

# De kwaliteit van scherfvesten bij IED-ontploffingen

18-3-2010

Nederlandse Defensie Academie

Wouter Peeters

Vaandrig van het wapen der Genie

Interne begeleider:

Ir. J.B.W. Borgers (NLDA/FMW)

Externe Begeleider:

Kapitein J. Van Roey (KMS, Brussel)

## Voorwoord

Om de studie Civiele Techniek aan de Nederlandse Defensie Academie (NLDA) af te kunnen ronden, heb ik dit onderzoek uitgevoerd wat tevens mijn Bachelor eindopdracht vormt. Dit kan gezien worden als de laatste hindernis voor het behalen van de Bachelor titel.

Voor het uitvoeren van dit onderzoek ben ik een vrijwel geheel nieuwe richting ingeslagen. Tijdens het vak Pyrotechniek heb ik dan wel een theoretische (en praktische) basis kunnen leggen op het gebied van ontploffingen, impacten van weefsels waren mij volledig onbekend. Dat ik desalniettemin bijzonder enthousiast werd voor dit onderwerp heeft met twee zaken te maken: mijn interesse voor ontploffingen werd gedurende de colleges behorende bij het vak Pyrotechniek gewekt en de praktische relevantie van het onderzoek sprak en spreekt mij erg aan.

De uitvoering van het onderzoek heeft hoofdzakelijk aan de Koninklijke Militaire School (KMS) in Brussel plaatsgevonden. Hier zitten experts op het vakgebied van impacten van weefsels en hier bevindt zich een ballistisch laboratorium waar ik met veel plezier heb mogen werken. Dit eindproduct had zich niet als zodanig kunnen ontwikkelen zonder mijn begeleider in Brussel, Kapitein Van Roey. Hij heeft ervoor zorg gedragen dat ik altijd de beschikking had over voldoende relevante literatuur, dat ik mijn gedachten voortdurend kon reflecteren en zo nieuwe richtingen in ging denken en hij voorkwam dat ik te veel hooi op mijn vork ging nemen. Ik wil hem bij deze dan ook hartelijk danken voor de bijzonder plezierige samenwerking! Verder wil ik ook het laboratoriumpersoneel van de KMS, Commandant Maldague en Kapitein Coghe danken voor hun steun bij het verrichten van mijn onderzoek.

Voor de opstart van mijn onderzoek wil ik Prof. Dr. Vogelaar voor zijn begeleiding tijdens het schrijven van mijn onderzoeksvoorstel danken. Daarnaast heeft Hein Jager van DMO mij vooral in de aanvangsfase van mijn onderzoek erg geholpen met het ontwikkelen van een relevant onderzoeksvoorstel voor Defensie. Ook tijdens de uitvoeringsfase heeft hij me nog voortdurend van de informatie waar ik behoefte aan had maar niet zelf kon verkrijgen en ook de scherfvesten voorzien. Bij deze wil ik hem dan ook hartelijk danken voor de tijd en energie die hij in mij en mijn Bachelor eindopdracht heeft gestoken ondanks zijn reeds volle agenda.

Daarnaast gaat mijn dank uit naar mijn interne begeleider, Ir. Borgers, die regelmatig klaar stond voor me om even te brainstormen en mijn werk van commentaar te voorzien. Op dit vlak heeft ook mijn vader, Leo Peeters, me veel steun verleend en ik wil hem hier dan ook hartelijk voor danken.

Steun op een heel ander vlak heb ik gekregen van mijn goede vriend Paul Giepmans waarmee ik in Brussel de nodige avonden in de Pub heb doorgebracht, cheers mate!

Als laatste rest mij nog u veel plezier te wensen bij het lezen van dit rapport.

## Inhoudsopgave

Voorwoord .....	2
Samenvatting.....	5
1. Inleiding .....	7
1.1. Aanleiding tot deze studie.....	7
1.2. Opzet scriptie.....	9
2. Theorie .....	10
2.1. $V_{50}$ .....	10
2.2. Weefselvorming .....	11
2.3. Conclusie .....	14
3. De middelen .....	15
3.1. Het doelmateriaal.....	15
3.1.1. Het scherfvest.....	15
3.1.2. Frame.....	15
3.1.3. Controle-vel .....	16
3.2. Lanceermiddelen .....	17
3.2.1. Projectielen (2 gram), lege jachtpatronen en kruit .....	17
3.2.2. Projectielen (3*2 gram), lege jachtpatronen en kruit.....	20
3.2.3. Verwisselbare loop (BCI – bloc à canon interchangeable) kaliber 12 .....	20
3.3. Middelen ten behoeve van de spreidingsbepaling .....	21
3.3.1. Meetvellen.....	21
3.3.2. Hogesnelheidscamera .....	21
3.4. Radarantenne Weibel SL-520.....	23
3.5. Conclusie .....	24
4. Testbeschrijvingen en -opstellingen.....	25
4.1. $V_{50}$ -testen.....	25
4.1.1. $V_{50}$ -test met één projectiel .....	25
4.1.2. $V_{50}$ -test met drie gelijktijdige impacten .....	25
4.1.3. Testopstelling voor de $V_{50}$ -testen .....	25
4.2. Spreidingsbepaling .....	26
4.2.1. Spreiding haaks op de schootsrichting.....	27
4.2.2. Spreiding in de schootsrichting .....	27
4.2.3. Testopstelling voor de spreidingsbepaling.....	28
4.3. Conclusie .....	29

5.	Uitvoering van de testen .....	30
5.1.	V <sub>50</sub> -test met één projectiel .....	30
5.2.	Spreidingsbepaling .....	30
5.3.	V <sub>50</sub> -test met drie gelijktijdige impacten .....	31
5.4.	Conclusie .....	31
6.	Resultaten en analyse .....	32
6.1.	V <sub>50</sub> -test met één projectiel .....	32
6.2.	Spreiding en vervorming .....	36
6.2.1.	Spreiding haaks op de schootsrichting.....	36
6.2.2.	Spreiding in de schootsrichting .....	39
6.2.3.	Transversale verplaatsing van het doelmateriaal .....	41
6.2.4.	Golven.....	43
6.2.5.	Spreidingsoppervlakte.....	46
6.3.	V <sub>50</sub> met drie gelijktijdige impacten .....	48
7.	Conclusies en aanbevelingen .....	55
7.1.	Conclusies .....	55
7.2.	Aanbevelingen.....	56
8.	Literatuurlijst .....	58
	Bijlage 1: De rechte van Henry .....	60

## Samenvatting

De gevaren waar uitgezonden Nederlandse militairen tegenwoordig aan blootgesteld worden, zijn anders dan tien jaar geleden. Een groot gevaar wordt gevormd door aanslagen met behulp van Improvised Explosive Devices (IED's), dit zijn geïmproviseerde explosieven die vaak op of naast doorgaande routes begraven worden. Bij ontploffingen van deze explosieven komen vele scherven van verschillende materialen, vormen en grootte met hoge snelheden vrij en vliegen alle kanten op waardoor het lastig is om de militairen te beschermen tegen de explosieven.

Eén beschermingsmiddel dat door militairen gedragen wordt, is het scherfvest. Dit wordt over de gehele torso gedragen en beschermt zodoende alle vitale organen in het bovenlichaam. Dit onderzoek verschaft meer inzicht in de bescherming die scherfvesten militairen bieden doordat de kwaliteit ervan middels experimenten onderzocht is.

Een algemeen gebruikte maatstaf voor de kwaliteit van scherfvesten is de  $V_{50}$ -snelheid van een materiaal. Dit is de snelheid waarbij de helft van een aantal afgevuurde gestandaardiseerde projectielen door een materiaal heen dringt en de andere helft tegengehouden wordt. In dit onderzoek is de  $V_{50}$ -snelheid van door de Defensie Materieel Organisatie (DMO) verstrekte vesten voor ronde stalen kogels van 2,043 gram vastgesteld. Dit is in eerste instantie gedaan door de projectielen één voor één met wisselende snelheden op de vesten af te vuren en op basis van de testresultaten een  $V_{50}$ -snelheid te berekenen. Deze is uiteindelijk vastgesteld op 490 m/s, met een standaardafwijking op de normale verdeling van 40 m/s.

Deze  $V_{50}$ -snelheid is bepaald om als vergelijkingmaatstaf te fungeren voor de resultaten van een test waarbij drie projectielen tegelijkertijd de vesten troffen zodat onderzocht kon worden of de prestaties van de vesten in deze situatie veranderen. Wanneer een militair zich in de nabijheid van de ontploffing van een IED bevindt, is het namelijk zeer waarschijnlijk dat er meerdere scherven op zijn vest inslaan.

Om er zeker van te zijn dat de impacten van de drie afzonderlijke projectielen het al dan niet perforeren van de vesten van elkaar kunnen beïnvloeden, is echter eerst op verschillende afstanden vastgesteld hoe de spreiding tussen de afzonderlijke projectielen in en haaks op de schietsrichting is. Met behulp van deze spreiding en een analyse van de vervormingsmechanismen in het weefsel als gevolg van een impact, is hierna een oppervlakte van  $33,7 \text{ cm}^2$  rondom het trefpunt van het eerste projectiel bepaald waarbinnen het tweede en het derde projectiel het doel moeten treffen. Op basis van de relatie tussen de spreiding haaks op de schietsrichting en de doelafstand, is gekozen om op een afstand van 5m te vuren. De kans dat alledrie de projectielen, wanneer ze volgens deze methode afgevuurd worden, binnen de oppervlakte van  $33,7 \text{ cm}^2$  rondom het trefpunt van het eerste projectiel vallen, is minimaal 95%.

Uit een berekening op basis van de meetresultaten uit de test met drie gelijktijdige treffers, is uiteindelijk een  $V_{50}$ -snelheid van ongeveer 472 m/s met een standaardafwijking op de normale verdeling van 7 m/s vastgesteld. Deze snelheid ligt zo'n 20 m/s lager dan bij test waarbij de projectielen één voor één afgevuurd werden. De  $V_{50}$ -snelheid van laatstgenoemde test was echter berekend met een standaardafwijking op de normale verdeling van 40 m/s waardoor de exacte  $V_{50}$ -snelheid in dit geval lastig te bepalen is. Desalniettemin is de kans groot dat een scherfvest slechter presteert wanneer het met meerdere, zelfde projectielen tegelijkertijd getroffen wordt dan wanneer

het met één dergelijk projectiel wordt geraakt. Een scherfvest zal namelijk in het eerste geval vermoedelijk bij een lagere snelheid geperforeerd worden dan in het laatste geval.

Dit is een uiterst relevant gegeven omdat scherfvesten heden ten dage vooral bescherming dienen te bieden tegen IED-ontploffingen. Hierbij vliegen vele scherven alle kanten op waardoor een vest op meerdere plaatsten tegelijkertijd getroffen wordt wanneer de dragende militair zich in de buurt van zo'n ontploffing bevindt. Dit betekent dat de opgegeven  $V_{50}$ -snelheden die op basis van de STANAG 2920 vastgesteld zijn, wellicht niet gebruikt moeten worden om de kwaliteit van vesten mee te vergelijken omdat deze, in het licht van hedendaagse ontwikkelingen, mogelijk niet relevant meer zijn. Volgens de STANAG 2920 moeten projectielen namelijk één voor één op de vesten afgevuurd worden waardoor een IED-ontploffing niet of nauwelijks gesimuleerd kan worden.

## 1. Inleiding

### 1.1. Aanleiding tot deze studie

Sinds 2006 is Nederland met militaire troepen aanwezig in Uruzgan, inmiddels zijn eenentwintig militairen omgekomen waarvan tien ten gevolge van een aanslag met een Improvised Explosive Device (IED). Het aantal gewonden dat gevallen is als gevolg van een IED-aanslag ligt vele malen hoger. Vrijwel dagelijks worden IED's en opslagplaatsen voor explosieven en losse IED's gevonden. Met grote regelmaat vinden aanslagen op Nederlandse troepen plaats, gesteld kan dus worden dat de dreiging van IED-aanslagen uiterst serieus is.

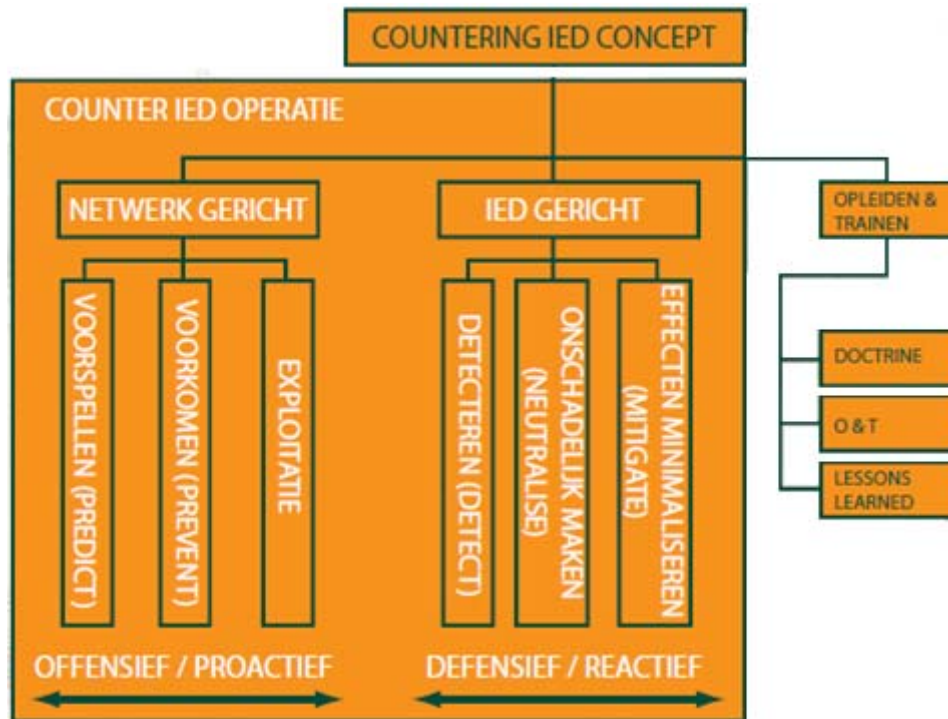
IED's vormen heden ten dage het grootste gevaar waarmee Nederlandse militairen in Uruzgan te maken hebben, waarbij de IED's vaak vrijwel onzichtbaar begraven zijn langs patrouilleroutes. IED's betreffen de verzameling geïmproviseerde bommen en explosieven die bij aanslagen worden gebruikt. Het zijn bijvoorbeeld autobommen en bomkoffers, maar ook gemodificeerde standaardmunitie kan als zodanig dienen. Er bestaat een grote diversiteit aan vaak gecompliceerde ontstekingsmechanismen, waardoor de ontsteking bijvoorbeeld vanaf grote afstand kan geschieden. IED's staan bekend om hun effectiviteit als terreurwapen.

Het is de taak van Genie-eenheden om de IED's actief op te sporen en te markeren, waarna de Explosievenopruimingsdienst deze opruimt. Pantsergenisten en luchtmobiele genie krijgen hierin een gespecialiseerde opleiding. Het opsporen van IED's in het uitzendgebied neemt zo'n tachtig procent van hun tijd in beslag en vormt dus een belangrijke taak voor deze eenheden.

Dat er veel tijd en aandacht besteed wordt aan het opsporen van IED's, geeft aan dat defensie er veel waarde aan hecht dat aanslagen middels deze bommen voorkomen worden. De directe gevolgen kunnen namelijk desastreus zijn, dat blijkt wel uit het aantal gewonden en overlijdensgevallen dat de Nederlandse krijgsmacht te verwerken heeft gehad. De indirecte effecten van aanslagen met IED's zijn, zeker op de langere termijn, misschien wel belangrijkere motieven voor de daders dan de vaak grote fysieke schade die de geïmproviseerde explosieven in eerste instantie aanrichten. Degenen die IED's plaatsen, tasten op alle niveaus de wil tot vechten aan: niet alleen bij de militairen zelf, maar ook bij het thuisfront (familie van uitgezonden militairen, publieke opinie, politici). De inzet van IED's raakt de tegenstander bovendien financieel: naast de hoge kosten voor materieel (schade, extra bepantsering, enzovoort) nemen ook de kosten toe voor research & development, alsmede voor werving van nieuwe militairen en voor (langdurige) nazorg aan teruggekeerde militairen.

Verscheidene landen zoeken in velerlei richtingen naar een oplossing voor het probleem van IED-gebruik. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen offensief/ proactief optreden wat er op bedoeld is om te voorkomen dat IED's gelegd kunnen worden, en defensief/ reactief optreden wat tracht de gevolgen van reeds geplaatste IED's in te perken, zie figuur 1 (1). Offensief/ proactief optreden houdt onder andere in dat nagegaan wordt waar de IED's geproduceerd worden, wie hiervoor verantwoordelijk is en waar het geld vandaan komt om de productie ervan mogelijk te maken. Vervolgens kan getracht worden om deze 'productienetwerken' op te rollen zodat deze in de toekomst geen gevaar meer vormen. Verder wordt, voordat bijvoorbeeld een patrouille 'de poort uitgaat', aan de hand van kaartstudie en fotobeelden een voorspelling gedaan van mogelijke punten waar IED-gevaar kan bestaan.

Defensief/ reactief optreden heeft te maken met het fysiek opsporen van de IED's, deze onschadelijk maken en/ of het minimaliseren van de effecten bij een daadwerkelijke IED-ontploffing.



Figuur 1, countering IED-concept

In het kader van de wens om de gevolgen van een IED-aanslag te minimaliseren, is dit onderzoek verricht. In dit onderzoek is geconcentreerd op de directe gevolgen van een IED-aanslag. Wanneer de directe gevolgen klein zijn, zal de impact op de lange termijn namelijk ook kleiner blijven. Middels experimenten zal getracht worden meer inzicht te verschaffen in de directe uitwerking van een bomaanslag op scherfvesten zoals deze door militairen ter plaatse gedragen worden. Dit kan als een eerste stap gezien worden om uiteindelijk te komen tot een betere bescherming tegen IED-aanslagen van de uitgezonden militair.

In overleg met Departement Wapensystemen en Ballistiek van de Koninklijke Militaire School (KMS) in Brussel en de sectie Civiele Techniek van de Nederlandse Defensie Academie (NLDA) in Breda is de volgende doelstelling van het onderzoek geformuleerd:

‘Het doel van het onderzoek is bij te dragen aan het minimaliseren van de effecten van IED's op Nederlandse militairen te voet, door via experimenten meer inzicht te verschaffen in de bescherming die de gebruikte scherfvesten de militairen bieden’.

Doordat er nog weinig tot geen onderzoek gedaan is naar de gevolgen van gelijktijdige inslagen van projectielen op scherfvesten, is ervoor gekozen om de experimenten duidelijk af te bakenen. Zodoende wordt getracht om de reproduceerbaarheid van het onderzoek groot te houden en te voorkomen dat het dermate complex wordt dat het niet binnen de gestelde periode afgerond zou kunnen worden. Dit zorgt ervoor dat het onderwerp ingeperkt wordt met de volgende aspecten:



- Er zal onder een hoek van negentig graden op de vesten gevuurd worden met ronde kogels met een massa van 2,04 gram;
- Bij de multiple-impact testen zullen drie projectielen tegelijkertijd op de vesten afgevuurd worden.

Gevolg van deze afbakening is dat de conclusies die uit de analyse van de resultaten van dit onderzoek getrokken zullen worden, voorlopig zijn en verder onderzoek vereist is om deze te staven met meer op de praktijk gebaseerde experimenten. Grote winst van dit onderzoek is dat inzicht verkregen zal worden in welke mechanismen optreden bij gelijktijdige treffers, een mogelijke testopstelling bekend zal zijn en er een gefundeerde resultaatverwachting voor verder onderzoek uitgesproken kan worden.

## 1.2. Opzet scriptie

Deze scriptie zal, naast de inleiding, uit zes hoofdstukken bestaan. Allereerst zal de benodigde theorie voor het verrichten en analyseren van de experimenten behandeld worden. Hierbij zal literatuur over  $V_{50}$ -testen en materiaalvorming aangehaald worden.

Vervolgens zal een inventarisatie gemaakt worden van de verschillende middelen die in het ballistisch laboratorium van de Koninklijke Militaire School in Brussel ter beschikking gesteld zijn. Verder worden ook de materiaaleigenschappen van de vesten behandeld.

Deze inventarisatie moet leiden tot een ontwerp van de verschillende testen en bijbehorende testopstellingen. De verschillende experimenten en hun doelstellingen zullen aan de hand van deze testopstellingen inzichtelijk gemaakt worden.

Vervolgens zal kort aangehaald worden welke bijzonderheden tijdens de testdagen naar voren gekomen zijn. Uiteindelijk zal in de behandeling en analyse van de resultaten aangehaald worden hoe met deze bijzonderheden omgegaan is.

Hierna zullen de resultaten die de verschillende experimenten opgeleverd hebben, besproken worden. Deze resultaten worden tevens geanalyseerd in dit hoofdstuk om te bezien wat de gegevens nu daadwerkelijk voorstellen in het licht van de kwalitatieve bescherming die de verstrekte scherfvesten bieden.

Tot slot wordt er een conclusie getrokken waarin aangegeven wordt in hoeverre de scherfvesten bescherming bieden tegen de in de experimenten gebruikte dreigingsvorm en zullen er aanbevelingen gedaan worden voor verder onderzoek om zodoende praktijksituaties dichter te benaderen.

