ketenmoleculen maar lang genoeg zijn, dan tellen de bijdragen van alle moleculen op tot een aanzienlijke totale aantrekkingskracht.

Om de Van der Waalskrachten optimaal te benutten is het belangrijk dat de ketenmoleculen netjes uitgestrekt naast elkaar liggen. Voor PE betekent dit vooral dat er geen vertakkingen in de keten zitten, een veel voorkomende „fout” bij de huis-, tuin-, en keukenversie. Een speciale katalysator (Ziegler-Natta katalysator) zorgt er bij de productie van UHMW-PE voor dat vrijwel alle eenheden netjes kop-staart worden geschakeld.



0886-0348

*Figuur 2. Structuur polyethyleen (PE).*

De „PE-spaghetti” die bij de polymerisatie ontstaat, wordt vervolgens ontward in een zogenaamde gel-spinproces. Het polymeer wordt opgelost in een hydrofoob organisch oplosmiddel. Daarbij ontstaat een taai, stroperig mengsel, een gel, die door een spindop wordt geperst. De dunne draden, die uit de spindop komen, worden over hete spoelen geleid ( $T=120\text{--}180^\circ\text{C}$ ). De laatste spoel draait vele malen harder dan de eerste. Terwijl het oplosmiddel langzaam verdampft, wordt de draad daarbij tot een veelvoud van de oorspronkelijke lengte uitgerekt. Het is vooral deze grote verstrekking die ervoor zorgt dat de lange ketens zich in de trekrichting ordenen.

### 2.3 Sterk, sterker, sterkst

Polyethyleen is, bij hetzelfde gewicht, sterker dan aramide (zie tabel 1). Het wordt dan ook gebruikt bij vesten die aan zeer hoge veiligheidseisen moeten voldoen. Voor de „gewone” toepassingen voldoet aramide vaak prima. Beide vezels hebben hun specifieke voor- en nadelen. Polyethyleen is sterker, maar kan niet tegen al te hoge temperaturen. Het materiaal smelt bij  $140^\circ\text{C}$ , en „kruipt” meer. Dat wil zeggen dat het onder continue belasting enigszins uitrekt. De polyethyleen kan daarentegen weer wel veel beter tegen licht en vocht dan aramide.

Tabel 1. Hoogste commerciële treksterkte op gewichtsbasis

Vezel	Treksterkte (in N/tex*)
Zylon	3,7
Polyethyleen	3,7
Aramide	2,3
Natuurlijk spindraad (spinnenweb)	1,7
Nylon	0,8
Natuurlijke zijde (zijderups)	0,4
Staal	0,2

\*tex: een eenheid om de fijnheid van de vezel uit te drukken: 1 tex = 1 gram per 1000m

In de praktijk haalt overigens de beste kunststofvezel van een bepaalde lengte maar een vijfde van de theoretische mogelijke sterkte (de sterkte van de atomaire bindingen). Dat komt doordat er altijd kleine imperfecties in een kunststofvezel aanwezig zijn. En het werkelijk perfect oriënteren van de vele ketenmoleculen (in één gram zijn dat er nog altijd een slordige 30.000.000.000.000.000 moleculen) is (nog) onmogelijk.

Tabel 2. De (denkbeeldige) maximale lengte waarbij een touw van de onderstaande materialen zou breken onder het eigen gewicht.

Vezel	lengte (in km)
Zylon/Polyethyleen	400
Aramide	235
Natuurlijk spinnenzijde	190
Glasvezel	135
Nylon	85
Staal	25

## 2.4 Zijde

In vroegere tijden droegen Japanse krijgers pantsers van natuurzijde om zich te beschermen tegen pijlen en de eerste geweerkogels. In de negentiende eeuw volgden Europese edellieden hun voorbeeld. Zijde van de zijderups is een natuurproduct en bestaat uit eiwitten. Het materiaal is relatief sterk, doordat de vezels goed geordend zijn en



de afzonderlijke vezels „oneindig” lang zijn. „Kogelwerende” vesten van rupsenzijde zijn echter geenszins bestand tegen moderne kogels. Nog ouder is de legende over de zijden pantsers van de soldaten van de machtige Mongoolse keizer Genghis Khan. Zijn manschappen zouden onoverwinnelijk zijn dankzij lederen tunieken doorweven met spinnenzijde. Alle pijlen ketsten af op de tunieken. Bewijs voor de legende is nooit gevonden, maar het idee is niet vreemd. Sommige spinnen maken erg sterk en vooral extreem taai spinnenrag; de dunne draden (tien maal dunner dan een haar) kunnen een insect, dat op volle snelheid (circa 25 km per uur) vliegt, stoppen.