## 2. Theorie

In dit hoofdstuk zal de benodigde theorie uit de literatuur voor het analyseren van de te verrichten experimenten behandeld worden. Globaal kan dit opgedeeld worden in twee delen. Het begrip “ $V_{50}$ ” zal allereerst verklaard worden. Hierna wordt enige theorie aangehaald over hoe beschermende weefsels onder invloed van impacten met projectielen van enkele grammen vervormen.

### 2.1. $V_{50}$

Om de prestaties van een materiaal te kunnen beoordelen, dient er een maatstaf te zijn waaraan getoetst kan worden. Een algemeen gebruikte maatstaf is de  $V_{50}$ -snelheid van een materiaal. Voor een specifiek projectiel is dit de snelheid waarbij de helft van een aantal afgevuurde gestandaardiseerde projectielen door een materiaal heen dringt en de andere helft tegengehouden wordt. Om het verkregen resultaat op waarde te kunnen schatten en te kunnen vergelijken, zijn er verschillende internationaal vastgestelde richtlijnen waaraan voldaan moet worden om de  $V_{50}$  te kunnen berekenen. Hierin staat beschreven van welk materiaal het projectiel gemaakt moet zijn, welke projectielvorm en –massa gebruikt mag worden, hoe het doel bevestigd moet worden, hoe ver het punt van impact van de verschillende inslagen uit elkaar en van de rand van het doel moeten liggen, binnen welke snelheidsgrenzen de resultaten moeten liggen om in de berekening gebruikt te mogen en met hoeveel resultaten gerekend mag worden.

De leidende norm voor bij de NAVO aangesloten landen is de STANAG 2920 (2). Normen voor bovenstaande zaken staan hierin beschreven en wanneer een officiële waarde voor de  $V_{50}$  van een materiaal gevonden dient te worden, is het belangrijk om strikt volgens de normen in de STANAG te werken om aanvaarding van de cijfers te verkrijgen. Een goede beschrijving van de testopzet in al haar facetten is hierbij van groot belang om inzicht te verschaffen in de manier van werken.

Om nieuwe theorie te kunnen toetsen en zodoende nieuwe inzichten te verkrijgen, wil het echter wel eens gebeuren dat van de normen afgeweken wordt, omdat deze de mogelijkheden te veel beperken. In dit onderzoek zal getracht worden om, daar waar mogelijk, zoveel mogelijk volgens de STANAG-normen te werken. Wanneer dit echter als een handicap ervaren wordt bij de zoektocht naar nieuwe inzichten, zal getracht worden om naar andere oplossingen te zoeken die zoveel mogelijk overeenstemmen met de normen. Tijdens de analyse van de resultaten moeten eventuele afwijkingen daarom opgemerkt worden.

Op de volgende gebieden wordt afgeweken van de STANAG 2920:

- Er worden andere projectielen gebruikt, omdat het gebruik van ronde projectielen de reproduceerbaarheid vergroot doordat de trefzijde van de projectielen zo geen parameter wordt. Dit zorgt er bovendien voor dat er minder kans op fouten tijdens de experimenten ontstaat waardoor deze sneller kunnen verlopen. Het gebruik van afwijkende projectielen resulteert er overigens in dat de  $V_{50}$ -snelheid van de vesten voor deze projectielen opnieuw bepaald moet worden. De  $V_{50}$ -snelheid voor gestandaardiseerde projectielen van 1,1 gram is namelijk al door TNO vastgesteld (3);
- Het doel is anders bevestigd om filmen van de zijkant tijdens de experimenten mogelijk te maken. TNO heeft bovendien aangetoond dat anders bevestigen dan in de STANAG 2920 vermeld staat, niet per definitie tot andere resultaten leidt (4);

- De verschillende trefpunten van de onderlinge projectielen liggen niet altijd zo ver uit elkaar en van de rand als in de STANAG 2920 vermeld staat. Enerzijds is dit inherent aan het feit dat met meerdere projectielen tegelijkertijd gevraagd is waardoor de inslag vantevoren niet voorspeld kan worden, anderzijds kan met het gebruikte afvuurmechanisme en de patronen niet zodoende gevraagd worden dat de projectielen exact geplaatst kunnen worden.

Wanneer de testen resultaat opgeleverd hebben, bestaan er verschillende methoden om hieruit een  $V_{50}$  te berekenen. In de STANAG 2920 staat een berekeningsmethode voor de  $V_{50}$ ; er zijn echter ook andere methodes die door verschillende onderzoekers aangedragen zijn. Zo hebben Kneubuehl (5) en Langlie (6) alternatieve methodes ontwikkeld en wordt ook de Probit-functie gebruikt om de  $V_{50}$  te berekenen. De berekeningsmethode volgens STANAG 2920 heeft als enige voordeel ten opzichte van de andere methodes, dat met weinig schoten gewerkt kan worden. Hij is echter minder betrouwbaar dan de andere methodes doordat hij geen standaardafwijking oplevert waardoor geen conclusie getrokken kan worden met betrekking tot de nauwkeurigheid van de berekende waarde. Deze standaardafwijking kan gezien worden als een maat voor de breedte van de Gauss kromme behorende bij een normale verdeling en geeft dus de kansverdeling van de resultaten. Bij de verschillende methodes die een standaardafwijking opleveren, wordt er dus van uit gegaan dat het al dan niet perforeren van het materiaal een normale verdeling volgt. Deze verdeling wordt ook wel klokkromme genoemd vanwege de karakteristieke vorm en doordat hij symmetrisch is om het centrum. De kansdichtheid kan met behulp van vergelijking 1 weergegeven worden:

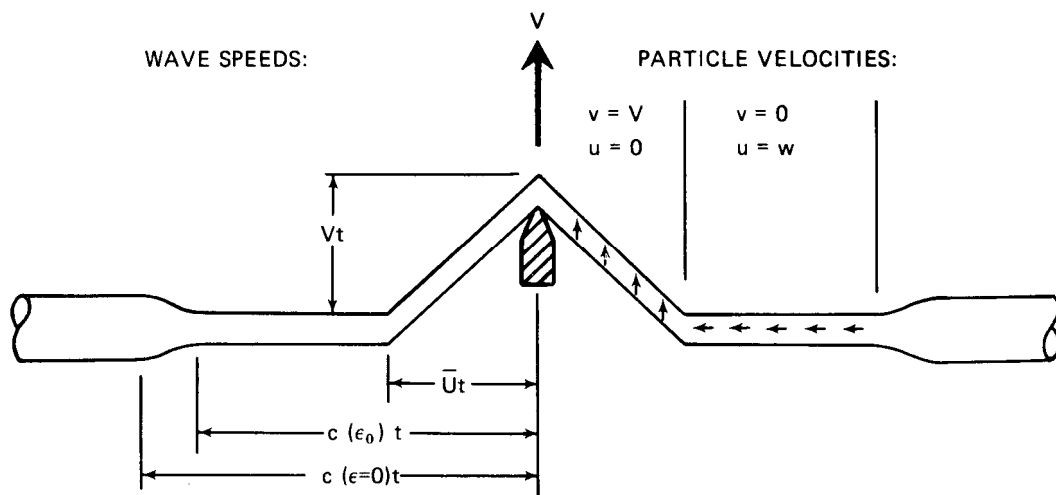
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \text{Vergelijking 1}$$

De integraal van deze functie lopend van  $-\infty$  tot  $\infty$  is exact 1 wat betekent dat een 100% kans bereikt kan worden. Hoe smaller de Gauss kromme is, hoe beter de voorspelde waarde voor de  $V_{50}$  zodat met meer zekerheid voorspeld kan worden hoe het materiaal zal presteren.

Verder kan gesteld worden dat de verschillende berekeningsmethodes geen sterk afwijkende uitkomsten opleveren, zie ook Maldague (7). Dit maakt dat de verschillende methodes inwisselbaar zijn om een waarde voor de  $V_{50}$  te kunnen berekenen.

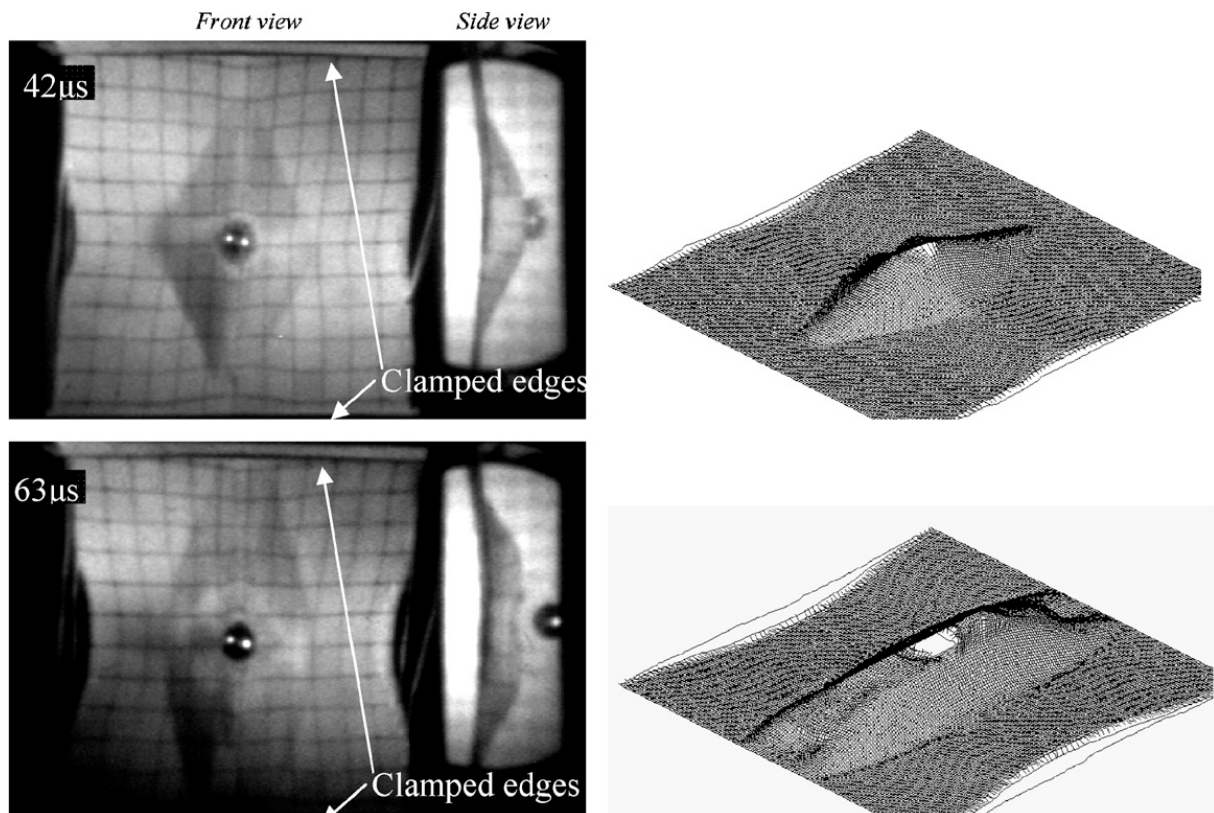
## 2.2. Weefselvervorming

Als gevolg van een impact in het materiaal, zal dit gaan vervormen. Zo zullen bij een transversale impact van een materiaal, direct na de inslag door een projectiel, golven gaan lopen. Als gevolg van deze golven zal er een spanning in het materiaal ontstaan waardoor het materiaal zal vervormen. Om te bepalen wat de vervorming in het materiaal binnen de verstreken tijdsperiode is, zullen de verschillende golfsnelheden die als gevolg van de impact in het materiaal lopen, bepaald moeten worden. De twee belangrijkste golven zijn de longitudinale golf (c) met een uitwijking haaks op de schootsrichting en de transversale golf (U) die de uitwijking in de schootsrichting met de tijd weergeeft. Voor een vezel kunnen de optredende effecten in 2D mooi weergegeven worden middels figuur 2. De verschillende parameters zullen later in deze paragraaf verklaard worden.



Figuur 2, golfvoortplanting in een vezel als gevolg van een transversale impact (8)

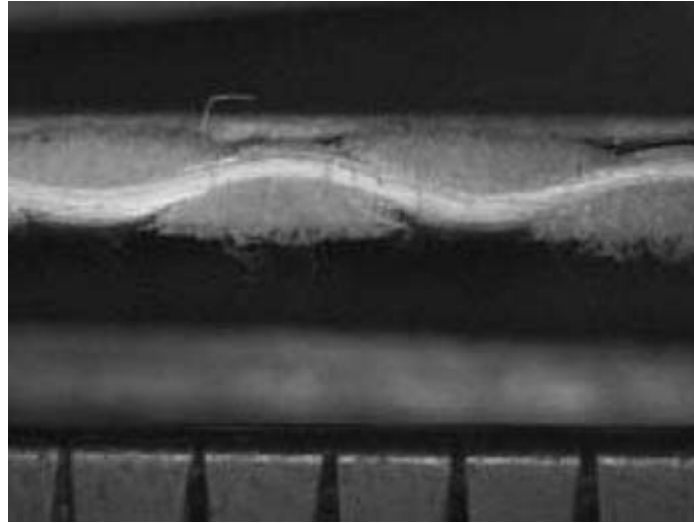
Als gevolg van een impact ontstaat in een weefsel een pyramidevormige uitdeking. De vorm van deze pyramide is deels afhankelijk van hoe het materiaal ingeklemd is. In dit onderzoek zal met een tweezijdige inklemming gewerkt worden. Als resultaat hiervan ontstaat een pyramide gelijkvormig aan de gevonden vervorming in figuur 3 (9).



Figuur 3, pyramidevormige vervorming als gevolg van een impact in een tweezijdig ingeklemd weefsel

Doordat vezels in weefsels niet volledig gestrekt maar, doordat ze met elkaar verwoven zijn, gekronkeld liggen, planten de verschillende golven zich langzamer voort dan in een vezel, zie figuur 4.

Bovendien vindt er doordat de vezels verwoven zijn op de knooppunten energieverlies in de vorm van wrijving plaats wanneer er golven door het materiaal lopen.



Figuur 4, dwardoorsnede van Twaron-weefsel (10)

Door deze langzamere voortplanting van de golven in weefsels gelden dus ietwat andere formules voor het berekenen van de verschillende golfsnelheden dan voor vezels. Desalniettemin lopen in weefsels dezelfde golven als in vezels, hieronder zullen voor de verschillende parameters in figuur 2 de formules voor de golven in weefsels gegeven worden.

De longitudinale golfsnelheid ( $c$ ) in een weefsel kan, aldus Roylance et al. (11) met behulp van de vergelijking 2 bepaald worden:

$$\bullet \quad c = \sqrt{\frac{E}{2\rho}} \quad \text{Vergelijking 2}$$

Waarbij:

$E$  = de Young's modulus van het materiaal

$\rho$  = de dichtheid van het materiaal

Voor een vastgestelde projectielsnelheid ( $V$ ) en een berekende longitudinale golfsnelheid kan, met behulp van Roylance (8), de rek in het materiaal ( $\epsilon_0$ ) als gevolg van de impact gevonden worden door vergelijking 3 op te lossen:

$$\bullet \quad V = \sqrt{\epsilon_0 c^2 (2\sqrt{\epsilon_0(1 + \epsilon_0)} - \epsilon_0)} \quad \text{Vergelijking 3}$$

Om nu de transversale golfsnelheid in een Lagrangiaans coördinatenstelsel ( $U$ ) en in een tweedimensionaal Carthesisch coördinatenstelsel ( $C_s$ ) te vinden, kunnen enkele formules uit een artikel van Field en Sun (12) gebruikt worden:

$$\bullet \quad c\epsilon_0 = w \quad \text{Vergelijking 4}$$

$$\bullet \quad w = C_s \left( \sqrt{1 + \frac{V^2}{C_s^2}} - 1 \right) \quad \text{Vergelijking 5}$$

- $$U = \frac{c(C_s+w)}{c+w}$$

Vergelijking 6

Waarbij:

- $w$  = de snelheid van de deeltjes die naar het punt van impact toestromen als gevolg van de optredende rek in het materiaal dat veroorzaakt wordt door de optredende longitudinale golf.

In een Cartesisch coördinatenstelsel wordt een punt aangeduid door het drie coördinaten te geven waarmee de afstand tot het punt O (de oorsprong) aangeduid wordt. Twee coördinaten geven de locatie van een punt in een plat vlak weer; één de horizontale afstand tot de oorsprong en een ander de verticale afstand. Daarnaast geeft een derde coördinaat de afstand tot de oorsprong loodrecht op het vlak dat door de eerste twee coördinaten gevormd wordt. In een Carthesisch coördinaatsysteem zijn de coördinaten onderling orthogonaal. Dus als een deeltje parallel aan de x-as beweegt, veranderen de componenten in de y en z-richting niet. In het Lagrange coördinaatsysteem is dit geen vereiste. Bij een beschouwing van de verplaatsing over één vrijheidsgraad (bijvoorbeeld de x-richting), kan het dus zo zijn dat deeltjes tevens over andere vrijheidsgraden verschoven zijn wat ook in de verplaatsingsafstand uitgedrukt wordt omdat onder een hoek verplaatst is. Gevolg hiervan is dat de golfsnelheid in het Lagrange coördinatenstelsel altijd even hoog tot hoger zal liggen als in het Cartesisch stelsel omdat een verplaatsing onder een hoek altijd een grotere afstand oplevert dan een verplaatsing exact evenwijdig aan de beschouwde verplaatsingsrichting.

### 2.3. Conclusie

In dit hoofdstuk zijn twee begrippen behandeld uit de literatuur die voor het uitvoeren van de experimenten en de analyse ervan relevant zijn. De experimenten zullen erop gericht zijn om  $V_{50}$ -metingen te kunnen verrichten. Om ook uitspraken te kunnen doen over metingen met meerdere, gelijktijdige impacten, zijn enkele vervormingsmechanismen aangehaald. Doel hiervan is om aan de hand van deze mechanismen de reactie in het doelmateriaal te kunnen verklaren.

Nu deze theoretische begrippen verhelderd zijn, kan de inrichting van de experimenten aan bod komen. In het volgende hoofdstuk wordt daarom allereerst uitgelegd welke middelen worden gebruikt en welke rol ze in de experimenten spelen.

### 3. De middelen

In dit hoofdstuk zullen de verschillende middelen die tijdens de experimenten worden gebruikt, beschreven worden. Zodoende kunnen hiermee in het volgende hoofdstuk de volledige testen inclusief opstellingen worden beschreven.

#### 3.1. Het doelmateriaal

In deze paragraaf wordt aangehaald welke eigenschappen het doelmateriaal precies heeft en hoe dit bevestigd zal worden.

##### 3.1.1. Het scherfvest

Als doelmateriaal zullen in totaal twee scherfvesten van het merk Fecsa bestaande uit verschillende beschermende delen (voor- en achterzijde en een 'groinprotector') gebruikt worden. Doordat de voor- en achterzijde met klitteband aan elkaar bevestigd zijn, kunnen deze eenvoudig van elkaar gehaald worden en zodoende los gebruikt worden om de testen op te verrichten. De  $V_{50}$ -snelheid van deze vesten voor speciale, gestandaardiseerde projectielen (Fragment Simulating Projectiles) van 1,1 gram ligt volgens de fabrikant boven de 500 m/s. Het NSN-nummer van de vesten is 8470-17-116-3957 en de maat van de gebruikte vesten is XL. De vesten zijn, vanwege de bijzondere materiaaleigenschappen (zeer licht en een hoge elasticiteitsmodulus), vervaardigd uit aramideweefsel die in meerdere lagen op elkaar genaaid zijn. Het materiaal is beschikbaar gesteld door de Defensie Materieel Organisatie (DMO) in Nederland. Belangrijke parameters van de vesten worden in onderstaande tabel weergegeven.

Type	Twaron CT 709
Aantal lagen	21
Dichtheid ( $\text{kg/m}^3$ )	1440
Oppervlakedichtheid ( $\text{kg/m}^2$ )	4,20
Elasticiteitsmodulus (GPa)	89
Dtex (gr/10km)	960
Rek bij bezwijken (%)	3,45

Tabel 1, materiaaleigenschappen

##### 3.1.2. Frame

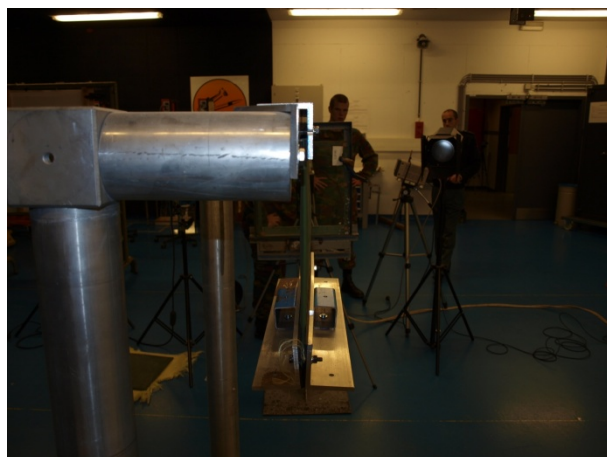
Het frame dat gebruikt is om de vesten in op te hangen, wordt aan de KMS normaal gesproken gebruikt bij testen waarbij de vervorming van materiaal gemeten wordt. Met deze opstelling kan vanaf de zijkant gefilmd worden zodat geanalyseerd kan worden wat er met het materiaal gebeurt wanneer er een impact plaatsvindt. Dit is voor deze testen een relevant gegeven waardoor besloten is om ook voor de  $V_{50}$ -testen dit systeem te gebruiken. Het is in elkaar gezet aan de hand van ontwerpaanwijzingen van Manon Bolduc van het Defence Research and Development Center in Canada. De vesten die in dit frame opgehangen worden, zijn tweezijdig ingeklemd: boven en onder. De inklemming van het vest aan de onderzijde geschiedt middels een loshangend gewicht van 5 kg om een spanning van 50N in het materiaal te verkrijgen. In figuur 5 en 6 zijn een voor- en zijaanzicht gegeven van het frame inclusief ingeklemd materiaal.

Bij  $V_{50}$ -testen wordt het doelmateriaal normaal gesproken vierzijdig ingeklemd (zie STANAG 2920) in een frame bevestigd. Recente testen hebben echter aangetoond dat deze wijze van bevestiging niet maatgevend hoeft te zijn om een goede voorspelling voor de  $V_{50}$ -snelheid van een materiaal te verkrijgen. Zo heeft TNO bijvoorbeeld een nieuwe bevestigingsmethode onderzocht waarbij het

materiaal op een ruggesteun van foam wordt vastgebonden middels een horizontaal lopende spanband boven aan het vest en één onder aan het vest (13). Deze bevestiging laat geen significant andere  $V_{50}$ -snelheid voor een materiaal zien vergeleken met standaardmethodes. De verwachting is daarom dat onderstaande inklemming, óók horizontaal lopend zowel boven als onder aan het vest, niet anders zal presteren dan de inklemming die voorgeschreven staat in STANAG 2920.



Figuur 5, vooraanzicht bevestigingsmethode



Figuur 6, zijaanzicht bevestigingsmethode

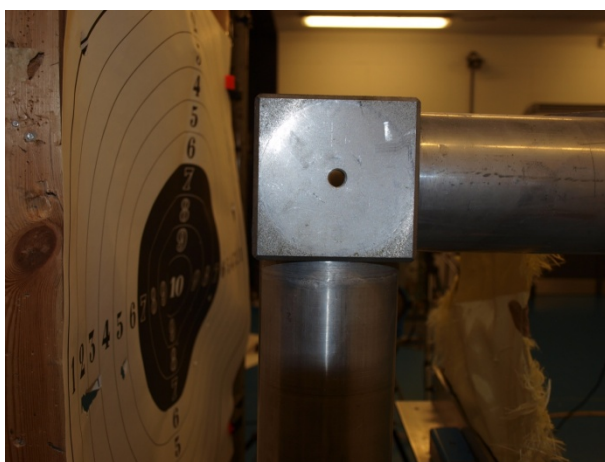
### 3.1.3. Controle-vel

Om zekerheid te hebben over de vraag of een afgeschoten projectiel nu wel of niet door het vest heengedrongen is, kan vlak achter het vest een ingeklemd vel papier geplaatst worden. Wanneer na een schot in dit vel een gat met het formaat van een projectiel te vinden is, kan met zekerheid gesteld worden dat een perforatie plaatsgevonden heeft. Hieronder is een voorbeeld weergegeven van hoe het vel achter het vest gepositioneerd kan worden.





Figuur 7, positionering controle-vel



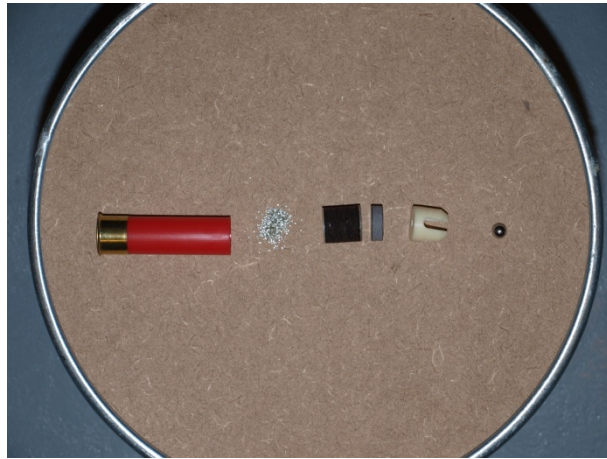
Figuur 8, zijaanzicht positionering controle-vel

## 3.2. Lanceermiddelen

In deze paragraaf wordt behandeld waaruit de patronen samengesteld zijn, hoe de opbouw van de verschillende patronen zal zijn en hoe deze gelanceerd worden.

### 3.2.1. Projectielen (2 gram), lege jachtpatronen en kruit

Zoals reeds eerder opgemerkt is, dienen de patronen zelf samengesteld te worden. Dit geschiedt door een jachthuls van kaliber 12 achtereenvolgens te vullen met kruit (sferisch poeder, kaliber .50 blank), twee vilten stoppen met een dikte van respectievelijk 14 en 7mm en een houder voor het projectiel met deze er in. Dit projectiel is een ronde stalen kogel met, volgens opgave van de fabrikant, een diameter van 7,938mm. Het volume van deze kogel is  $\frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3}\pi 3.969^3 = 261.9\text{mm}^3$ . Uitgaande van een massadichtheid van staal van  $7800\text{ kg/m}^3$ , is de theoretische massa van de kogels 2,043 gram. In figuur 9 is, middels een foto, van links naar rechts in de juiste volgorde aangegeven waaruit de patronen opgebouwd zijn.



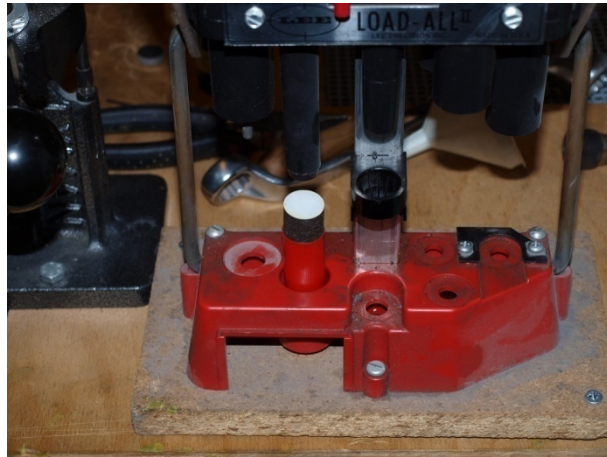
Figuur 9, patroonopbouw enkel schot

Om de patronen te fabriceren, wordt allereerst tot op de milligram nauwkeurig de kruitmassa bepaald. Naar gelang de gewenste snelheid hoger of lager ligt, kan meer of minder kruit gebruikt worden. Het kruit wordt vervolgens met behulp van een trechter voorzichtig in de huls gegoten:



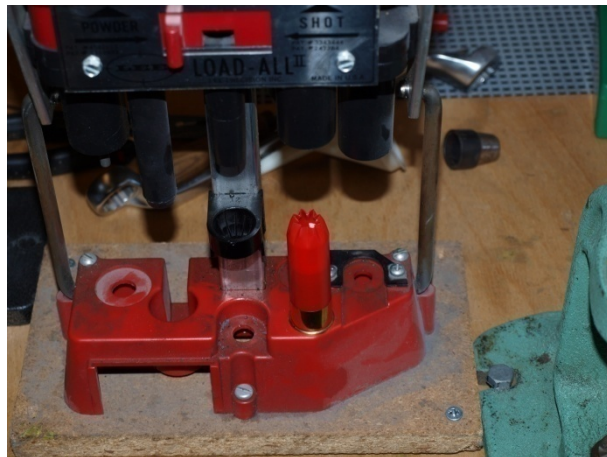
Figuur 10, afweging kruitmassa

Hierna wordt het kruit in de huls afgedicht met de twee vilten stoppen. De stoppen worden met behulp van een apparaat ("load all" van Lee precision inc., patentnummer 4542677) op het kruit gedrukt:



Figuur 11, aandrukken vilten stop

Hierna wordt het projectiel in de houder gelegd en deze wordt op de stoppen geplaatst. Daarna wordt de patroon in twee stappen afgesloten met behulp van het eerder genoemde apparaat:



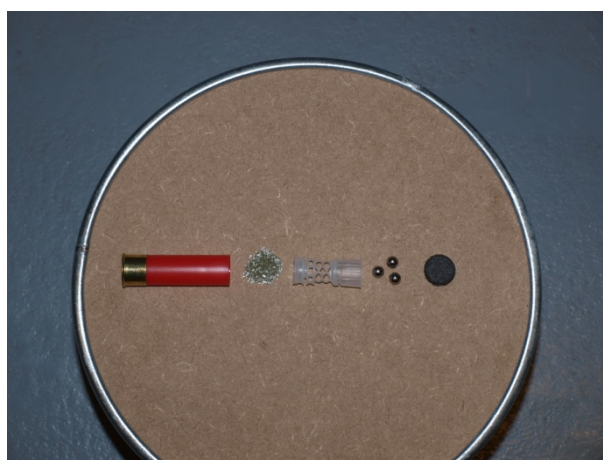
Figuur 12, samenknijpen huls



Figuur 13, afsluiten huls

## 3.2.2. Projectielen (3\*2 gram), lege jachtpatronen en kruit

Om een gelijktijdige treffer met meerdere projectielen na te kunnen bootsen, zijn patronen op soortgelijke wijze samengesteld als hierboven reeds beschreven is. Het grootste verschil is dat het patroon nu niet met één projectiel, maar met 3 projectielen gevuld is. Verder is het patroon wederom opgebouwd uit een kaliber 12 jachtpatroonhuls dat allereerst gevuld is met hetzelfde kruittype. In plaats van de vilten stoppen en de houder is er echter een plastic houder op het kruit gezet die eveneens een afsluitende functie heeft en daardoor drukopbouw genereert. Om er zorg voor te dragen dat de projectielen op hun plek blijven, is er als laatste een dunne afsluiter van schuimrubber op de houder geklemd. Het fabriceren van de patronen gebeurt op dezelfde wijze en met dezelfde apparatuur als voor de patronen die gevuld zijn met één projectiel. In figuur 14 is, middels een foto, van links naar rechts in de juiste volgorde aangegeven waaruit de patronen opgebouwd zijn.



Figuur 14, patroonopbouw multiple hit

## 3.2.3. Verwisselbare loop (BCI - bloc à canon interchangeable) kaliber 12

Met behulp van de verwisselbare loop kaliber 12 worden de projectielen afgeschoten. Deze loop werkt zoals een regulier wapen met als verschil dat het overhalen van de trekker op afstand plaats kan vinden. In figuur 15 en 16 zijn een foto van een zij- en achteraanzicht van de verwisselbare loop gegeven om er een impressie van te geven.



Figuur 15, zijaanzicht verwisselbare loop



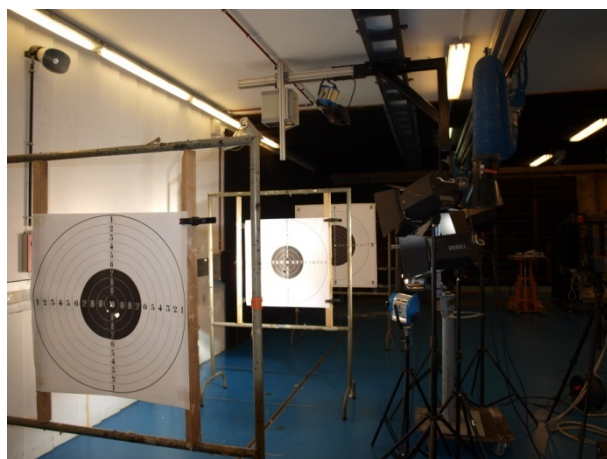
Figuur 16, achteraanzicht verwisselbare loop

### 3.3. Middelen ten behoeve van de spreidingsbepaling

In deze paragraaf zal allereerst aangehaald worden hoe de spreiding haaks op de schietsrichting gemeten kan worden. Vervolgens wordt behandeld hoe dit met behulp van camerabeelden kan geschieden voor spreiding in de schietsrichting.

#### 3.3.1. Meetvellen

Om de spreiding haaks op de schietsrichting te bepalen zal getracht worden een afdruk van de projectielspreiding op verschillende afstanden te verkrijgen. Dit zal gedaan worden door op 2,5m, 5m en 7,5m papieren meetvellen op te hangen. Figuur 17 verduidelijkt hoe met behulp van de meetvellen een dergelijke 'afdruk' verkregen kan worden.



Figuur 17, opstelling van de meetvellen

#### 3.3.2. Hogesnelheidscamera

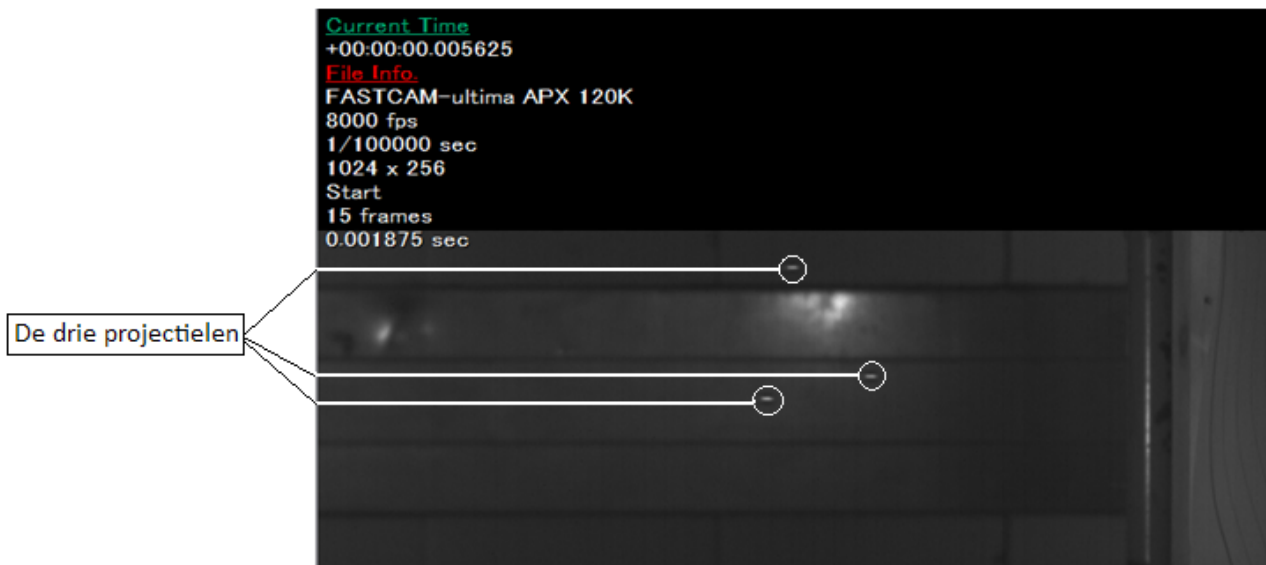
Naast de spreiding haaks op de schietsrichting, is de spreiding in de schietsrichting een interessant gegeven. Het is wenselijk dat deze zo klein mogelijk blijft zodat een situatie van gelijktijdige inslag van de drie projectielen benaderd kan worden. Om erachter te komen wat deze spreiding nu daadwerkelijk is, kunnen filmbeelden van de projectielbanen gemaakt worden met een hogesnelheidscamera en vervolgens geanalyseerd worden.

In het laboratorium van de KMS in Brussel is de gebruikte hogesnelheidscamera de Photron Ultima APX. Deze camera kan 2000 beelden per seconde filmen met een resolutie van één megapixel per seconde en meer beelden per seconde bij aflopende resoluties. De filmbeelden komen verder niet alleen van pas bij het vaststellen van spreiding tussen verschillende gelijktijdig afgeschoten projectielen, maar kunnen ook de vervorming in een materiaal als gevolg van één of meer impacten vastleggen. Daarnaast vergroten de beelden de reproduceerbaarheid van het onderzoek omdat meer inzicht verschaft wordt in de experimentele uitvoering ervan. In figuur 18 is een foto van de camera gegeven.



Figuur 18, photron hogesnelheidscamera

Figuur 19 is een screenshot van een filmbeeld dat met deze camera gefilmd is van een schot waarbij drie projectielen tegelijk afgevuurd werden. Het beeld is vlak vóór het doel op vijf meter opgenomen en geeft duidelijk een locatieverschil tussen de drie projectielen weer.



Figuur 19, camerabeeld van de drie projectielen

Zoals eerder vermeld is dient, om de spreiding tussen de verschillende projectielen vast te kunnen leggen vóórdat de schoten afgevuurd worden, vastgesteld te worden hoeveel beeldpixels op de film overeen komen met een verplaatsing van een aantal centimeter. Dit kan gedaan worden door een

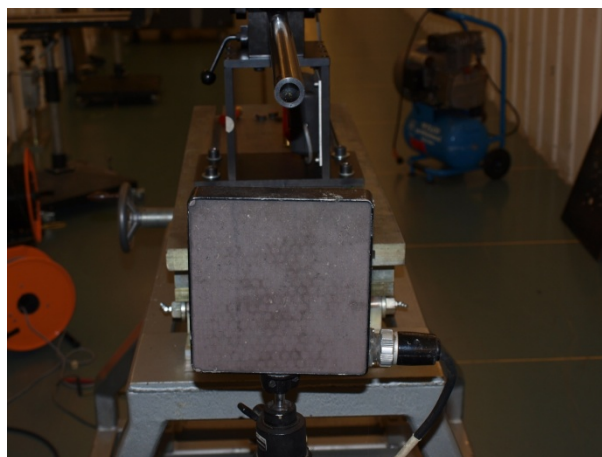
raster, waarvan de 'hokjesgrootte' bekend is, in de kogelbaan te plaatsen en hier een opname van te maken vanaf de locatie waar gefilmd zal worden. Figuur 20 illustreert dit.



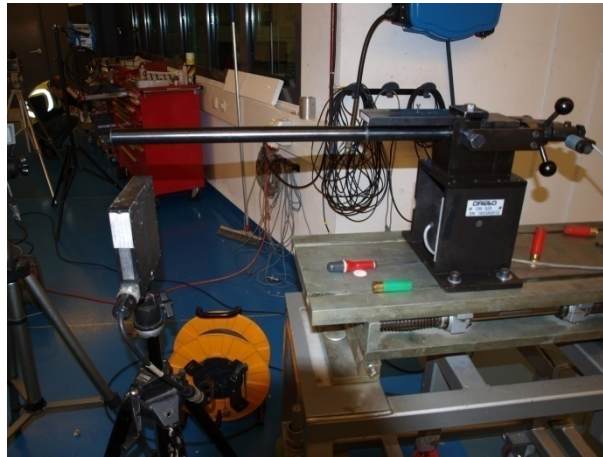
Figuur 20, raster

### 3.4. Radarantenne Weibel SL-520

Voor het meten van de snelheid is gebruik gemaakt van de radarantenne Weibel SL-520. De radar maakt gebruik van de principes van het dopplereffect om de snelheid van het projectiel te bepalen. Het zendt dus straling van een bepaalde golflengte uit en meet hoe de verschuiving in golflengte van de terug opgevangen stralen ten opzichte van de uitgezonden straling is. Verschuiving vindt plaats wanneer de stralen weerkaatst worden door een object. Op deze manier kan continu de snelheid van het projectiel gemeten worden. Door de radar dusdanig in te stellen dat hij precies meet vanaf het moment dat de kogel afgevuurd wordt, kan de snelheid tegen de tijd uitgezet worden en zo ook de verplaatsing gevonden worden. De antenne is direct onder de vuurmond van de loop geplaatst. In figuur 21 en 22 is dit goed te zien.



Figuur 21, vooraanzicht plaatsing radarantenne



Figuur 22, zijaanzicht plaatsing radarantenne

### 3.5. Conclusie

In dit hoofdstuk zijn de middelen en hun functie tijdens de experimenten beschreven, hierna kan een uitleg gegeven worden van hoe deze middelen tot functionerende testopstellingen geïntegreerd kunnen worden. Deze opstellingen zijn er op gericht om  $V_{50}$ -metingen te kunnen verrichten en om de projectielspreiding bij schoten met patronen met drie projectielen te kunnen achterhalen. In het volgende hoofdstuk zal voor beide testvormen allereerst een beschrijving van de testen gegeven worden, waarna de totale opstelling behandeld wordt.



## 4. Testbeschrijvingen en -opstellingen

Om de geplande metingen te kunnen verrichten, dienen testen en testopstellingen ontworpen te worden. In dit hoofdstuk zullen achtereenvolgens de beide  $V_{50}$ -testen en hun opstelling beschreven worden, waarna de spreidingsmeting aan bod komt. Opgemerkt dient te worden dat de  $V_{50}$ -testen met dezelfde testopstelling verricht kunnen worden waardoor er maar één beschrijving van de testopstelling voor beide testen gegeven wordt.

### 4.1. $V_{50}$ -testen

#### 4.1.1. $V_{50}$ -test met één projectiel

Doel van deze test is om te bepalen wat de  $V_{50}$  van de geleverde Fecsa-vesten is voor het projectiel dat verder in het onderzoek gebruikt zal worden. In deze test zullen deze projectielen één voor één richting doel (het vest) geschoten worden. De snelheid waarmee de projectielen geschoten worden, moet rond de perforatiegrens liggen om zodoende een  $V_{50}$  te kunnen bepalen. Als eerste leidraad zal hierbij de  $V_{50}$  die de fabrikant van het vest vastgesteld heeft voor (Fragment Simulating Projectiles) FSP's, gehanteerd worden. Totaal zullen twaalf schoten op het vest gelost worden.