Er zijn verwoede pogingen gedaan om spinnenboerderijen op te zetten om de sterke, natuurlijke vezel in grote hoeveelheden te produceren, net als rupsenzijde. Die pogingen strandden echter allemaal op de sterke territoriumdrift van spinnen; ze vechten elkaar dood of kwijnen weg. Een Canadees bedrijf, Nexia Biotechnologies, probeert nu „spinnenzijde” uit de melk van genetisch gemodificeerde geiten te isoleren en te verspinnen. De geiten dragen een spinnen-gen dat zorgt voor de aanmaak van zijde-eiwit in hun melk. Het is het zijde dat de „spaken” vormt in een spinnenweb. De fabrikant prijst het materiaal, genaamd Biosteel<sup>®</sup>, aan als de meest milieuvriendelijke sterke vezel. Zij verwachten in het spinproces geen organische oplosmiddelen nodig te hebben.

Biosteel<sup>®</sup> wordt nu getest als sterk en bioafbreekbaar verbandmateriaal. Voor toepassing in kogelvrije vesten is Biosteel<sup>®</sup> echter minder geschikt omdat spinnendraden ook erg elastisch zijn. Voor een web is dat handig, de elasticiteit vangt een deel van de energie van de in het web gevangen prooien op. Maar een vest met elasticiteit is natuurlijk niet wenselijk; het moet zo min mogelijk indeuken om schade aan het lichaam te voorkomen. Nexia probeert daarom ook een niet-elastische variant te ontwikkelen.

Behalve treksterkte en elasticiteit, zijn ook temperatuur- en vochtbestendigheid belangrijke parameters die de kwaliteit van een vezel bepalen. Met name op temperatuur- en vochtbestendigheid hebben de meeste oudere kunststofvezels het laten afweten.

## 2.5 Andere vezels

Aramide en polyethyleen zijn op dit moment de meest verkochte supersterke vezels. Maar er zijn andere en de zoektocht naar nog sterkere vezels gaat door. Er zijn verschillende vezels die chemisch gezien „variëties” zijn op de aramidevezel (figuur 3), voorbeelden hiervan zijn het Russische Rusar<sup>®</sup> (een poly(p-fenyleenbenzimidazoltereftalamide), Technora<sup>®</sup> van Teijin Twaron en het brandwerende Kermel<sup>®</sup> van Rhodia. Ook brengen DuPont en Teijin Twaron een temperatuurbestendige aramidevezel op de markt, genaamd Nomex<sup>®</sup> (DuPont) of TeijinConex<sup>®</sup> (Teijin Twaron). Deze vezel is echter niet supersterk. Doordat elke vezel weer andere eigenschappen heeft, bedient ieder zijn eigen marktsegment.

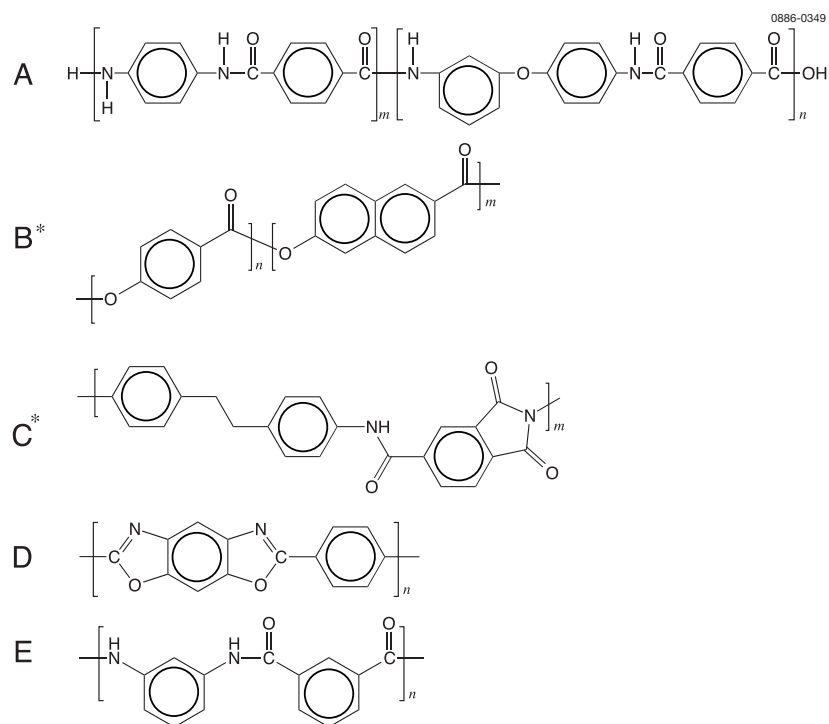
Een voorbeeld van een andere, niet-aramidevezel is Zylon<sup>®</sup> van de Japanse firma Toyobo. De officiële chemische naam is poly(p-fenyleen-2,6-benzobisoxazole) (PBO). De vezel is heel sterk (tabel 1 en tabel 2), maar heeft als nadeel dat hij onder bepaalde omstandigheden erg vochtgevoelig is. Weer een andere vezel is Vectran<sup>®</sup> geproduceerd door Celanese. De moleculen in deze vezel zijn erg star en recht. De moleculen hebben de neiging zich te oriënteren en door tijdens het spinnen spanning aan te brengen, ontstaat vloeibaar kristallijn materiaal. Dit wordt onder meer gebruikt in de elektronica, bijvoorbeeld voor het verstevigen van printplaten en als versteviger van optische vezelkabels.

## 3. Weven of plakken

Supersterke vezels kunnen op twee manieren verwerkt worden tot een kogelwerend vest. De vezelbundels kunnen worden geweven tot een textiel, net als kleding, of worden „geplakt”. Weven geeft een soepel vallende, comfortabele stof. Een laag of vijftien van deze weefsels is veelal sterk genoeg om een kogel te stoppen. Een nadeel van weven is echter dat de vezels niet helemaal strak staan in het materiaal. Komt er een kogel op het vest, dan wordt de vezel eerst strak getrokken voordat hij belast wordt.

Een goed alternatief, ontwikkeld door DSM en Honeywell, is het „plakken” van vezels tot *shieldmateriaal*. Vezelbundels worden strak

196-12 Kogelwerende vesten



Figuur 3. Structuren van verschillende commercieel verkrijgbare sterke vezels: (A) Technora<sup>®</sup> (Teijin Twaron), (B) Vectran<sup>®</sup> (Celanese), (C) Kermel<sup>®</sup> (Rhodia), (D) Zylon<sup>®</sup> (Toyobo) en (E) Nomex<sup>®</sup>/TeijinConex<sup>®</sup> (Dupont/Teijin Twaron).

\*Van B en C bestaan meer types die in structuur enigzins van elkaar verschillen

naast elkaar gelegd en aan elkaar gelijmd met een hars. Dit is een precisiewerk: de garens moeten zo dicht bij elkaar liggen dat een kogel zich er niet tussen kan wringen, maar er moet ruimte tussen de garens zijn voor de hars. De gebruikte harsen zijn ook kunststoffen, bijvoorbeeld polyethyleen of polyurethaan. Twee of meer van de vezellagen, om-en-om dwars op elkaar, vormen een vel. De vellen worden gebruikt om schildmateriaal te maken voor kogelwerende vesten.

Een nieuw concept van Teijin Twaron is een soort tussenvorm tussen weven en plakken. De supersterke vezels liggen in een richting,

maar in de dwarsrichting is er een dunne polyesterdraad doorheen geweven. Het geheel is dan ingebed in een hars.

#### 4. Een kogel stoppen

Als een kogel op een kogelwerend vest wordt geschoten, is aan de buitenkant van het vest enkel een kleine deuk en een gaatje te zien op de plaats van de inslag. De kogel is terug te vinden in het vest, hij hangt vervormd tot een paddestoel tussen de lagen supersterke vezels. Hoe dik en sterk een kogelvrij vest ook is, een schot opvangen is geen pretje. Een inslag voelt als een flinke stomp. Vitale organen zoals hart en longen zijn veilig, maar een flinke bloeding heeft de getroffene altijd, en met een beetje pech ook een gekneusde of gebroken rib.

Technisch bezien is een kogel stoppen een kwestie van de bewegingsenergie van de kogel effectief opvangen. Het best gaat dat als de energie over een groot oppervlak verdeeld wordt. De kracht wordt dan door vele vezels opgebracht. Het maken van een kogelwerend – een ballistisch – materiaal is een vak op zichzelf. Vele factoren spelen een rol: de sterkte van de gebruikte vezel, de rek, de wrijving van de vezels over elkaar, de interactie van de verschillende lagen, het soort kogel, de hoek van binnenkomst, de strakheid van het weefsel of het gebruikte hars etc. Er bestaan diverse goed onderbouwde theorieën en modellen, maar vele verbeteringen zijn nog steeds gebaseerd op creativiteit van de onderzoeker en veel *trial and error* werk.