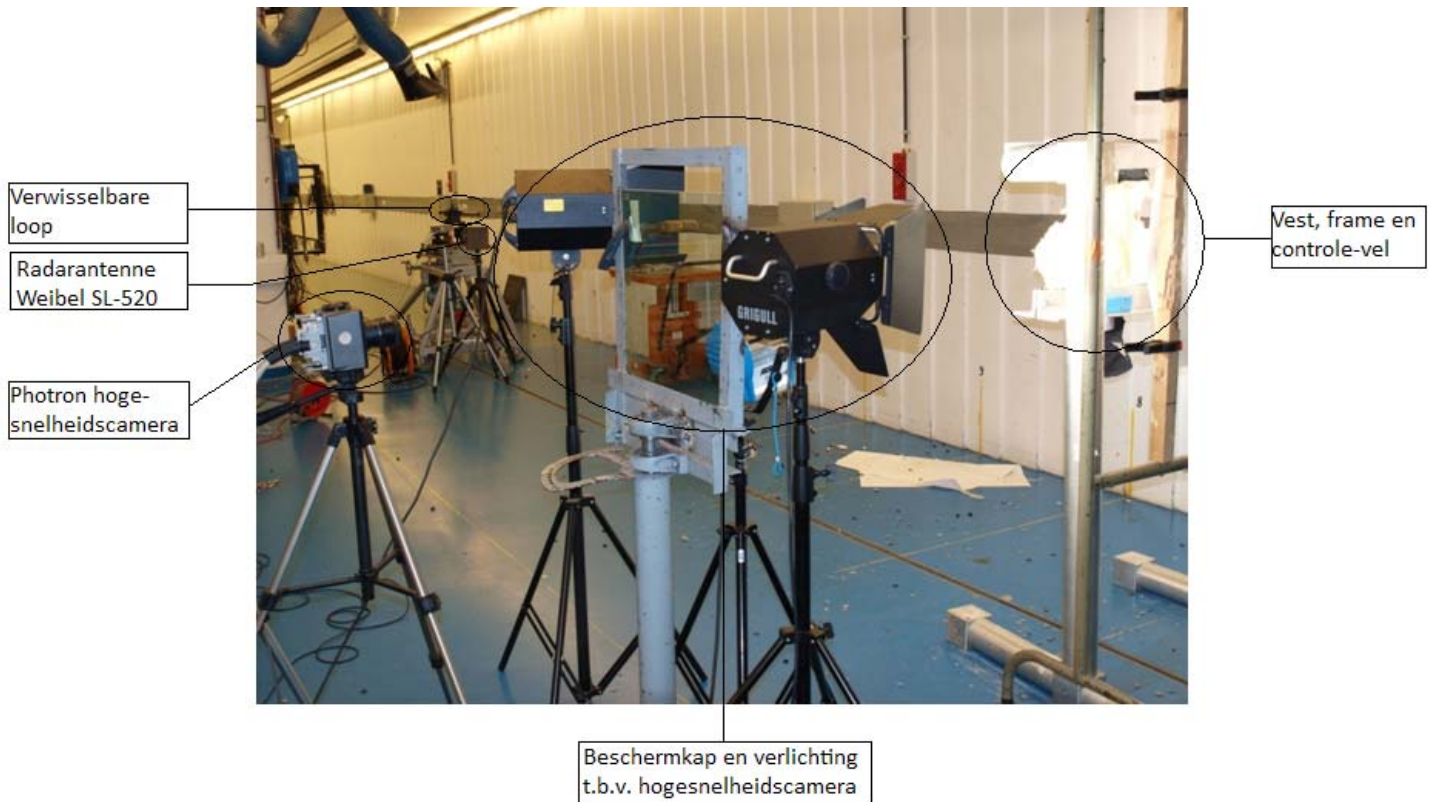
#### 4.1.2. $V_{50}$ -test met drie gelijktijdige impacten

Doel van deze test is om te bepalen wat de  $V_{50}$ -snelheid van de vesten voor de gebruikte projectielen is, wanneer deze gelijktijdig getroffen worden door drie projectielen. De testen zullen verricht worden op een afstand die uit de spreidingsbepaling naar voren gekomen is. De patronen zullen vanaf deze afstand met wisselende snelheden op de vesten afgevuurd worden. Als eerste leidraad voor de snelheid zal hierbij de  $V_{50}$ -snelheid gebruikt worden die berekend is aan de hand van de resultaten van de  $V_{50}$ -test met één projectiel. Om te voorkomen dat de projectielinslagen van verschillende schoten door materiaalverzwakking beïnvloedt kunnen worden, wordt ervoor gekozen om het aantal schoten dat op een vest gelost mag worden te begrenzen. Dit wordt gedaan om zeker te stellen dat eventuele plaatselijke verzwakkingen in het materiaal geen rol kunnen spelen. De projectielen kunnen met de gebruikte patronen en lanceermiddelen namelijk niet exact geplaatst worden. Een begrenzing van het aantal gebruikte schoten op een vest biedt echter uitkomst om ervoor te zorgen dat de kans klein blijft dat de trefpunten van projectielen uit verschillende schoten te dicht op elkaar komen te liggen. Hoe de exacte relatie is tussen materiaalverzwakking als gevolg van een impact en de afstand waarop deze verzwakking rondom het punt van impact optreedt, is onbekend. Vast staat echter dat scherfvesten er op ontworpen zijn om meerdere impacten aan te kunnen en de verwachting is daarom dan ook dat materiaalverzwakking alleen bij grote aantallen impacten op zal treden. De begrenzing van het aantal schoten geldt dus vooral als voorzorgsmaatregel. Het maximaal aantal schoten op één vest wordt op vijf met een totaal van vijftien projectielimpacten gesteld. Wanneer uit de resultaten onregelmatigheden naar voren komen bij perforaties door projectielen van later afgevuurde schoten, dient dit in de analyse verwerkt te worden. De resultaten van deze test worden uiteindelijk vergeleken met de eerder verkregen  $V_{50}$ -snelheid voor de vesten voor enkelvoudige impacten.

#### 4.1.3. Testopstelling voor de $V_{50}$ -testen

De apparatuur die tijdens de testen gebruikt wordt, is in hoofdstuk 3 beschreven. Nu wordt beschreven hoe deze opgesteld wordt. Voor de  $V_{50}$ -metingen is het van belang dat de projectielen met gewenste snelheid afgevuurd worden, dat deze een doel treffen, dat gecontroleerd kan worden of de projectielen door het doel heen gedrongen zijn, dat de trefsnellheid van de projectielen

gemeten wordt en dat het trefmoment op film vastgelegd wordt. Daarvoor worden allereerst de verwisselbare loop om de patronen af te vuren en het frame, inclusief vest, geplaatst. Daarna wordt zo'n 30cm achter het doel een controle-vel geplaatst. De radar wordt vervolgens zo'n 10cm recht onder de loopmond gepositioneerd om de snelheid van de projectielen te kunnen bepalen. Om zo goed mogelijke beelden te kunnen filmen, zal het doel met 3 spotlights extra belicht worden, bovendien wordt een doorzichtige beschermkap geplaatst om de hogesnelheidscamera tegen teruggekaatste fragmenten te beschermen. Als laatste wordt de hoge snelheidscamera loodrecht op het doel geplaatst zodat deze vanaf de zijkant kan filmen hoe het vest op een inslag reageert. De totale meetopstelling kan middels figuur 23 verhelderd worden.



Figuur 23, testopstelling  $V_{50}$ -testen

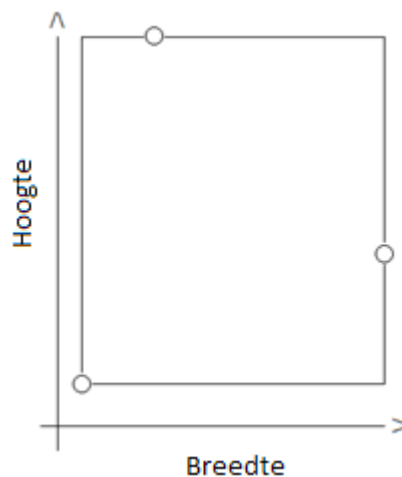
## 4.2. Spreidingsbepaling

Bij deze test zullen er drie projectielen tegelijkertijd op het doel afgevuurd worden. Deze projectielen zullen alledrie een verschillende baan vervolgen en steeds verder van elkaar inslaan naarmate de afstand van het doel tot de loopmond groter wordt. Het doel van deze test is om vast te stellen hoe de relatie tussen de afstand van het doel tot de loopmond met de spreiding van de projectielen over een doeloppervlakte is. Hiermee kan uiteindelijk vastgesteld worden op welke afstand de  $V_{50}$ -test met drie projectielen verricht moet worden zodat de individuele impacten van de drie projectielen het vervormingsmechanisme dat als gevolg van deze impacten ontstaat, beïnvloeden. De gehanteerde snelheid waarmee de projectielen afgeschoten worden, moet ongeveer overeenkomen met de vastgestelde  $V_{50}$ -snelheid van de vesten voor impacten met één projectiel. Dit is namelijk de snelheid waarop de volgende test (drie gelijktijdige impacten) gedaan zal worden. Door de metingen bij deze snelheid te verrichten, wordt de bruikbaarheid van de voorspellingen die aan de hand van

deze test gedaan zullen worden, groter. Het is namelijk de verwachting dat de spreiding zal variëren bij verschillende projectielsnelheden.

#### 4.2.1. Spreiding haaks op de schootsrichting

Om een voorspelling te kunnen maken van de relatie van de spreiding haaks op de schootsrichting van meerdere projectielen met de schootsafstand, zullen metingen verricht worden. Hierbij zullen patronen, met daarin drie afzonderlijke projectielen zoals ze ook samengesteld worden bij de  $V_{50}$ -test met drie projectielen, afgevuurd worden op papieren doelen op 2,5m, 5m en 7,5m. Vervolgens zullen de afdrukken in het papier geanalyseerd worden. Hiertoe dient er een aanduiding voor de spreiding tussen de afzonderlijke projectielinslagen gevonden te worden. Gekozen wordt om de oppervlakte waarbinnen de drie projectielen inslaan als leidend te beschouwen omdat het gevolg van de inslagen in een materiaal niet lineair maar in alle richtingen merkbaar zal zijn. Verder is de verwachting dat de spreiding in horizontale richting even groot zal zijn als de spreiding in verticale richting. Om dit te controleren wordt ervoor gekozen om voor ieder specifiek schot de breedte en de hoogte van de kleinste rechthoek waarbinnen de drie inslagen vallen, op te meten. Bovendien wordt zo een maat verkregen voor de oppervlakte waarbinnen de inslagen vallen. De middens van de projectielinslagen mogen daarbij op de rand van de rechthoek liggen, zie de figuur 24.



Figuur 24, spreidingsbepaling

Vervolgens zullen de opgemeten breedtes en hoogtes met elkaar vermenigvuldigd worden om een uitspraak te kunnen doen over de oppervlakte van de 'projectielwolk' die de test oplevert. Hierna worden deze oppervlaktes voor elke doelafstand (2,5m, 5m en 7,5m) met elkaar vergeleken door de gemiddeldes op de respectievelijke afstanden in een figuur te plotten. Daarna wordt een functie bepaald die door de resultaten gaat en een voorspelling kan geven voor de relatie van de doelafstand met de spreiding.

#### 4.2.2. Spreiding in de schootsrichting

Naast de spreiding haaks op de schootsrichting, is de spreiding in de schootsrichting een interessant gegeven. Het is wenselijk dat deze zo klein mogelijk blijft zodat een situatie van gelijktijdige inslag van de drie projectielen zo goed mogelijk benaderd kan worden. Om erachter te komen wat deze spreiding nu daadwerkelijk is, kunnen er filmbeelden met de hogesnelheidscamera gemaakt en vervolgens geanalyseerd worden. Aan de hand van deze filmbeelden kan tevens vastgesteld worden wat de tijdsperiode tussen treffen en maximale vervorming van het materiaal is. Dit is een interessant

gegeven omdat aan de hand hiervan de totale vervorming binnen deze tijdspanne achterhaald kan worden. Hiermee kan vervolgens een oppervlakte om het trefpunt van een projectiel heen vastgesteld worden waarbinnen een achteropkomend projectiel het doel moet treffen om de perforatie van het voorgaande nog te beïnvloeden. De opgenomen beelden zullen het laatste deel van de projectielbaan vlak vóór het doel op vijf meter betreffen. Hierbij wordt gefilmd met behulp van frames, de film is namelijk een aaneenschakeling van foto's die in frames vastgelegd worden. Er zal met 24.000 frames per seconde gefilmd worden, wat betekent dat iedere  $41,7\mu\text{s}$  een filmbeeld verkregen wordt. Daardoor is het niet mogelijk om de projectielen continu op beeld te hebben en exact het moment van impact van de projectielen te bepalen.

Aan de hand van de beeldpixels op de filmbeelden zal daarom bepaald worden hoe groot de verplaatsing van de verschillende projectielen tijdens de vlucht en de materiaalvervorming na treffen binnen een aantal frames geweest is. Door van tevoren op te meten hoeveel beeldpixels overeen komen met een afstand van een aantal centimeter, kan achteraf aan de hand van deze pixels berekend worden wat de afstand is waarover de projectielen over een aantal frames verplaatst zijn. Vervolgens kan de verplaatsing door de opnametijd waarbinnen deze plaatsgevonden heeft, gedeeld worden om de snelheid van een kogeltje te bepalen. Hiernaast is het interessant om de afstand tussen de verschillende kogeltjes op te meten. Hiermee kan vervolgens, met behulp van de bepaalde snelheid van het achteropkomende kogeltje, het tijdsinterval tussen de inslag van het voorgaande en het achteropkomende kogeltje op de genoemde doelafstand verkregen worden zodat uitspraken gedaan kunnen worden over de mate van gelijktijdigheid van de inslagen.

#### 4.2.3. Testopstelling voor de spreidingsbepaling

Om de spreiding die ontstaat wanneer meerdere projectielen tegelijkertijd richting doel worden geschoten te meten, zijn verschillende middelen nodig. Zo moeten de projectielen versneld worden, de snelheid van de projectielen gemeten worden en de spreiding haaks op en in de schootsrichting gemeten worden. Om de projectielen af te vuren wordt wederom de verwisselbare loop gebruikt. De snelheid die de projectielen vervolgens hebben, wordt gemeten met de radarantenne die zo'n 10cm recht onder de loop geplaatst wordt. Om een relatie te kunnen bepalen tussen de spreiding haaks op de schootsrichting met de afstand, worden op 2,5m, 5m en 7,5m papieren meetvellen opgehangen waaruit achteraf op te maken valt waar de projectielen door het vel heen gedrongen zijn. Verder wordt er gebruik gemaakt van een hogesnelheidscamera om de spreiding in de schootsrichting te kunnen bepalen. Gekozen is om te filmen vlak vóór het meetvel op 5m afstand. Om heldere beelden te kunnen filmen, wordt gebruik gemaakt van extra verlichting in de vorm van spotlights. Bovendien wordt wederom een beschermkap geplaatst om de camera te beschermen tegen rondvliegende fragmenten. De totale meetopstelling kan middels figuur 25 verhelderd worden.



Figuur 25, testopstelling spreidingsbepaling

### 4.3. Conclusie

In dit hoofdstuk is een beeld geschetst van de te verrichten testen met enkele aandachtspunten voor de resultaatanalyse. Hiernaast zijn de beide testopstellingen en de middelen waaruit zij opgebouwd worden beschreven. In het volgende hoofdstuk zal overgegaan worden op het beschrijven van het verloop van de testen. Hierbij zal de nadruk gelegd worden op eventuele afwijkingen van het verwachte verloop.

## 5. Uitvoering van de testen

In dit hoofdstuk zal in chronologische volgorde het verloop van de testen beschreven worden. Daarnaast worden nu eerst enkele algemene gegevens aangehaald.

De drie verschillende testen zijn uitgevoerd in het ballistisch laboratorium aan de Koninklijke Militaire School te Brussel. Dit is gebeurd onder toezicht van de interne begeleider in Brussel, Kapitein Van Roey. Verder is bij alle testen gebruik gemaakt van enkele experts op hun vakgebied die fulltime in het laboratorium werken. Zo hebben de specialist voor wat betreft snelheidsmetingen met radarapparatuur, de specialist op wapen- en munitiegebied en de specialist voor wat betreft foto- en filmapparatuur bijstand en inzicht geboden op hun afzonderlijke vakgebieden. Ook is er bij de eerste twee experimenten een cadet van de KMS aanwezig geweest die een onderzoek verrichte die voor wat betreft experimenten overlap vertoonde. Hij heeft daarom geholpen bij het verrichten van de metingen.

### 5.1. $V_{50}$ -test met één projectiel

Allereerst is op 30-10-2009 de  $V_{50}$ -test met één projectiel uitgevoerd. Voordat deze test verricht kon worden is enkele middagen in het lab met de verschillende specialisten gebrainstormd over de te gebruiken testopstelling en munitiesamenstelling. Dit heeft erin geresulteerd dat de opstelling, inclusief apparatuur, reeds functioneerde bij aanvang van de testen. Een belangrijk punt van aandacht was het verkrijgen van de vooraf gewenste projectielsnelheid. Verwacht werd dat er een duidelijke relatie tussen de gebruikte kruitmassa en de projectielsnelheid moest bestaan, deze is daarom onderzocht. Achteraf is gebleken dat deze relatie nauwelijks bestaat. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door onvolledige kruitverbranding en veranderende drukopbouw door het handmatig samenstellen van de patronen. Ondanks dat patronen op de milligram nauwkeurig met eenzelfde hoeveelheid kruit werden gevuld, konden namelijk verschillen in de projectielsnelheden van meer dan 100 m/s gemeten worden. Desondanks is er gewerkt met een grijs gebied voor wat betreft de gebruikte kruitmassa. Hiermee kon uiteindelijk een redelijke voorspelling gemaakt worden van de resulterende projectielsnelheid. Wat dit voor de bruikbaarheid van de test betekend heeft, zal in de behandeling en analyse van de resultaten verklaard worden.

### 5.2. Spreidingsbepaling

Na de  $V_{50}$ -test met één projectiel is op 12-11-2009 op aanwijzing van de statistisch expert op de KMS, Commandant Maldague, de test voor de spreidingsbepaling haaks op de schootsrichting ontworpen. Commandant Maldague geeft onder andere college over de kansbepaling dat met artilleriegranaten doelen getroffen worden, wat grote overlap vertoont met de spreidingsbepaling in dit onderzoek. De eenvoud van het experiment maakte dat vrijwel alles volgens verwachting kon verlopen. Een minpunt was dat, naast de projectielen, ook de overige delen van de patroonhuls verschoten werden en dus door de meetvellen heendrongen. Vrijwel altijd was het onderscheid op de meetvellen tussen de projectielen en de verschillende verschoten patroondelen goed te maken. Wanneer dit onderscheid niet te maken was werd met behulp van de gemaakte filmbeelden met de hogesnelheidscamera het trefpunt van de projectielen nader onderzocht en konden de afzonderlijke punten van inslag alsnog teruggevonden worden.

De spreidingsbepaling in de schootsrichting is verricht met behulp van de specialist voor wat betreft foto- en filmapparatuur. Deze bepaling is volgens verwachting verlopen.

### 5.3. V<sub>50</sub>-test met drie gelijktijdige impacten

Door de ervaring die met deze opstelling reeds opgedaan was bij het verrichten van de V<sub>50</sub>-test met één projectiel, is de test met drie gelijktijdige impacten op 10-12-2009 en 11-12-2009 volgens verwachting verlopen. Ook werd de gewenste projectielsnelheid nu beter verkregen. Waarschijnlijk werd dit veroorzaakt doordat met een grotere totale projectielmassa in de patronen gewerkt werd. De drukopbouw in de patronen verliep hierdoor naar verwachting geleidelijker wat dientengevolge resulteerde in een grotere tijdsperiode waarbinnen het kruit tot ontbranding kon komen. Hiernaast hebben de projectielen uit de verschillende schoten de vesten vrijwel altijd met voldoende tussenafstand getroffen. Uitzondering hierop was het vijfde schot op het tweede vest waarvan de projectielen het vest dicht bij de projectielinslagen van het tweede schot troffen.

Verder zijn op deze testdagen met de hogesnelheidscamera enkele beelden gefilmd van de vervorming van het doelmateriaal die van pas komen voor de speidingsanalyse. Dit verliep zonder moeilijkheden.

### 5.4. Conclusie

In dit hoofdstuk is het verloop van de experimenten op de verschillende testdagen behandeld. Op enkele uitzonderingen na, zijn de testen naar verwachting verlopen. In het volgende hoofdstuk zullen de verkregen resultaten behandeld worden. Hiernaast zal, na een uitgebreide analyse, beschreven worden wat deze resultaten voorstellen.

## 6. Resultaten en analyse

In dit hoofdstuk zullen de resultaten van de verschillende experimenten behandeld en geanalyseerd worden. De behandeling geschiedt in chronologische volgorde. Allereerst zal dus de  $V_{50}$ -test met één projectiel behandeld worden, daarna zal de spreidingsbepaling aan bod komen en ten slotte worden de resultaten van de  $V_{50}$ -test met drie gelijktijdig afgevuurde projectielen gegeven en geanalyseerd.

### 6.1. $V_{50}$ -test met één projectiel

Tijdens dit experiment is getracht de  $V_{50}$ -snelheid van de vesten voor de ronde kogels van 2,043 gram op basis van de testresultaten te bepalen. Dit is gedaan door de patronen gevuld met één projectiel met wisselende snelheden op de vesten af te vuren. Hieronder zullen de resultaten van dit experiment weergegeven worden en zal achterhaald proberen te worden wat deze resultaten daadwerkelijk voorstellen.

#### *Bespreking*

Uiteindelijk zijn er totaal twaalf schoten op het vest gevuurd. Deze hebben het vest als volgt getroffen.



Figuur 26, treffers op het vest

Voor ieder schot is, naast de snelheid op het doel en de perforatie, tevens bepaald wat de massa van het projectiel was. De resultaten worden hieronder in tabel 2 weergegeven.