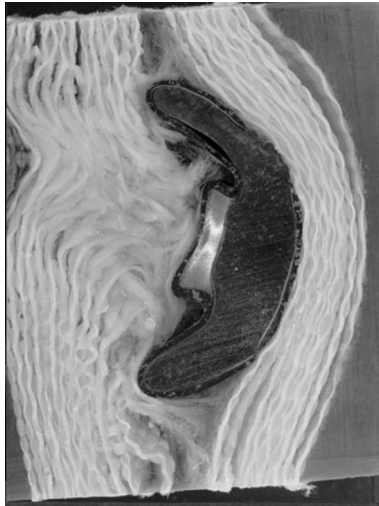
Vesten moeten ook geregeld aangepast worden aan nieuwe kogels. „Normale” munitie heeft een loden kern. Zodra zo'n kogel botst op het doel, vervormt de kogel. Dit is met opzet, immers een kogel die vervormt richt veel schade aan. Het vlees wordt omgewoeld en de kogel geeft zo al zijn energie af. Aan een kogeltje daarentegen dat mooi rond blijft, houdt het slachtoffer slechts een klein gaatje over. Voor kogelvrije vesten zijn de loden kogels goed te stoppen. Ze deuken in zodra ze het vest raken, zodat de energie over een groot aantal vezels verdeeld wordt. Veel lastiger zijn de zogenaamde *cop-killers*; kogels voorzien van een glad teflon puntje. Deze munitie is ontwikkeld om slijtage van de loop van wapens te reduceren, maar zou

## 196-14 Kogelwerende vesten

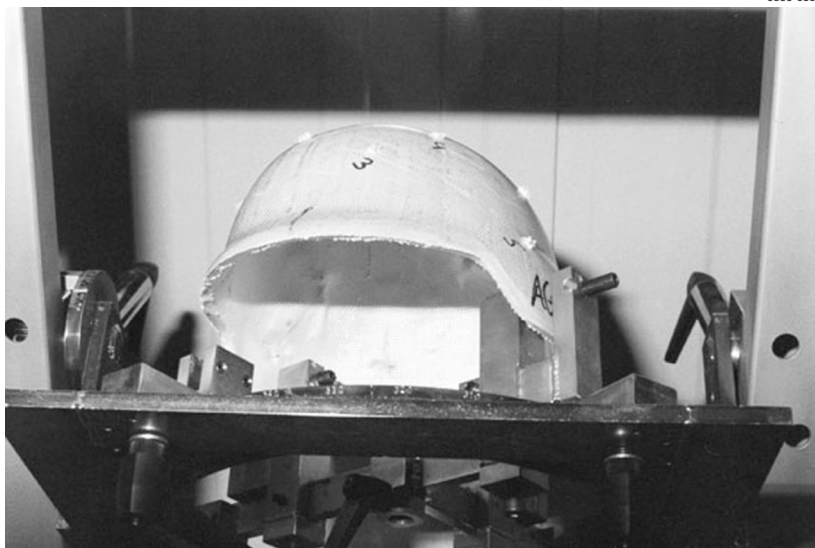
ook om gemakkelijker kogelvrije vesten te kunnen passeren. Door de gladde punt gaat de kogel eerder door het weefsel heen in plaats van te worden vastgehouden in het kogelwerend materiaal. Er doen veel verhalen de ronde over cop-killers, maar ze worden niet verkocht en er is nog nooit iemand met kogelwerend vest door gedood. Een goed kogelwerend vest gemaakt van supersterke vezels is in staat kogels uit handvuurwapens (pistolen) tegen te houden. Maar tegen kogels uit geweren en automatische wapens zoals Kalasjnikovs, FALs en M16's zijn ze niet bestand. Dat zit niet zozeer in de munitie zelf dan wel in de hoge snelheid waarmee deze wapens vuren, de energie van een kogel neemt namelijk kwadratisch toe met de snelheid.

Arrestatieteams, de mobiele eenheid en militairen zijn daarom extra beschermd. Zij dragen vesten met grote „zakken” op borst en rug. In deze zakken passen platen van één tot twee centimeter dik, geperst shieldmateriaal, soms nog in combinatie met keramische (aardewerk) tegeltjes. De platen bieden hart- en longen extra bescherming tegen geweerkogels. Tot zeven jaar geleden waren deze inschuifplaten van duimdik staal, maar de moderne materialen zijn even effectief en veel lichter. Keramiek lijkt niet sterk – een vallend kopje breekt snel –, maar juist de brosheid maakt het materiaal geschikt om kogels te weerstaan. Op de plaats van de kogelinslag vergruist het keramiek en breekt de kogel, waarmee de energie van de kogel grotendeels wordt tenietgedaan. Na een raak schot is de keramische tegel dus niet meer kogelwerend. De kans dat twee kogels na elkaar op precies dezelfde plaats inslaan is echter klein.