Schotnr.	Kogelmasse (gram)	Snelheid (m/s) op het doel	Perforatie
1	2,038	524	Ja
2	2,038	559	Ja
3	2,038	511	Ja
4	2,040	491	Ja
5	2,041	447	nee
6	2,041	<347	nee
7	2,039	532	ja
8	2,041	435	nee
9	2,038	419	nee
10	2,038	537	nee
11	2,038	411	nee
12	2,038	400	nee

Tabel 2, resultaten  $V_{50}$ -test met één projectiel

Voor het bepalen van de  $V_{50}$  van een vest volgens STANAG 2920 dienen minimaal zes schoten gelost te worden waarvan exact de helft het vest moet perforeren en de andere helft niet. Bovendien mag het verschil tussen de hoogst gebruikte snelheid en de laagste snelheid niet verder dan 40 m/s uit elkaar liggen. Wanneer uit het vest de drie laagste snelheden die het vest nog geperforeerd hebben en de drie hoogste die het vest niet geperforeerd hebben, opgezocht worden, blijkt dat het verschil tussen de hoogste en de laagste waarde  $537-435=102$  m/s is. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de  $V_{50}$  niet volgens deze methode berekend kan worden.

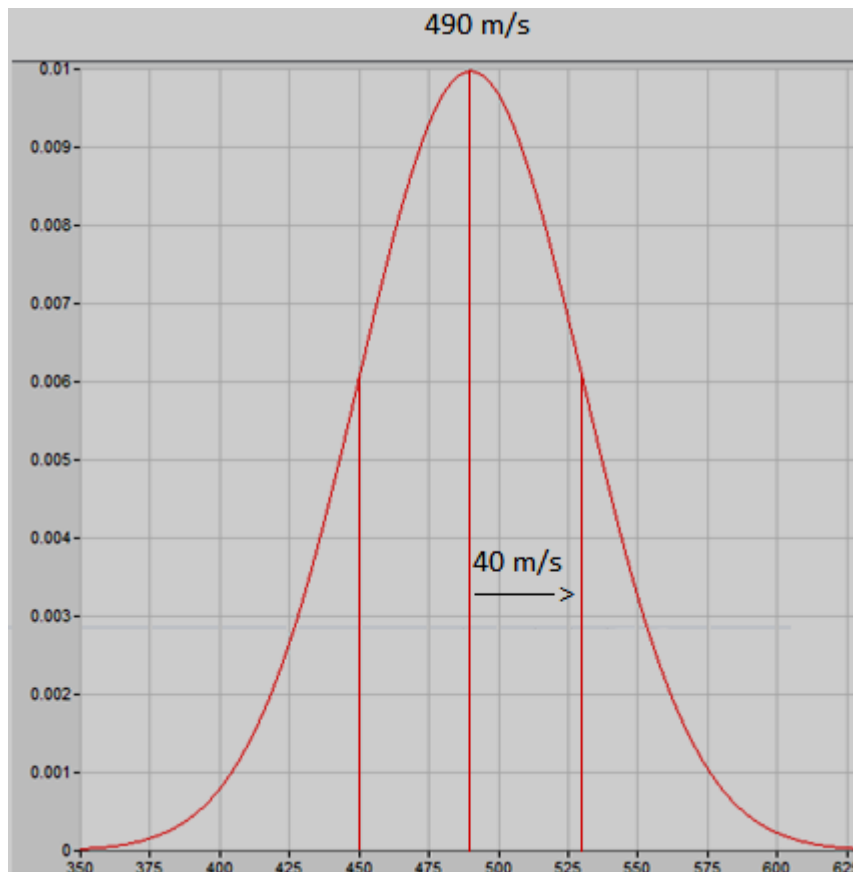
De methodes volgens Kneubuehl en Langlie en de Probit-functie kunnen echter wel gebruikt worden om de  $V_{50}$  te bepalen. De resultaten van de berekening van de  $V_{50}$  en de standaardafwijking op de normale verdeling volgens deze methodes zijn in tabel 3 weergegeven.

Methode	$V_{50}$ (m/s)	Standaardafwijking (m/s)
Langlie	493	40,15
Probit	493	40,15
Kneubuehl	482,5	40,31

Tabel 3,  $V_{50}$  en standaardafwijking volgens verschillende methodes

Zoals in de tabel te zien is, liggen de resultaten van alle drie de methodes redelijk dicht bij elkaar; de berekende waarden voor de  $V_{50}$  liggen niet meer dan 10,5m/s uiteen en de standaardafwijking niet meer dan 0,2m/s. Geconcludeerd kan worden dat de overeenstemming tussen de verschillende berekeningsmethodes dus groot is.

Om te illustreren hoe groot de kans is dat de  $V_{50}$ -snelheid op ongeveer 490m/s ligt, is in figuur 27 een Gauss kromme getekend voor deze snelheid en een standaardafwijking van 40m/s. Op de horizontale as staat in de figuur de snelheid weergegeven, op de verticale as de kans op een bepaalde snelheid op de kromme.



Figuur 27, Gauss kromme bij een  $V_{50}$  van 490 m/s en standaardafwijking van 40 m/s

### Vergelijking

Bij DMO is bekend welke  $V_{50}$ -snelheid de vesten hebben voor FSP's van 1,1 gram. Deze is middels testen door TNO vastgesteld en ligt tussen de 537 en 545 m/s, dit ligt zo'n 50 m/s boven de verkregen  $V_{50}$  voor de ronde kogels van 2,04 gram. Een verklaring voor deze afwijking kan in verschillende richtingen gezocht worden. Allereerst is de nauwkeurigheid van de verkregen resultaten met een standaardafwijking op de normale verdeling van 40 m/s niet bijzonder groot. Daarnaast verschillen de gebruikte projectielen bij beide testen op een aantal vlakken. Ze hebben namelijk een andere vorm, een andere diameter en verschillen van massa.

FSP's zijn, in tegenstelling tot de gebruikte ronde kogels, in de STANAG 2920 voorgeschreven projectielen van een bepaald materiaal met een vastgelegde vorm en afmetingen. Deze FSP's hebben, in tegenstelling tot de ronde kogels, scherpe randen waardoor het bezwijkmechanisme van het materiaal verandert, het bezwijkt namelijk eenvoudiger (14). Ronde projectielen perforeren een weefsel voornamelijk door de vezels zover te rekken dat ze bezwijken, terwijl projectielen met een afgeplatte kop vanwege de scherpe randen van het projectiel in staat zijn om de vezels, naast scheuren door oprekken, door te snijden. In het artikel wordt aangetoond dat een ballistisch weefsel, wanneer het getroffen wordt door een rond projectiel bij een snelheid rond de 490 m/s, ongeveer **twee keer** zoveel energie op kan nemen als wanneer het bij dezelfde snelheid getroffen wordt door een projectiel met eenzelfde massa en diameter maar met een platte kop.

Hiernaast is het zo dat vesten meer kinetische energie moeten verwerken wanneer zij geïmpacteerd worden door projectielen met een grotere massa dan wanneer dit gebeurt met gelijkvormige projectielen met een gelijke snelheid maar met een kleinere massa. Doordat er een lineair verband bestaat tussen de projectielmassa en de kinetische energie ( $E_{kin}=0,5mv^2$ ) die een vest moet verwerken, moeten vesten  $2,04/1,1=1,85$  keer meer energie verwerken voor impacten van de kogel dan voor impacten met de FSP vanwege de grotere massa van de kogel. Totaal zullen de vesten dus  $2/1,85=1,08$  keer meer energie kunnen verwerken voor impacten met de ronde kogels.

Verder hebben de beide projectielen een verschillende diameter, de FSP's hebben namelijk een diameter van 5,38mm en de ronde kogels een diameter van 7,938mm. Cunnif (15) (16) en Broos en Van der Jagt-Deutekom (4) hebben aangetoond dat er een factor gebaseerd op de diameter van projectielen bestaat die invloed uitoefent op de ballistische prestaties van een materiaal. In het artikel van Broos en Van der Jagt-Deutekom wordt de  $V_{50}$  van verschillende vesten uitgezet tegen honderd maal deze factor:

- $\frac{A_d A_p}{m_p}$  Vergelijking 7

Waarbij:

- $m_p$ = de projectielmassa
- $A_d$ = de oppervlakedichtheid van het doelmateriaal
- $A_p$ = de dwarsdoorsnede van een fragment, deze kan met de vergelijking 8 bepaald worden:

- $\frac{\pi d^2}{4}$  Vergelijking 8

Waarbij:

$d$ = de projectieldiameter

Wanneer de dimensieloze factor uit vergelijking 7 met de dwarsdoorsnede, de projectieldiameter en -massa en de materiaalgegevens uit tabel 1 ingevuld worden, kan hiervoor een waarde verkregen worden van 10,2 voor de kogel en 8,7 voor de FSP. Wanneer dit vergeleken wordt met de resultaten voor de verschillende vesten in (4), kan een gemiddelde  $V_{50}$ -waarde voor de vesten van ongeveer 560m/s voor de kogel en 530m/s voor de FSP bepaald worden. Hiermee blijkt dat een vest  $560/530=1,06$  keer beter presteert bij een impact met de ronde kogel (en de  $V_{50}$ -snelheid daarmee voor impacten met ronde kogels dus 1,06 keer hoger zal liggen dan bij een impact met een FSP) .

Theoretisch gezien zou het vest, wanneer de drie verschillende factoren onafhankelijk zijn, dus  $1,08*1,06=1,14$  keer beter moeten presteren voor een inslag met de kogel dan met de FSP. TNO heeft een  $V_{50}$  volgens de STANAG 2920 van ongeveer 540m/s voor de FSP bepaald, de verwachte theoretische waarde voor een inslag met de kogel is dan  $540*1,14= 615$ m/s. Dit is een puur theoretische waarde waarbij ervan uitgegaan wordt dat de verschillende factoren onafhankelijk zijn en er verder geen andere factoren van invloed zijn. Deze waarde kan gebruikt worden om het meetresultaat mee te vergelijken om te bezien of dit in dezelfde orde van grootte ligt en dus niet vreemd is.

## Conclusie

Uiteindelijk kan geconcludeerd worden dat drie berekeningsmethodes voor de  $V_{50}$  (waaronder de meest betrouwbare) gebruikt kunnen worden en dat de uitkomsten van deze drie onderling overeen komen. Het verkregen resultaat valt echter aanzienlijk lager uit dan de hierboven uitgerekende theoretische waarde. Deze is berekend op basis van de veronderstelling dat er niet meer factoren van invloed zijn en dat de drie genoemde factoren onderling onafhankelijk zijn. Of de uitkomst van de berekening een juiste is, is daarom onzeker. De drie verschillende berekeningsmethodieken van de  $V_{50}$  zijn uitgebreid getest in de praktijk, overeenstemming van het verkregen resultaat bij een berekening met de verschillende methodes is dus veel relevanter dan de berekende theoretische waarde. Vanwege deze bestaande overeenstemming, zal de berekende  $V_{50}$ -snelheid van 490 m/s met een standaardafwijking van 40 m/s op de normale verdeling dus aanvaard worden.

## 6.2. Spreiding en vervorming

In deze paragraaf zal getracht worden om aan de hand van de informatie die tijdens de spreidingsmetingen verkregen zal worden, uiteindelijk een oppervlakte te bepalen waarbinnen een achteropkomend schot ten opzichte van het trefpunt van de voorgaande treffer moet vallen, om deze nog te beïnvloeden. Om deze oppervlakte te kunnen bepalen zal ook een analyse van de vervorming van het doelmateriaal plaats moeten vinden. Daarom zullen allereerst de resultaten uit de spreidingsmetingen behandeld worden. Hierna zal getracht worden om de tijdspanne te achterhalen waarbinnen maximale vervorming optreedt, waarna behandeld wordt welke afstand de verschillende golffronten afgelegd hebben. Uiteindelijk kan hiermee een oppervlakte rondom een trefpunt bepaald worden waarbinnen een achteropkomend projectiel moet vallen om het voorgaande te beïnvloeden.

### 6.2.1. Spreiding haaks op de schootsrichting

De spreiding haaks op de schootsrichting is bepaald door de patronen met drie projectielen met een snelheid die ligt rond de eerder bepaalde  $V_{50}$ -snelheid voor één projectiel, op drie meetvellen opgesteld op verschillende afstanden af te vuren. De resultaten en een analyse ervan volgen hieronder.

## Bespreking

Wanneer de spreiding van de projectielen op de meetvellen gemeten en verwerkt wordt, kan tabel 4 opgesteld worden:

Schot nr.	b2,5 (cm)	h2,5 (cm)	b*h2,5 (cm <sup>2</sup> )	b5 (cm)	h5 (cm)	b*h5 (cm <sup>2</sup> )	b7,5 (cm)	h7,5 (cm)	b*h7,5 (cm <sup>2</sup> )
1	2,6	1,1	2,86	5	2,1	10,5	7,7	2,4	18,48
2	1,6	2,7	4,32	1,4	1,1	1,54	1,7	3,5	5,95
3	1,1	1,3	1,43	1,7	1,7	2,89	2,1	3,6	7,56
4	2,0	1,9	3,8	4,2	3,9	16,38	7,0	6,2	43,4
5	1,2	1,6	1,92	1,6	2,2	3,52	2,3	3,6	8,28
6	5,3	4,1	21,73	9,3	9,2	85,56	13,4	12,6	168,84
7	1,3	5	6,5	2,5	8,0	20	3,5	13,3	46,55

Tabel 4, spreidingsresultaten

Uit de tabel komt geen duidelijk verschil naar voren tussen de spreiding in horizontale en verticale richting. De afwijkende waarde van schot zes valt echter wel meteen op, wellicht is er iets vreemds gebeurd tijdens het afvuren van het schot of is het samenstellen van de patroon anders verlopen. Om vast te stellen of de resultaten die dit schot opgeleverd hebben bruikbaar zijn, zal aan de hand van ASTM E178 gecontroleerd worden of de resultaten uitschieters zijn (de American Society for Testing and Materials (ASTM) is een Amerikaanse standaardisatieorganisatie die vele wetenschappelijke standaarden opstelt). Wanneer slechts één resultaat een verdachte waarde oplevert, kan de geldigheid van het resultaat gecontroleerd worden met de volgende formule:

$$T_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s} \quad \text{Vergelijking 9}$$

Waarbij:

- $T_n$  = het testcriterium
- $x_n$  = de verdachte waarde
- $\bar{x}$  = het gemiddelde van de resultaten
- $s$  = de standaarddeviatie van de resultaten

Vervolgens wordt de waarde van het testcriterium vergeleken met waarden voor het testcriterium die aangeven of een resultaat wel of niet buiten een bepaald betrouwbaarheidsinterval valt, uitgaande van de veronderstelling dat de resultaten een uniforme verdeling vormen. Op die manier kan gesteld worden dat de resultaten die buiten dit interval vallen, niet significant zijn en dus niet meegenomen hoeven te worden in de analyse.

Bij de berekening van het testcriterium zijn alle resultaten in eerste instantie meegenomen omdat nog niet met zekerheid vastgesteld is of een bepaald resultaat een uitschieter is. Hierna kan, met eventueel wegnemen van één of meer uitschieters, nogmaals gecontroleerd worden of er met het nieuw ontstane gemiddelde en de nieuwe standaarddeviatie nog andere uitschieters zijn.

De gemiddeldes en de standaardafwijkingen van de oppervlakte van de rechthoeken zijn:

	<b>b*h2,5 (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>b*h5 (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>b*h7,5 (cm<sup>2</sup>)</b>
<b>gemiddelde</b>	6,08	20,06	42,72
<b>standaarddeviatie</b>	7,10	29,74	58,14

Tabel 5, gemiddelde en standaarddeviatie

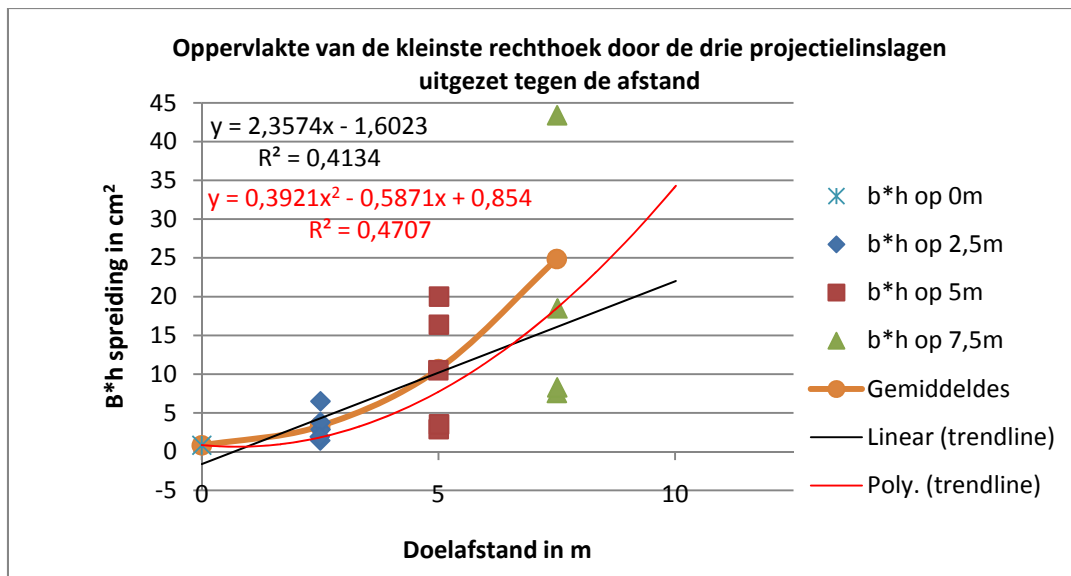
Hiermee kan de waarde voor  $T_n$  met behulp van vergelijking 9 berekend worden:

- $T_{n;2,5} = \frac{x_n - \bar{x}}{s} = \frac{21,73 - 6,08}{7,10} = 2,20$
- $T_{n;5} = \frac{x_n - \bar{x}}{s} = \frac{85,56 - 20,06}{29,74} = 2,20$
- $T_{n;7,5} = \frac{x_n - \bar{x}}{s} = \frac{168,84 - 42,72}{58,14} = 2,17$

Wanneer de verschillende berekende waarden voor  $T_n$  vergeleken worden met de kritische waarden voor  $T_n$  die gegeven zijn in tabel 1 van de ASTM E178, kan geconcludeerd worden dat alle drie de waarden van schot 6 nog buiten een 99%-betrouwbaarheidsinterval vallen en daarmee niet significant zijn. De kritische waarde voor  $T_n$  voor een 0,5% eenzijdig significantieniveau is namelijk 2,139 en alle berekende waarden zijn groter.

Wanneer nu de uitschieters weggenomen worden, kunnen de overige getallen op uitschieters gecontroleerd worden. Er blijkt dat alle resultaten nog binnen een 80%-betrouwbaarheidsinterval vallen, waardoor geconcludeerd kan worden dat alleen de resultaten van schot 6 uitschieters opleveren.

Nu de relevante resultaten bekend zijn, kan bekeken worden of er een relatie gevonden kan worden tussen de afstand en de oppervlakte van de 'projectielwolk'. Daarom worden de oppervlaktes van de rechthoeken door de projectielinslagen voor ieder schot en elke doelafstand (zonder de resultaten van schot 6) tegen de afstand waarop het schot afgevuurd is in een grafiek uitgezet. Tevens is de oppervlakte door de kleinste rechthoek op 0m (lees: de oppervlakte van de rechthoek door de middelpunten van de drie projectielen wanneer ze zich nog in een patroonhuls bevinden) toegevoegd om over meer significante punten te beschikken. Hierna wordt middels een trendlijn bepaald of er een relatie tussen beide parameters is. Gezocht wordt naar zowel een lineaire waarde als naar een waarde voor de kleinste polynoom door de resultaten. Verder zijn de gemiddelde waarden per afstand nog weergegeven en middels een lijn met elkaar verbonden. Dit levert de volgende grafiek op:

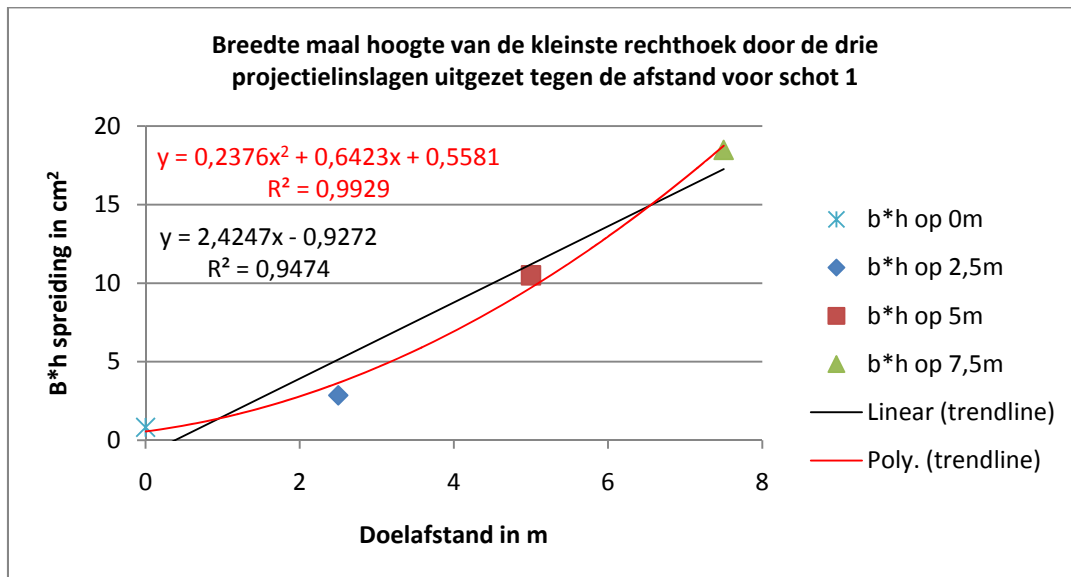


Figuur 28, relatie spreiding met doelafstand

Voor de drie verschillende doelafstanden blijkt dat de polynomische trendlijn de punten wat beter simuleert dan de lineaire trendlijn. De polynomische trendlijn heeft daarom een grotere waarde voor  $R^2$  dan de lineaire. De waarde voor het kwadraat van de correlatiecoëfficiënt,  $R^2$ , geeft aan hoe goed de trendlijn past bij de werkelijke gegevens. Als de waarde voor de correlatiecoëfficiënt  $\pm 1$  is, heeft de lijn een perfecte pasvorm en beschrijft deze de gegevens nauwkeurig. Een  $R$  van 0 staat voor geen correlatie en de lijn beschrijft de gegevens dan dus helemaal niet. Het blijkt dus dat de polynomische trendlijn de spreiding niet bijzonder nauwkeurig beschrijft. Dit is niet verrassend omdat de trendlijn een 'projectielwolk' moet beschrijven en de lijn niet meerdere oppervlaktes op één doelafstand weer kan geven, maar eerder een soort gewogen gemiddelde. De functievorm van de polynoom lijkt echter wel vrij duidelijk te kloppen met de gemiddeldes en de afzonderlijke punten, dit kan verklaard worden doordat de lijn een kwadratische formule volgt. De oppervlakte van de rechthoek zal logischerwijs ook kwadratisch toenemen omdat uit de metingen blijkt dat de spreiding in de breedte

én in de hoogte met de afstand toeneemt waardoor de beschrijving met een kwadratisch polynoom dus beter past dan met een rechte lijn.

Per individueel schot kan de polynomische trendlijn de vier verschillende punten (spreidingsoppervlakte van de drie projectielen op 0m, 2,5m, 5m en 7,5m) wél goed beschrijven, zie bijvoorbeeld figuur 29 waarin de oppervlakten van de rechthoeken door de projectielinslagen en de polynomische trendlijn voor schot 1 zijn weergegeven.



Figuur 29, relatie spreiding met doelafstand voor schot 1

Hieruit blijkt dus dat de polynomische trendlijn enige voorspellende waarde heeft, er dient echter opgemerkt te worden dat deze zeer waarschijnlijk niet de exacte spreidingsoppervlakte van een volgend schot weer zal geven, maar eerder een soort te verwachten gemiddelde. Het is daarom interessant om ook de standaarddeviatie te bekijken zodat meer inzicht verkregen kan worden in de waarschijnlijke onderlinge spreiding van de spreidingsoppervlaktes op één doelafstand die bij de verschillende schoten horen.

	Oppervlakte in cm <sup>2</sup> op 2,5m	Oppervlakte in cm <sup>2</sup> op 5m	Oppervlakte in cm <sup>2</sup> op 7,5m
<b>standaard deviatie</b>	2,01	7,60	18,90

Tabel 6, standaarddeviatie spreidingsoppervlaktes op de verschillende doelafstanden

De polynoom heeft dus een redelijke voorspellende waarde en wanneer ook de berekende standaarddeviatie meegenomen wordt, kan met vrij grote zekerheid voorspeld worden binnen welk minimale en maximale spreidingsoppervlakte de projectielen zullen vallen.

## 6.2.2. Spreiding in de schootsrichting

De spreiding in de schootsrichting is bepaald door een deel van de baan van de drie afgevuurde projectielen vlak vóór het meetvel op 5m te filmen. De resultaten en een uitwerking ervan worden hieronder behandeld.

## Bespreking

Zoals eerder in de testbeschrijving aan de orde is geweest, kan aan de hand van filmbeelden bepaald worden wat de spreiding in de schootsrichting tussen de verschillende projectielen is (zie bijvoorbeeld figuur 19 ter illustratie). Dit is voor schot twee tot en met zeven uitgevoerd en is in tabel 7 weergegeven. Schot zes is wederom weggelaten omdat eerder vastgesteld is dat er waarschijnlijk iets vreemds gebeurd is tijdens het schot of de samenstelling van het patroon waardoor de resultaten van dit schot ook hier op zijn minst twijfelachtig zijn.

schot nr.	$\Delta X1$ (m)	$\Delta X2$ (m)	$\Delta X3$ (m)	$\Delta t$ (s)	$v1$ (m/s)	$v2$ (m/s)	$v3$ (m/s)	$v;rad$ (m/s)	$\Delta X1,3$ (m)	$\Delta t1,3$ ( $\mu s$ )	$\Delta X2,3$ (m)	$\Delta t2,3$ ( $\mu s$ )
2	0,134	0,134	0,133	0,00025	536	536	530	515	0,035	65,8	0,029	54,1
3	0,131	0,131	0,128	0,00025	523	526	510	515	0,032	63,3	0,023	44,8
4	0,540	0,544	0,533	0,001	540	544	533	523	0,022	41,7	0,023	43,2
5	0,494	0,490	0,488	0,001	494	490	488	480	0,068	139	0,017	35,2
7	0,514	0,505	0,501	0,001	514	505	501	485	0,066	133	0,016	32,8

Tabel 7, spreiding in schootsrichting op 5m

Waarbij:

- $\Delta X1$ = De verplaatsing van de voorste kogel gedurende de periode  $\Delta t$
- $\Delta X2$ = De verplaatsing van de middelste kogel gedurende de periode  $\Delta t$
- $\Delta X3$ = De verplaatsing van de achterste kogel gedurende de periode  $\Delta t$
- $v1$ = De snelheid van de voorste kogel
- $v2$ = De snelheid van de middelste kogel
- $v3$ = De snelheid van de achterste kogel
- $v;rad$ = De gemeten snelheid met de radar
- $\Delta X1,3$ = De afstand tussen de voorste en achterste kogel op het moment dat de voorste kogel het doel raakt
- $\Delta t1,3$ = Het aantal microseconden dat de achterste kogel het doel later raakt dan de voorste kogel
- $\Delta X2,3$ = De afstand tussen de middelste en achterste kogel op het moment dat de middelste kogel het doel raakt
- $\Delta t2,3$ = Het aantal microseconden dat de achterste kogel het doel later raakt dan de middelste kogel

De verkregen snelheden liggen iets hoger dan de snelheden die gemeten zijn met de radar. Hier kunnen twee oorzaken voor genoemd worden. Ten eerste is er op een afwijkende doelafstand gemeten, de camera filmde namelijk beelden iets vóór het doel op 5m. Ten tweede is bovenstaande methode wat onnauwkeuriger dan meten met de radar. Dit wordt veroorzaakt doordat op de film gezocht moet worden naar het midden van de projectielen, deze niet compleet helder weergegeven kunnen worden en er niet altijd een pixel exact midden op het projectiel te vinden is. Dit kan onnauwkeurige waarden opleveren, zie bijvoorbeeld de hogere snelheid van de tweede kogel van schot 4. Verder kan met de radar slechts één snelheid verkregen worden en het is niet met zekerheid te zeggen welke snelheid dit exact is. Vast staat dat de radar meet met een golflengte van 3cm en zolang de spreiding in schootsrichting tussen de verschillende projectielen niet groter is dan deze afstand, zal de radar deze waarschijnlijk als één projectiel beschouwen.



Desalniettemin voldoet bovenstaande methode omdat het een maatstaf oplevert voor het tijdsverschil tussen de impact van het eerste en laatste kogeltje waarmee in ieder geval aangegeven kan worden in welke orde van grootte het verschil zal liggen. Zoals valt af te lezen in de op twee na laatste kolom van tabel 7, loopt dit verschil uiteen van 41,7 tot 139 $\mu$ s. Gemiddeld genomen treft het tweede projectiel na 46,2 $\mu$ s doel en het laatste projectiel na 88,5 $\mu$ s.

Dit tijdsverschil is interessant omdat het aangeeft hoe lang het materiaal al aan het vervormen is na een treffer, voordat een volgende treffer het doel raakt. Het is belangrijk om te weten of een volgend projectiel nog invloed uit kan oefenen op de vervorming die in het materiaal optreedt als gevolg van een eerdere treffer, omdat zodoende bepaald kan worden in hoeverre de schoten met drie projectielen een gelijktijdige treffer benaderen. Dit zal achterhaald worden door te onderzoeken welke golven precies gaan lopen in het doelmateriaal als gevolg van een treffer, hoe ver het golffront van deze golven in het tijdsverschil van het trefpunt verwijderd is en hoe lang het duurt totdat maximale vervorming bereikt is.

Om te bepalen wat de daadwerkelijke vervorming in het materiaal binnen de verstreken tijdsperiode is, zullen de verschillende golfsnelheden die als gevolg van impact in het materiaal lopen, nu bepaald worden. Daarvoor worden vergelijking 2 tot en met 6 ingevuld met de materiaalgegevens van de vesten uit tabel 1. Als projectielsnelheid wordt de snelheid van een projectiel in de best bruikbare filmbeelden van een schot op een vest gekozen. Hieronder zal namelijk een verdere analyse op basis van deze filmbeelden gemaakt worden, de projectielsnelheid gemeten met de radar behorende bij deze beelden is 426 m/s. Het is interessant om de resultaten hiervan te kunnen vergelijken met de berekende oplossingen van de vergelijkingen uit de theorie. Invullen van vergelijking 2 tot en met 6 levert tabel 8 op.

c (m/s)	5559
$\epsilon_0$ (%)	2,14
w (m/s)	119
$C_s$ (m/s)	558
U (m/s)	667

Tabel 8, golfsnelheden in het materiaal

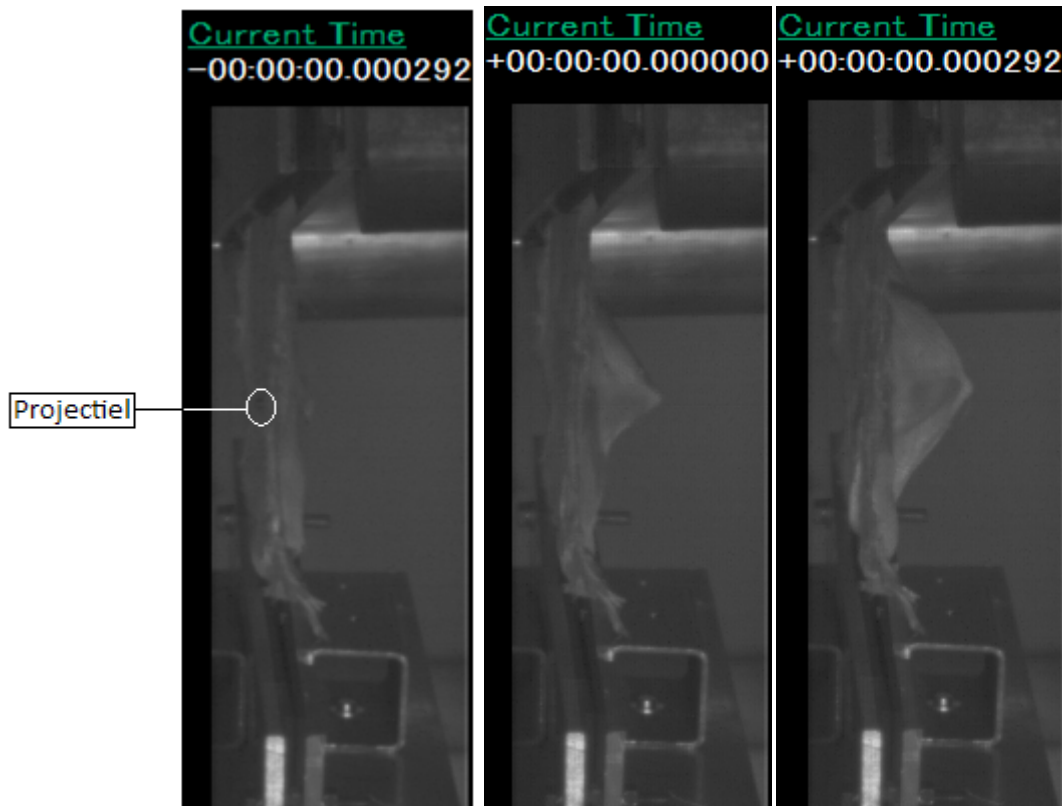
### 6.2.3. Transversale verplaatsing van het doelmateriaal

Om inzicht te krijgen in de processen die plaatsvinden tijdens en kort nadat een vest getroffen wordt, zal nu besproken worden hoe het materiaal vervormt ten gevolge van dergelijke impacten. Nu wordt onderzocht binnen welke tijdspanne het materiaal zijn maximale transversale verplaatsing bereikt heeft, hierna wordt bekeken welke afstand de verschillende goffronten door het materiaal afgelegd hebben binnen deze tijdspanne.

#### Bespreking

Om uitspraken te kunnen doen over hoe groot de tijdspanne tussen de verschillende impacten mag zijn zodat de respectievelijke golven die lopen als gevolg van deze impacten elkaar nog beïnvloeden, moet gevonden worden hoe snel het materiaal vervormt (tot het punt van maximale vervorming) bij een impact van een projectiel. Hiervoor kan de hogesnelheidscamera gebruikt worden. Vastgelegd is hoe de vervorming tegen de tijd verloopt door met 24.000 frames per seconde te filmen waardoor iedere 41,7 $\mu$ s een filmbeeld verkregen wordt. Op deze manier kan een orde van grootte verkregen

worden voor de totale tijdsduur waarover de maximale transversale vervorming plaatsvindt. Figuur 30 geeft de vervorming bij een impact met het projectiel bij een snelheid van 426m/s over de gezochte tijdsduur weer.



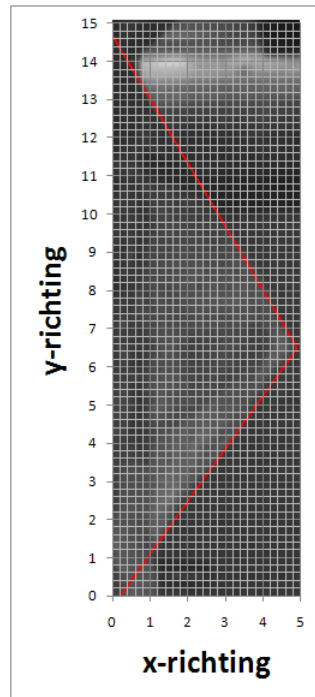
Figuur 30, weefselvervorming met de tijd

De totale tijdsduur van de transversale verplaatsing kan worden gevonden door, bovenin figuur 30, de 'current time' af te lezen op het moment van treffen en deze van de 'current time' op het moment van maximale vervorming af te trekken. Uit de figuur kan afgelezen worden dat bij een impactsnelheid van 426m/s de vervorming plaatsvindt over een tijdsduur van ongeveer  $292 - (-292) = 584 \mu s$ . Naast de tijdsduur waarin de maximale vervorming bereikt wordt, is de vervorming van het doelmateriaal in horizontale en verticale richting interessant. Middels de reeds aangehaalde beeldpixels in de theorie, kan deze vervorming vastgesteld worden. Deze ligt waarschijnlijk nog ruim onder de vervorming bij een impactsnelheid rond de  $V_{50}$ -snelheid voor deze projectielen waarbij geen perforatie plaatsvindt omdat de optredende spanning in het materiaal dan nog groter zal zijn. Tabel 9 geeft de verkregen resultaten weer.

<b>Pixels/cm in verticale richting</b>	9,8
<b>Pixels in verticale richting (bepaald bij schot 20)</b>	148
<b>Verplaatsing in verticale richting in cm (bepaald bij schot 20)</b>	15,1
<b>Pixels/cm in horizontale richting</b>	9,5
<b>Pixels in horizontale richting (bepaald bij schot 20)</b>	47
<b>Verplaatsing in horizontale richting in cm (bepaald bij schot 20)</b>	4,9

Tabel 9, totale weefselvervorming

Figuur 31 illustreert wat onder de x- en de y-richting wordt verstaan. Als verplaatsing in y-richting wordt dus de totale verplaatsing van onder naar boven genomen.



Figuur 31, verplaatsingsrichtingen

### Vergelijking

Wanneer de tijd tussen de verschillende impacten vergeleken wordt met de tijdspanne waarover vervorming optreedt, blijkt dat het laatste projectiel inslaat (na 41 tot 139 $\mu$ s) nog ruim voordat de vervorming van het materiaal door de inslag van het eerste projectiel gestopt is (na 584 $\mu$ s). Bekende resultaten van vergelijkbare testen van Starratt et al. (17) waarbij een stompvormig projectiel van 2,8g met 404m/s op een doel van 16 lagen Kevlar afgeschoten wordt, laten zien dat na 637 $\mu$ s nog altijd meer materiaalvervorming opgetreden is dan na 237 $\mu$ s. Chocron et al. (18) laten zelfs zien dat bij testen waarbij 9mm patronen van 10,24g met 500m/s op een doel van 22 lagen Kevlar afgeschoten worden, tot na 2000 $\mu$ s groei van de pyramidevormige uitdeuking in het materiaal optreedt.

Op basis van deze gegevens en de verkregen resultaten kan dus geconstateerd worden dat de vervorming van het materiaal na inslag van de projectielen bij snelheden rond de  $V_{50}$ -snelheid zonder dat perforatie optreedt, niet opgehouden is na 139 $\mu$ s maar doorgaat tot minimaal 584 $\mu$ s.

#### 6.2.4. Golven

Nu bekend is binnen welke tijdspanne de maximale vervorming van het doelmateriaal bereikt is, kan onderzocht worden welke afstand de verschillende golffronten in het materiaal afgelegd hebben. Hiermee kan vervolgens een oppervlakte rondom een trefpunt bepaald worden waarbinnen een achteropkomend projectiel het doel moet treffen om de voorgaande treffer nog te kunnen beïnvloeden.

## Bespreking

Uit (18) blijkt uit metingen met een vergelijkbaar materiaal (22 laags Kevlar 129) dat het golffront van de optredende transversale golf in dit materiaal bij een impactsnelheid van ongeveer 510m/s, een snelheid van rond de 570m/s heeft. Deze snelheid komt vrij aardig overeen met de berekende snelheid  $C_s$  voor de transversale golf in tabel 8, het relatief kleine verschil kan toegewezen worden aan afwijkende materiaaleigenschappen en aflees- en afrondfouten. Wellicht zijn er verder nog andere oorzaken voor een eventueel verschil aan te wijzen, deze zijn echter onbekend.

Het gebruikte coördinatenstelsel in het laboratorium van de KMS is het Cartesische tweedimensionale stelsel, daarom zal vanaf nu verder gerekend worden met de transversale golfsnelheid  $C_s$ .

Nu bekend is wat de golfsnelheden zijn in de weefsels, is het interessant om te bepalen hoe ver de verschillende golffronten zich verplaatst hebben in de periode tussen de verschillende inslagen. In tabel 10 is deze verplaatsing weergegeven.

	Golfsnelheid (m/s)	Verplaatsing na 46,2 $\mu$ s (cm)	Verplaatsing na 88,5 $\mu$ s (cm)
Longitudinale golf	5559	25,6	49,2
Transversale golf ( $C_s$ )	558	2,6	4,9

Tabel 10, golfeigenschappen

In de laatste experimenten is het de doelstelling om de invloed van de verschillende impacten op de  $V_{50}$ -snelheid te bepalen. Daardoor is het van belang om het effect van de verschillende inslagen op elkaar zo groot mogelijk te maken. Hiertoe dienen de afstanden tussen de inslagen van de projectielen dusdanig klein gehouden te worden, dat de inslag van een achteropkomend projectiel een eventuele perforatie door het voorgaande projectiel nog kan beïnvloeden. Daarom moet bepaald worden hoe lang een projectiel erover doet om het materiaal te perforeren. Zodoende kan bepaald worden binnen welke periode zowel de longitudinale als de transversale golf van een achteropkomend projectiel de golven van het voorgaande projectiel beïnvloeden en wellicht kunnen gaan interfereren.

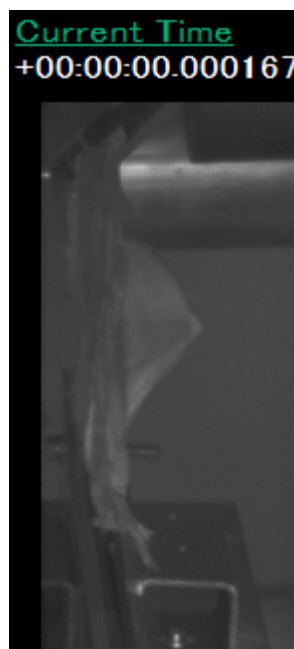
Uit de filmbeelden van de vervorming van het doelmateriaal blijkt dat de maximale transversale verplaatsing van het weefsel in minimaal 584 $\mu$ s geschiedt. De gebruikte impactsnelheid van het projectiel ligt ruim onder de bepaalde  $V_{50}$ -snelheid van de vesten waardoor aangenomen mag worden dat bij een optredende perforatie bij een snelheid rond de  $V_{50}$ -snelheid, de transversale verplaatsing iets groter zal zijn en daarmee wellicht ook de perforatietijd. Desalniettemin zal een perforatietijd van 584 $\mu$ s aangehouden worden om een ondergrens voor de verplaatsing van een golffront te kunnen bepalen.