0886-0350



0886-0351



*Laboratoriumtests: deformatie na inslag van kogel (boven) en helmtest  
(foto: Teijin Twaron BV)*

## 5. Een mes stoppen

De kans dat agenten, portiers en bodyguards tegenover iemand komen te staan met een mes, dolk, schaar of injectienaald is gelukkig klein, maar meestal groter dan de kans beschoten te worden. Een kogelwerend vest dat ook messen stopt, een zogeheten hybride vest, is daarom gewild. Supersterke vezels zijn echter vooral sterk wanneer ze op trek, dat wil zeggen in de lengterichting, belast worden. Dat gebeurt bij een kogelwerend vest bij de inslag van een kogel. Een scherp mes geeft ook andere krachten. Om bijvoorbeeld Twaron<sup>®</sup> steekwerender te maken, worden de aramidevezels extra dicht geweven en voorzien van een coating waarin siliciumcarbide deeltjes zijn verwerkt. Die deeltjes zorgen ervoor dat scherpe voorwerpen snel bot worden als ze het weefsel raken, en hoe botter het steekwapen, hoe meer het de vezels belast op trek.

## 6. Vliegtuigdeuren, helmen, handschoenen, pantservoertuigen, ...

De supersterke vezels worden niet alleen gebruikt om kogelvrije vesten te maken. Vanwege de goede ballistische eigenschappen worden ze ook gebruikt in helmen en de bepantsering van auto's, helikopters en vliegtuigen. Vanaf april 2003 moeten bijvoorbeeld vliegtuigen in het Amerikaanse luchtruim kogelwerende deuren hebben. Dit is een veiligheidsmaatregel die president George W. Bush nam na de aanslagen van elf september 2001. Onlangs behaalde het Nederlandse DSM als eerste de officiële goedkeuring van de Amerikaanse luchtvaartautoriteit FAA voor een kogelvrije vliegtuigdeur gemaakt met Dyneema<sup>®</sup>.

De supersterke, vederlichte vezels worden ook voor niet-ballistische doeleinden gebruikt. Bijvoorbeeld om de omhulling van kwetsbare kabels zoals glasvezelkabels te versterken. En ook slangen, buizen en autobanden kunnen ermee versterkt worden, waardoor ze langer meegaan of beter bestand zijn tegen mechanische belasting. Ook in de (top)sport zijn de lichte, sterke vezels gewild. Bouwers van luxe, snelle zeiljachten of top-roeiboten maken er gebruik van. Maar ze zitten ook in (de duurdere) ski's, tennisrackets en polsstokken. En weer een andere toepassing is in veiligheidshandschoenen voor glas-

zeters, brandweermannen of werkers in de metaalindustrie. Twaron<sup>®</sup> blijkt ook geschikt om beton te bewapenen. De vezel is echter vele malen duurder dan het staal wat hiervoor normaliter wordt gebruikt, maar het voordeel van het aramide is dat het niet elektrisch geleidend of magnetisch is. Dit kan van belang zijn voor gebouwen waarin zeer gevoelige apparatuur staat. En omdat aramide niet roest, hoort betonrot zo ook tot het verleden.

## 7. Literatuur en referenties

- Chemische Feitelikheden no. 22, *Supersterke vezels*, 1997
- A.E. Schouten en A.K. van der Vegt, *Plastics*, ISBN 90-274-5460-4, 1966
- A.K. van der Vegt, *Van polymeren tot kunststof*, Delftse Uitgevers Maatschappij BV, Delt, ISBN 906562 130X, 1991
- H.H. Yang, *Kevlar aramid fiber*, John Wiley & Sons, New York, ISBN 0-471-93765-7, 1993

## Internet

- Aramide: [www.twaron.com](http://www.twaron.com); [www.kevlar.com](http://www.kevlar.com)
- Polyethyleen: [www.dyneema.com](http://www.dyneema.com); [www.spectrafiber.com](http://www.spectrafiber.com)
- Spinnenzijde: [www.nexiabiotech.com](http://www.nexiabiotech.com)
- Andere vezels: [www.zylon.com](http://www.zylon.com); [www.vectranfiber.com](http://www.vectranfiber.com); [www.kermel.com](http://www.kermel.com);

Met dank aan dr. Martien Jacobs, DSM High Performance Fibers