Om de beide optredende golven als gevolg van een latere impact invloed uit de laten oefenen op het al dan niet perforeren van het materiaal door de voorgaande impact, moet het trefpunt van het achteropkomende projectiel dus maximaal  $584 * 10^{-6}s * 558 \text{ m/s} = 32,6\text{cm}$  van het trefpunt van het voorgaande projectiel liggen. Deze afstand mag nog vele malen groter zijn om alleen de longitudinale golven elkaar te laten beïnvloeden.

## Vergelijking

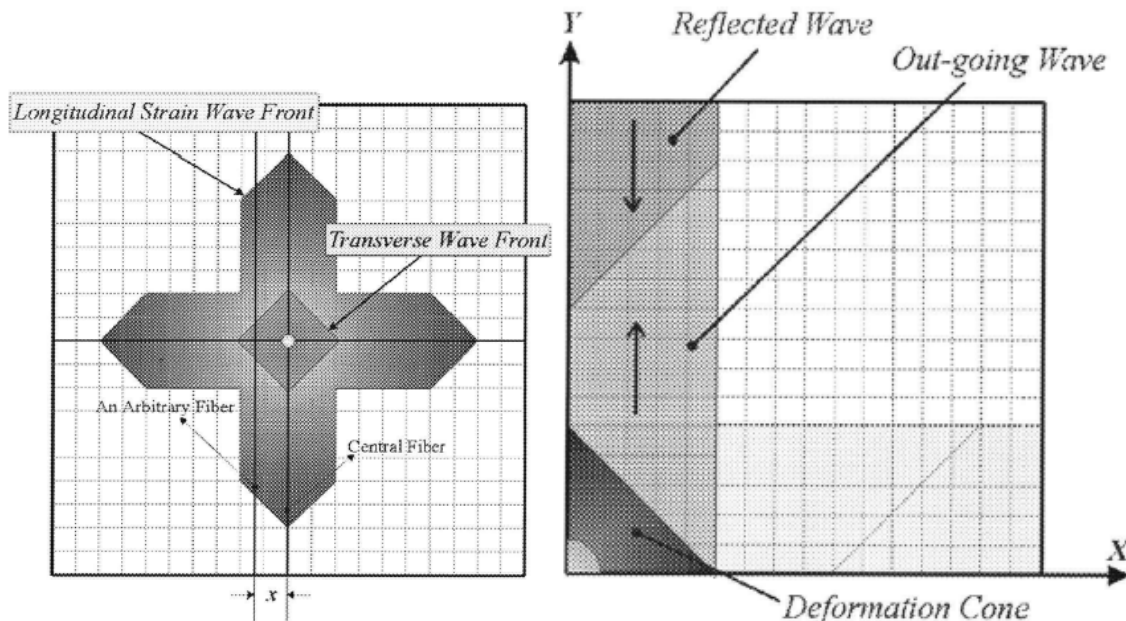
De berekende afstand van 32,6cm komt niet overeen met de gefilmde verplaatsing van de vervorming, deze bedraagt namelijk  $15,1 / 2 = 7,6\text{cm}$ . Hier kunnen verschillende oorzaken voor genoemd worden.

Zo wordt met de filmbeelden bijvoorbeeld gezocht naar het moment waarop de transversale verplaatsing zijn maximum heeft bereikt. Het moment waarop de uitwijking als gevolg van de impact de inklemming aan de bovenzijde bereikt, vindt echter al eerder plaats. Figuur 32 laat zien dat dit  $292-167=125\mu\text{s}$  eerder gebeurd is. De afstand van het punt van impact tot de maximale uitwijking richting de inklemming aan de bovenzijde is 7,8cm. Wanneer de inklemming niet al  $125\mu\text{s}$  eerder bereikt was, maar de uitwijking richting de bovenste inklemming gewoon door had kunnen lopen, was deze waarschijnlijk  $584/(584 - 125) * 7,8\text{cm} = 9,9\text{cm}$  geworden.



Figuur 32, uitwijking in y-richting

De uitwijking vindt niet symmetrisch plaats, hij wordt namelijk al eerder bereikt dan na  $584\mu\text{s}$  terwijl de uitwijking naar de onderzijde wel doorloopt tot  $584\mu\text{s}$ . Dit wordt veroorzaakt doordat de longitudinale golf via de inklemmingen weerkaatst wordt en voor extra spanningen in het materiaal zorgt. Afhankelijk van de vraag of de golven elkaar in fase of in tegenfase bereiken, kan er dan grotere of kleinere vervorming optreden. Dit hangt onder andere af van de snelheid van de golven en de afstand tot de inklemmingen. Figuur 33 (19) illustreert hoe de golven kunnen interfereren.



Figuur 33, weerkaatsing van de longitudinale golf op de inklemming

Aangezien de impact dicht bij de boven- dan de benedeninklemming plaatsvond, heeft het golffront van de longitudinale golf eerder kunnen weerkaatsen op de bovenste inklemming. Door de eerder opgebouwde spanning, is de uitwijking richting de inklemming aan de bovenzijde daarom waarschijnlijk sneller toegenomen dan aan de onderzijde. Bij de berekening van de golfsnelheden volgens vergelijking 2 tot en met 6, wordt geen rekening gehouden met inklemmingen, maar uitgegaan van volledig vrije zijden. In de praktijk is dit niet te realiseren, maar waarschijnlijk toch een factor van invloed. De vergelijkingen nemen dus niet alle factoren van invloed mee.

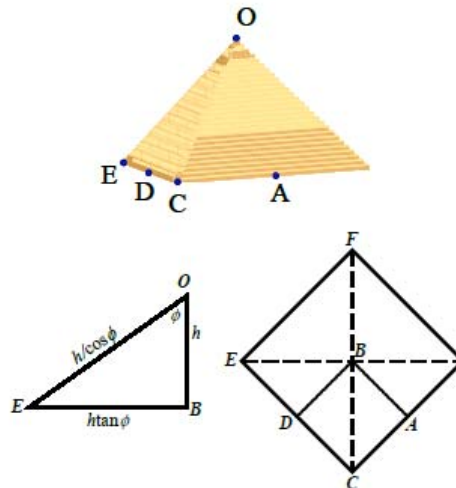
Het verdere verschil moet toegewezen worden aan het gebrek aan precisie waarmee met de camerabeelden metingen gedaan kunnen worden (er worden immers tijdstappen van  $41,7\mu\text{s}$  gemaakt), het ontbreken van factoren in de vergelijkingen, zoals het uitgangspunt van volledig vrije randen en afwijkingen in de werkelijke materiaaleigenschappen ten opzichte van de opgave van de fabrikant.

### 6.2.5. Spreidingsoppervlakte

Nu zowel de theoretische afstand als de gemeten afstand, die het golffront van de transversale golf afgelegd heeft in de tijd tot een volgende impact, bekend zijn, zal getracht worden om een oppervlakte te bepalen waarbinnen de drie projectielen moeten vallen om elkaar te kunnen beïnvloeden. Dit zal gedaan worden aan de hand van de materiaalvervorming die het weefsel ondergaat als gevolg van de langzaamste (transversale) golf omdat, wanneer beide golven invloed uit moeten kunnen oefenen, dit de beperkende factor is. De oppervlakte zal bepaald worden voor de afstand die middels de filmbeelden verkregen is en niet voor de theoretische afstand. Hierboven is namelijk al vastgesteld dat er een groot verschil tussen beide afstanden is en de filmbeelden benaderen de praktijk het beste.

*Bespreking*

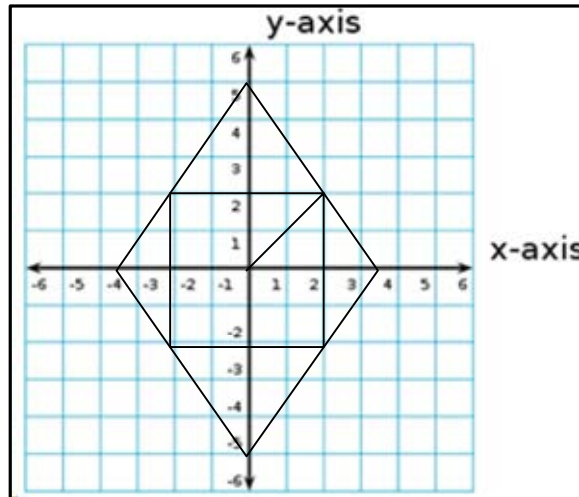
Zoals bekend zal het weefsel een pyramidevormige vervorming ondergaan. De maximale spreiding tussen de verschillende projectielen, komt dus overeen met de oppervlakte van de basis van de pyramide, in figuur 34 is dat  $CE \cdot EF$ .



Figuur 34, afmetingen pyramide

Op basis van figuur 3 blijkt dat de vervorming van de pyramidebasis niet volledig symmetrisch plaatsgevonden zal hebben. De deels opgemeten en deels berekende waarde van 9,9cm voor de afgelegde afstand van het transversale golffront is volgens dit figuur namelijk niet de kortste afstand van het punt van impact tot het golffront. Met de foto uit dit figuur die na  $42\mu\text{s}$  gemaakt is, kan wel een inschatting gemaakt worden van de verhouding van de zijdes. Bij deze opname is namelijk gebruik gemaakt van doelmateriaal met een raster. De totale verticale en horizontale verplaatsing kan nu aan de hand van dit figuur geschat worden, deze zijn respectievelijk tien hokjes en zeven hokjes. Aangenomen wordt dat de helft hiervan genomen kan worden als afstand van het punt van impact tot respectievelijk de verticale golffronten en de horizontale golffronten. Met behulp van deze informatie en wat eenvoudige goniometrie, kunnen de totale hoogte en breedte van de grootste rechthoek door de pyramidebasis waarbinnen de opgemeten golven invloed op elkaar uitoefenen nu berekend worden. Deze is respectievelijk  $2 * 3,47 = 6,94\text{cm}$  en  $2 * 2,43 = 4,86\text{cm}$ . Daarmee wordt de oppervlakte van de rechthoek  $6,94 * 4,86 = 33,7\text{ cm}^2$ .

Het geniet de voorkeur om bij de  $V_{50}$ -test met drie projectielen met een doelafstand van 5m te werken omdat de spreiding in de schootsrichting bepaald is met camerabeelden die ongeveer op 5m opgenomen zijn. Zodoende behouden uitspraken die ontleend worden aan deze beelden ook voor de  $V_{50}$ -test met drie projectielen hun relevantie. Daarom is middels de "methode van Henry" vastgesteld hoe groot de kans is dat alledrie de projectielen binnen een oppervlakte van  $33,7\text{cm}^2$  vallen wanneer de doelafstand 5m is, zie hiervoor bijlage 1. De kans hierop is uiteindelijk vastgesteld op 95%. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat gerekend is met de maximale oppervlakte van een rechthoek binnen de pyramidebasis en niet met de oppervlakte van de basis zelf. Dit is gedaan omdat de kortste afstand van het punt van impact tot de rand van de pyramidebasis maatgevend is. Zoals reeds eerder vastgesteld is, is het echter onwaarschijnlijk dat het golffront van de transversale golf zich binnen  $584\mu\text{s}$  slechts over een oppervlakte van  $33,7\text{cm}^2$  verspreid heeft, zie ook figuur 35.



Figuur 35, berekende rechthoek ten opzichte van totale pyramidebasis

Desalniettemin is gerekend met het grootst mogelijke vierkant dat binnen de ruit past, een deel van de oppervlakte van de ruit wordt in de berekening dus niet meegenomen en de kans kan dus gezien worden als een ondergrens.

### Conclusie

Met wat eenvoudige goniometrie en de opgemeten waarden voor het afgelegde golffront van de transversale golf, is een oppervlakte voor de pyramidebasis berekend, deze is  $33,7\text{cm}^2$ . Bovendien is de kans berekend dat alledrie de projectielen binnen deze basis vallen, dit is 95% en kan als ondergrens van de kans gezien worden omdat een deel van de oppervlakte van de pyramidebasis in deze berekening niet meegenomen is. Daarom wordt een kans van 95% als ruim voldoende beschouwd en zal de doelafstand voor de testen waarbij drie projectielen tegelijkertijd op het doel afgevuurd worden, 5m bedragen.

### 6.3. $V_{50}$ met drie gelijktijdige impacten

Tijdens dit experiment is getracht te achterhalen wat de  $V_{50}$ -snelheid van de vesten is wanneer ze getroffen worden met de patronen gevuld met drie projectielen. Hieronder zullen de resultaten van dit experiment weergegeven worden en deze zullen vervolgens vergeleken worden met de eerder verkregen  $V_{50}$ -snelheid voor de vesten voor enkelvoudige impacten.

### Bespreking

Uiteindelijk zijn er totaal vijftien schoten op drie vest(del)en afgevuurd. In figuur 36, 37 en 38 is weergegeven hoe deze de vesten getroffen hebben.





Figuur 36, treffers op vest 1



Figuur 37, treffers op vest 2



Figuur 38, treffers op vest 3

Opvallend is dat niet voor ieder schot drie treffers op de verschillende vesten terug te vinden zijn in de figuren hierboven. Op het eerste vest wordt dit veroorzaakt doordat de verschillende projectielen van schot 2 en 3 erg dicht bij elkaar het vest troffen en één projectiel van schot 5 de rand van het vest raakte. Op vest twee zijn er twee projectielen van het vijfde schot erg dicht bij elkaar op het vest ingeslagen. Op het derde vest lagen alle inslagen ver genoeg uit elkaar om onderscheid aan te kunnen geven.

Dat de projectielen dicht bij elkaar ingeslagen zijn, is een mooi resultaat. De beïnvloeding van achteropkomende projectielen is dan immers zo groot mogelijk en het is een situatie die in de praktijk bij een IED-ontploffing ook kan voorkomen. Het kan echter wel zo zijn dat de projectielen van een schot inslaan dichtbij een plek waar tijdens een voorgaand schot ook al projectielen geïmpacteerd hebben, waardoor wellicht eerder perforatie plaats kan vinden. Hoe de exacte relatie is tussen een impact en de afstand die door een volgende impact tot dit punt gehouden moet worden om deze invloed niet mee te nemen, is onbekend. Wellicht liggen de treffers van schot 5 op vest 2 wat dicht bij de treffers van schot 2 op dit vest. De daadwerkelijke spreiding tussen de verschillende projectielen van ieder schot, is in tabel 11 terug te vinden. Omdat niet van ieder schot de verschillende impacten van afzonderlijke projectielen duidelijk te achterhalen waren op de filmbeelden en de vesten, is van enkele schoten de kleinste rechthoek door de drie impacten gegeven. Zoals reeds eerder vermeld is, is van schot 5 op het eerste vest één projectiel exact op de

rand van het vest gevallen. In de tabel zijn de cellen waarin een impact op het vest door dit projectiel benodigd was, ingevuld met een \*.

	Schotnr.	$\Delta 1;2$ (cm)	$\Delta 2;3$ (cm)	$\Delta 1;3$ (cm)	rechthoek	
					hoogte	breedte
<b>Vest 1</b>	1				4,7	1,3
	2				0,9	1,2
	3				0,9	0,7
	4	11,5	4,7	8,6		
	5	*	*	2,8		
<b>Vest 2</b>	1	9	9,7	3,8		
	2	3,2	3	5,9		
	3	2,6	7,2	8		
	4	4,6	9,6	7,4		
	5	0,6	1,8	2,6		
<b>Vest 3</b>	1	5,4	4,6	4,9		
	2	0,7	1,9	2,1		
	3	4,4	7,7	4,5		
	4				1	1,2
	5				1,7	1,2

Tabel 11, spreiding op de vesten

Voor ieder vest is voor elk schot bepaald wat de snelheid van de projectielen was, of er perforatie heeft plaatsgevonden en welke projectielen het vest geperforeerd hebben. De snelheid is om eerder genoemde redenen met de radar gemeten. Deze beschouwd de projectielen echter wel als één projectielwolk en geeft daarom slechts één snelheid voor de drie projectielen. Omdat een vest nooit kan voldoen wanneer het geperforeerd wordt omdat de drager in de werkelijkheid dan verwond zal raken, wordt gesteld dat perforatie heeft plaatsgevonden als minimaal één van de drie projectielen door het vest heen gedrongen is. Hierbij zijn geen onregelmatigheden naar voren gekomen voor wat betreft het sneller perforeren van een vest door projectielen uit een later afgevuurd schot. De resultaten worden hieronder in tabel 12 weergegeven.

	Schotnr.	Snelheid op het doel (m/s)	Perforatie	Perforatie		
				kogel 1	kogel 2	kogel 3
<b>Vest 1</b>	1	532	ja	ja	ja	ja
	2	497	ja	ja	ja	ja
	3	518	ja	ja	ja	ja
	4	502	ja	nee	ja	nee
	5	519	ja	ja	*	ja
<b>Vest 2</b>	1	499	ja	ja	ja	nee
	2	496	ja	ja	ja	ja
	3	499	ja	ja	nee	ja
	4	486	ja	ja	nee	ja
	5	475	ja	ja	nee	Nee
<b>Vest 3</b>	1	487	ja	ja	ja	Ja
	2	461	nee	nee	nee	Nee
	3	487	ja	ja	nee	Nee
	4	451	nee	nee	nee	Nee
	5	461	nee	nee	nee	Nee

Tabel 12, resultaten multiple hit-test

Voor het bepalen van de  $V_{50}$  van een vest volgens STANAG 2920 dienen minimaal zes schoten gelost te worden waarvan exact de helft het vest moet perforeren en de andere helft niet. Bovendien mag het verschil tussen de hoogst gemeten snelheid van deze zes resultaten en de laagste snelheid niet verder dan 40 m/s uit elkaar liggen. Van deze zes waarden wordt vervolgens het gemiddelde bepaald wat dan de  $V_{50}$  voorstelt. Het blijkt dat met de snelheden van schot 4 en 5 op vest 2 en schot 1, 2, 4 en 5 op vest 3 een waarde voor de  $V_{50}$  volgens Stanag bepaald kan worden, deze is 470m/s. Wanneer schot 5 op vest 2 niet meegenomen wordt in verband met de kleine afstand van de punten van impact van de projectielen tot eerdere impactpunten, kan met schot 3 op vest 3 een nieuwe  $V_{50}$  bepaald worden. Deze is 472m/s en maakt dus geen groot verschil met de eerder bepaalde  $V_{50}$ -snelheid. Deze hogere  $V_{50}$ -snelheid zal echter wel als leidend beschouwt worden om te voorkomen dat de afstand tussen impactpunten van projectielen uit verschillende schoten een rol kan spelen.

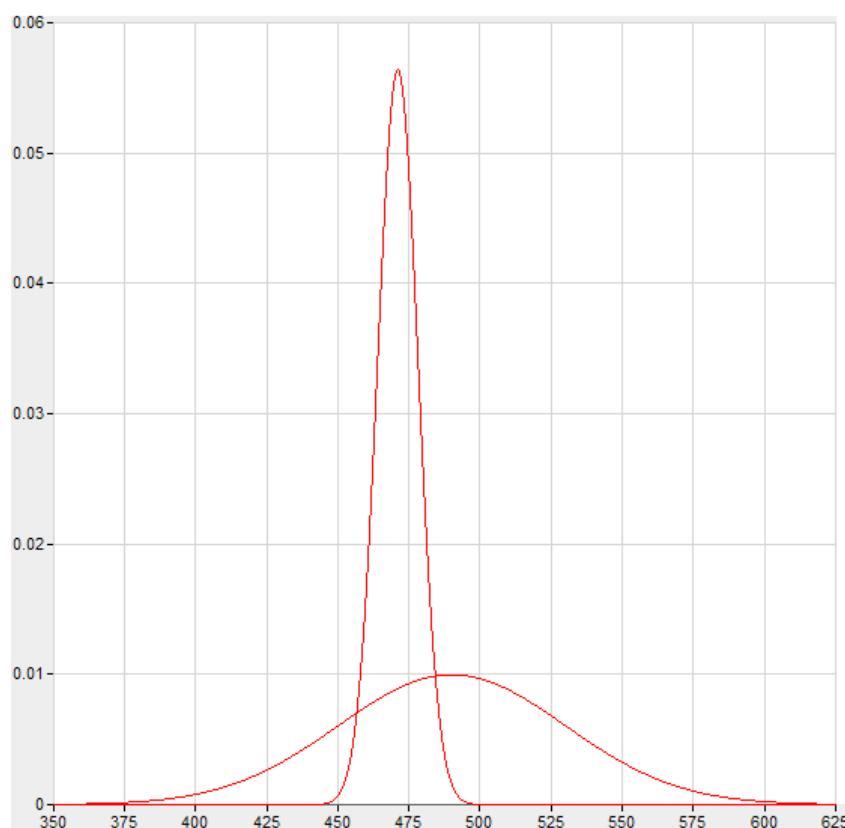
Ook met de methode volgens Kneubuehl kan een  $V_{50}$  berekend worden. Deze levert naast een waarde voor de  $V_{50}$  ook een waarde voor de standaardafwijking op. De methodes volgens Langlie en Probit kunnen echter niet gebruikt worden om de  $V_{50}$  te bepalen. Het is voor deze methodes namelijk noodzakelijk dat er overlap bestaat tussen de snelheden waarbij wel en geen perforatie plaatsgevonden heeft. De hoogste snelheid waarbij geen perforatie plaatsgevonden heeft ligt bij de gemeten snelheden echter lager dan de laagste snelheid waarbij er nog wel perforatie plaatsgevonden heeft waardoor er dus geen overlap bestaat.

De uiteindelijke resultaten van de berekening van de  $V_{50}$  en de standaardafwijking zijn in tabel 13 weergegeven.

Methode	V <sub>50</sub> (m/s)	Standaardafwijking (m/s)
STANAG	472	-
Kneubuehl	471	7,07

Tabel 13, V<sub>50</sub> en standaardafwijking multiple hit

In de tabel valt af te lezen dat de standaardafwijking nu een stuk kleiner is dan bij de V<sub>50</sub>-test met één treffer tegelijk. Dit kan verklaard worden doordat de trefsnelheden nu minder ver uit elkaar liggen. Hierdoor is de bepaalde V<sub>50</sub> een stuk nauwkeuriger. Dit komt ook duidelijk naar voren in onderstaande Gauss kromme die een stuk steiler loopt dan de Gauss kromme voor de resultaten van de V<sub>50</sub>-test met één treffer tegelijk. Duidelijk is te zien dat de kans op de berekende V<sub>50</sub>-snelheid voor de test met drie gelijktijdige impacten een stuk groter is dan de kans op de berekende V<sub>50</sub>-snelheid met één impact per schot.

Figuur 39, Gauss krommen voor beide V<sub>50</sub>-snelheden en standaardafwijkingen

### Conclusie

De gevonden waarde voor de V<sub>50</sub>-snelheid van de vesten voor semi-gelijktijdige impacten van drie projectielen ligt zo'n 20m/s lager dan die voor impacten met één projectiel. Dit komt overeen met de eerder beschreven verwachting dat de V<sub>50</sub>-snelheid van de vesten zou zakken. Een verklaring voor dit verschil moet gezocht worden in de eerder genoemde interferentie tussen de verschillende gelijktijdig lopende golven in het materiaal als gevolg van de (semi-) simultane impacten op de vesten. Hierdoor ontstaat een hogere spanning in het materiaal met als gevolg dat dit eerder bezwijkt. Verder is de kans dat één van de drie projectielen het vest perforereert bij een snelheid net onder de V<sub>50</sub> natuurlijk drie keer zo groot als voor één projectiel, de kans dat er een uitschieter bij de drie treffers zit is namelijk drie keer zo groot. Hiernaast kan het zo zijn dat de grote

standaardafwijking op de normale verdeling van de  $V_{50}$ -snelheid bij de test met één treffer tegelijk een rol speelt. Deze standaardafwijking duidt namelijk op een onzekerheid in het resultaat waardoor het verschil tussen beide berekende  $V_{50}$ -snelheden een stuk kleiner zou kunnen zijn. Het is dus interessant om met de normale verdeling de kans dat de  $V_{50}$ -snelheid voor enkelvoudige treffers boven 472 m/s ligt te bepalen, deze is 67%. Daardoor is het wel aannemelijk dat de vesten slechter presteren bij de  $V_{50}$ -test met drie projectielen dan bij de  $V_{50}$ -test met één projectiel.

## 7. Conclusies en aanbevelingen

### 7.1. Conclusies

In dit onderzoek is getracht meer inzicht te verschaffen in de bescherming die scherfvesten militairen bieden. Hiervoor is allereerst achterhaald welke maatgevende standaard voor het beoordelen van de kwaliteit van scherfvesten gebruikt wordt. Internationaal, en in de NAVO in het bijzonder, blijkt dit de  $V_{50}$ -snelheid van een vest voor een gestandaardiseerd projectieltype (FSP) te zijn. De  $V_{50}$ -snelheid duidt de snelheid aan waarbij de helft van deze FSP's een vest perforeren en de andere helft door het vest gestopt worden. Om deze  $V_{50}$ -snelheid te kunnen bepalen, dient volgens een aantal richtlijnen gewerkt te worden, deze staan in de door de NAVO voorgeschreven normen in de STANAG 2920.

Internationaal is al vaker onderzoek verricht naar kwaliteit van ballistische weefsels, hieruit blijkt dat met andere werkwijzen dan in de STANAG 2920 voorgeschreven staan, dezelfde resultaten bereikt kunnen worden. Zo heeft TNO bijvoorbeeld vastgesteld dat, wanneer afgeweken wordt van de methode waarop het doelmateriaal opgehangen dient te worden, nog altijd dezelfde resultaten verkregen kunnen worden. Hiernaast heeft Commandant Maldague aangetoond dat de berekeningsmethode van de  $V_{50}$  uit de STANAG 2920 niet de nauwkeurigste is. Geconcludeerd kan dus worden dat de STANAG 2920 onderzoekers onnodig beperkt en herzien dient te worden.

Verder is er al vanaf de jaren '50 in de vorige eeuw uitgebreid onderzoek verricht naar de bescherming die weefsels kunnen bieden. Het blijkt dat veel kogel- en scherfwerende vesten van aramide vervaardigd zijn en dat deze allen op eenzelfde manier reageren op impacten van projectielen. Bezwijkmechanismen en vormfactoren van projectielen zijn inmiddels uitgebreid beschreven alsmede de factoren van invloed waaronder een weefsel van aramide vervormd bij de impacten.

Uiteindelijk zijn aan de hand van reeds geproduceerd onderzoek, de STANAG 2920 en adviezen van aanwezige experts op de KMS in Brussel, twee verschillende testopstellingen ontworpen. Eén waarmee de  $V_{50}$ -snelheid en de vervorming bij treffen van een materiaal onderzocht kunnen worden en een andere opstelling waarmee op eenvoudige wijze de relatie tussen doelafstand en projectielspreiding van drie tegelijkertijd afgevuurde projectielen bepaald kan worden.

Om te kunnen bepalen of de  $V_{50}$ -snelheid van de Fecsa-vesten veranderen wanneer deze met meerdere projectielen tegelijkertijd getroffen worden, is allereerst vastgesteld wat de  $V_{50}$ -snelheid van het vest voor de gebruikte ronde stalen kogels van 2,043 gram is. Deze is ongeveer 490 m/s met een standaardafwijking op de normale verdeling van 40 m/s. Deze snelheid en standaardafwijking zijn berekend met drie uitgebreid in de praktijk geteste berekeningsmethodes waardoor deze resultaten betrouwbaar zijn.

Met een analyse van de vervormingsmechanismen en de spreiding in transversale en in schootsrichting is hierna een oppervlak rondom het trefpunt van het eerste projectiel bepaald. Het blijkt dat het materiaal onder invloed van een impact een pyramidevormige vervorming ondergaat. De oppervlakte van de pyramidebasis is de oppervlakte waarbinnen het tweede en het derde projectiel het doel moeten treffen om het vervormingsmechanisme van het materiaal dat door de impact van het eerste projectiel veroorzaakt wordt, te beïnvloeden. Bovendien beïnvloeden de impacten van het tweede en derde projectiel zo de onderlinge vervormingsmechanismen die

ontstaan als gevolg van deze impacten. De berekende oppervlakte van de pyramidebasis bedraagt  $33,7\text{cm}^2$ . De kans dat alledrie de projectielen binnen deze basis vallen wanneer op een doelafstand van 5m gevuld wordt, is 95% en kan als ondergrens van de kans gezien worden omdat een deel van de oppervlakte van de pyramidebasis in deze berekening niet meegenomen is.

Uiteindelijk is de  $V_{50}$ -snelheid van de vesten voor (semi-) gelijktijdige impact van drie projectielen bepaald, deze ligt zo'n 20m/s lager dan die voor impacten met één projectiel. Dit kan veroorzaakt worden doordat de vervormingsmechanismen die ontstaan als gevolg van de verschillende impacten elkaar beïnvloeden maar tevens doordat de kans op een uitschieter bij gelijktijdig treffen met meerdere projectielen groter is. Hiernaast kan de grote standaardafwijking op de normale verdeling voor de berekende  $V_{50}$ -snelheid van de vesten voor enkelvoudige impacten een rol spelen. Deze  $V_{50}$ -snelheid kan dus niet met zekerheid vastgesteld worden. Desalniettemin is aan de hand van de normale verdeling bepaald dat het aannemelijk is dat de vesten slechter presteren voor de  $V_{50}$ -test met drie projectielen dan voor de  $V_{50}$ -test met één projectiel.

Ongeacht de oorzaak voor het verschil tussen beide  $V_{50}$ -snelheden leidt dit tot de eindconclusie dat een scherfvest waarschijnlijk slechter presteert wanneer het met meerdere, zelfde projectielen tegelijkertijd getroffen wordt dan wanneer het met één dergelijk projectiel wordt geraakt. Een scherfvest zal namelijk in het eerste geval vermoedelijk bij een lagere snelheid geperforeerd worden dan in het laatste geval. Dit is een uiterst relevant gegeven omdat scherfvesten heden ten dage vooral bescherming dienen te bieden tegen IED-ontploffingen. Hierbij vliegen vele fragmenten alle kanten op waardoor een vest op meerdere plaatsten tegelijkertijd getroffen wordt wanneer de dragende militair zich in de buurt van zo'n ontploffing bevindt. Dit betekent dat de opgegeven  $V_{50}$ -snelheden die op basis van de STANAG 2920 vastgesteld zijn, wellicht niet gebruikt moeten worden om de kwaliteit van vesten mee te vergelijken omdat deze, in het licht van hedendaagse ontwikkelingen, mogelijk niet relevant meer zijn. Volgens de STANAG 2920 moeten projectielen namelijk één voor één op de vesten afgevuurd worden waardoor een IED-ontploffing niet of nauwelijks gesimuleerd kan worden.

## 7.2. Aanbevelingen

Dit onderzoek kan gezien worden als een eerste aanzet om meer inzicht te verkrijgen in de bescherming die scherfvesten tegen IED-ontploffingen bieden. Om dit verder te verhelderen, dient nader onderzoek verricht te worden waarin praktijksituaties meer benaderd worden. Het geniet aanbeveling om onderzoek te verrichten naar het effect van:

- Het aantal gelijktijdige impacten op een vest op de  $V_{50}$ -snelheid van vesten;
- De materiaalsoort, vorm (bijvoorbeeld projectielen met scherpe randen) en de trefhoek van projectielen op de  $V_{50}$ -snelheid van vesten;
- Impacten met een combinatie van verschillende soorten projectielen op de  $V_{50}$ -snelheid van vesten;
- Extreem hoge luchtdrukken op de  $V_{50}$ -snelheid van vesten;
- Luchtvochtigheid en temperatuur op de  $V_{50}$ -snelheid van vesten.

Hiernaast geniet het aanbeveling om de STANAG 2920 te herzien. Tijdens het verrichten van dit onderzoek is meerdere malen gebleken dat de STANAG 2920 niet meer als leidend gezien hoeft te worden doordat met andere werkwijzen dezelfde resultaten behaald kunnen worden. Bovendien kan



uit de eindconclusie van dit onderzoek afgeleid worden dat het het overwegen waard is om aparte STANAG-normen voor de kwaliteitsbeoordeling van vesten op het gebied van kogelwering en bescherming tegen ontploffingen op te stellen. Wanneer de kwaliteit van vesten onderzocht wordt door deze aan singuliere treffers te onderwerpen, zal dit namelijk waarschijnlijk een ander resultaat opleveren dan wanneer deze met meerdere projectielen tegelijkertijd getroffen worden.

## 8. Literatuurlijst

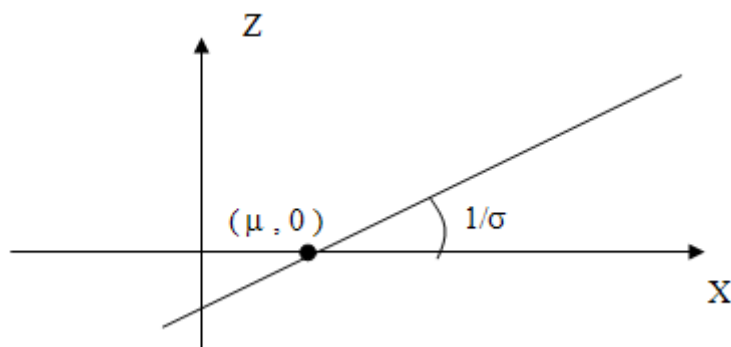
1. **drs. Van der Meer, S.J., Ikol. drs. Van den Berg, C.E. en dr. Bakker, E.** Effecten van IED's op het defensieoptreden. *Militaire Spectator*. september 2007, pp. 352-359.
2. **NATO.** *STANAG 2920 PPS (EDITION 2) – Ballistic test method for personal armour materials and combat clothing*. Brussels : NATO Standardization Agency, 2003. NSA/0723-PPS/2920.
3. **Jager, Hein.** *Summary of test results KPU Samples FECSA Verification Series Testing*. 2007.
4. *Ballistic protection of fragment vest against IED threat.* **Broos, J.P.F. en M.J., Van der Jagt-Deutekom.** Brussel : PASS, 2008.
5. **Kneubuehl, Beat P.** *Ballistic protection*. Thun : sn, 2003.
6. **Langlie, H.J.** *A reliability test method for 'one-shot' items*. Newport Beach : Philco, 1963. U-1792.
7. **Maldague, Marc.** Evaluation of some methods in order to determine V50. *PASS 2008*. 2008, pp. 307-318.
8. **Roylance, David.** Ballistics of transversely impacted fibers. *Textile research journal*. 10, 1977, Vol. 47.
9. *Characterization and constitutive modeling of aramid fibers at high strain rates.* **V.B.C., Tan, X.S., Zeng en V.P.W., Shim.** Singapore : International journal of impact engineering, 2008, Vol. 35.
10. *Ballistic penetration of conically cylindrical steel projectile into plain-woven fabric target – A finite element simulation.* **Gu, Bohong.** sl : Journal of composite materials, 2004, Vol. 38.
11. **Roylance, David, Wilde, Anthony en Tocci, Gregory.** Ballistic impact of textile structures. *Textile research journal*. 1, 1973, Vol. 43.
12. **Field, J.E. en Sun, Q.** *A high speed photographic study of impact on fibres and woven fabrics*. Cambridge : Cambridge University, 1990.
13. **M.J., Van der Jagt-Deutekom en F.T.M., Van Wegen.** *Personal protective equipment against large and small fragments*. Rijswijk : TNO, 2008. TNO-DV 2008.
14. **Tan, V.B.C., Lim, C.T. en Cheong, C.H.** Perforation of high-strength fabric by projectiles of different geometry. *International Journal of Impact Engineering*. 2, 2003, Vol. 28.
15. *A design tool for the development of fragmentation protective body armor.* **Cunnif, P.M.** San Antonio : 18th International Symposium on Ballistics, 1999.
16. *A semi empirical model for the ballistic impact performance of textile-based personnel armor.* **Cunnif, P.M.** 1, sl : Textile research journal, 1996, Vol. 66.
17. **Starratt, D., et al.** *An instrumented experimental study of the ballistic impact response of Kevlar fabric*. San Antonio : sn, 1999.

18. **Chocron, Sydney, et al.** Measurement of strain in fabrics under ballistic impact using embedded nichrome wires, part II: Results and analysis. *International Journal of Impact Engineering*. 2009.
19. **Noori, Shahkarami Ali.** *A numerical investigation of ballistic impact on textile structures*. sl : University of British Colombia, 1999.
20. **Teijin Aramid BV.** *Twaron The Power of Aramid Ballistics Materials Handbook* . sl : Teijin Aramid BV, 2008.
21. **Tam, T en Abhatnagar.** *Lightweight Ballistic Composites*. sl : Woodhead Publishing Ltd., 2006.
22. *Experimental results and a simple theory for the early deflection-time history of a ballistic fabric.* **Anderson, Charles Jr. E en Chocron, Sydney.** Melville : AIP Conference Series, 2009.
23. **Landmacht, Koninklijke.** *Gevechtsoperaties, LPD II - deel C: gevechtsoperaties tegen een irregulier optredende tegenstander*. 's-Gravenhage : Koninklijke Landmacht, 1998. p. 256.

### Bijlage 1: De rechte van Henry

Om te bepalen hoe groot de kans is dat de drie projectielen het doel binnen de oppervlakte van  $33,7\text{cm}^2$  zullen raken, wordt de methode van “de rechte van Henry” toegepast. Middels deze methode kan gecontroleerd worden in hoeverre bepaalde resultaten aan de normaalwet voldoen. In het rechthoekig assenstelsel  $[x, z]$  wordt de vergelijking van de rechte van Henry gegeven door  $z = \frac{x-\mu}{\sigma}$  en kenmerkt zich door:

- zijn abscis aan de oorsprong:  $\mu$
- zijn hoekcoefficient:  $1/\sigma$



Figuur 1, de rechte van Henry

De rechte van Henry zal voor zowel de spreiding in horizontale richting (de x-richting) als voor de spreiding in verticale richting (de y-richting) opgesteld worden. Daarvoor moet voor de verkregen resultaten op 5m bij de spreidingsbepaling haaks op de schootsrichting, vastgesteld worden hoe ver de verschillende projectielen uit elkaar de vellen geïmpacteerd hebben.

Wanneer de kleinst mogelijke rechthoek door de drie verschillende projectielen getrokken wordt zoals in figuur 24, zal het punt linksonder het coördinaat  $(0,0)$  krijgen. De andere twee impacten krijgen  $(x,y)$ -coördinaten die aangeven hoe ver in x- en in y-richting ze van het punt met coördinaat  $(0,0)$  de vellen geïmpacteerd hebben. Dit levert de tabel 1 op.

		5m	
	Projectiel	x	y
<b>Schot 1</b>	1	0,0	0,0
	2	3,1	0,8
	3	5,0	2,1
<b>schot 2</b>	1	0,0	0,0
	2	1,1	0,0
	3	1,4	1,1
<b>Schot 3</b>	1	0,0	0,0
	2	1,4	1,3
	3	1,7	1,7
<b>Schot 4</b>	1	0,0	0,0
	2	2,6	3,6
	3	4,2	3,9
<b>Schot 5</b>	1	0,0	0,0
	2	0,0	2,2
	3	1,6	2,2
<b>Schot 7</b>	1	0,0	0,0
	2	1,2	1,4
	3	2,5	8,0

Tabel 1, spreiding op 5m

Vervolgens wordt de z-waarde voor elke resultaatwaarde bepaald door achtereenvolgens de resultaten (i) in oplopende volgorde te rangschikken, vast te stellen hoe vaak deze waarde voorkomt ( $n_i$ ), dit aantal cumulatief opnieuw te rangschikken ( $a_i$ ), het aantal keer dat een waarde ( $n_i$ ) voorkomt door het totaal aantal waarden te delen ( $n_i/a_i$ ) en in de tabel voor cumulatieve kansen bij de standaardnormale verdeling op te zoeken welke z-waarde bij deze waarde hoort. Dit is voor zowel de resultaten in x-richting als in y-richting gedaan. Hierbij is ervoor gekozen om slechts eenmaal het coördinaat (0,0) als startwaarde te gebruiken omdat deze waarde verder niets zegt over de kansen op een bepaalde spreiding. Tevens wordt ervoor gekozen om het maximaal aantal decimalen voor de cumulatieve kans met drie te begrenzen om zodoende een representatieve z-waarde behorende bij een kans van 100% te verkrijgen. Oneindig veel decimalen voor deze cumulatieve kans vertroebelt de resultaten namelijk en nauwkeuriger meetresultaten zijn er bovendien niet bepaald. Daarom wordt een afgeronde cumulatieve kans van 0,999 gelijk gesteld aan 1. Dit levert uiteindelijk de tabel 2 en 3 op.

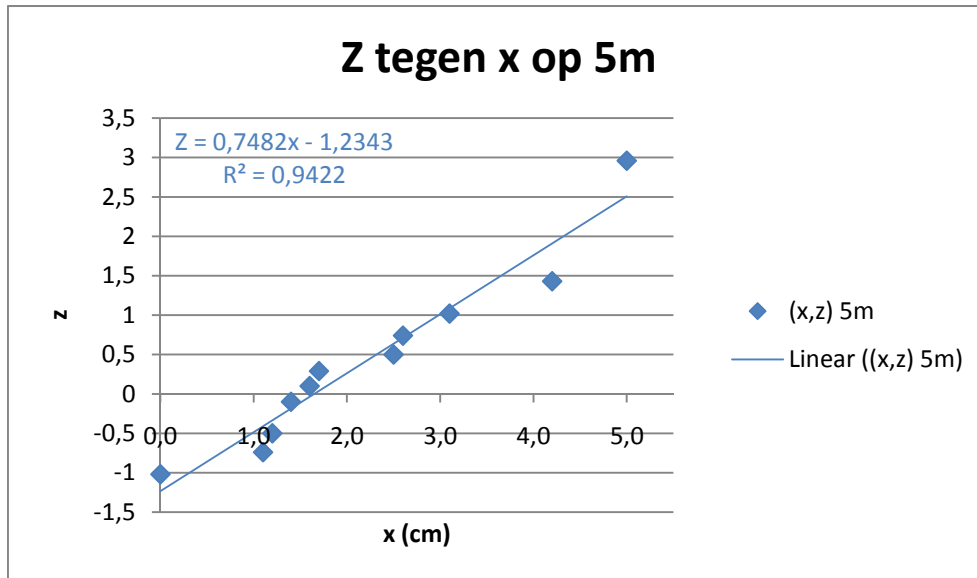
Z-waarden voor x op 5 m				
x	ni	ai	n/ai	z
0,0	2,0	2,0	0,154	-1,02
1,1	1,0	3,0	0,231	-0,74
1,2	1,0	4,0	0,308	-0,5
1,4	2,0	6,0	0,462	-0,1
1,6	1,0	7,0	0,538	0,1
1,7	1,0	8,0	0,615	0,29
2,5	1,0	9,0	0,692	0,5
2,6	1,0	10,0	0,769	0,74
3,1	1,0	11,0	0,846	1,02
4,2	1,0	12,0	0,923	1,43
5,0	1,0	13,0	1,000	2,96

Tabel 2, z-waarden voor spreiding in x-richting

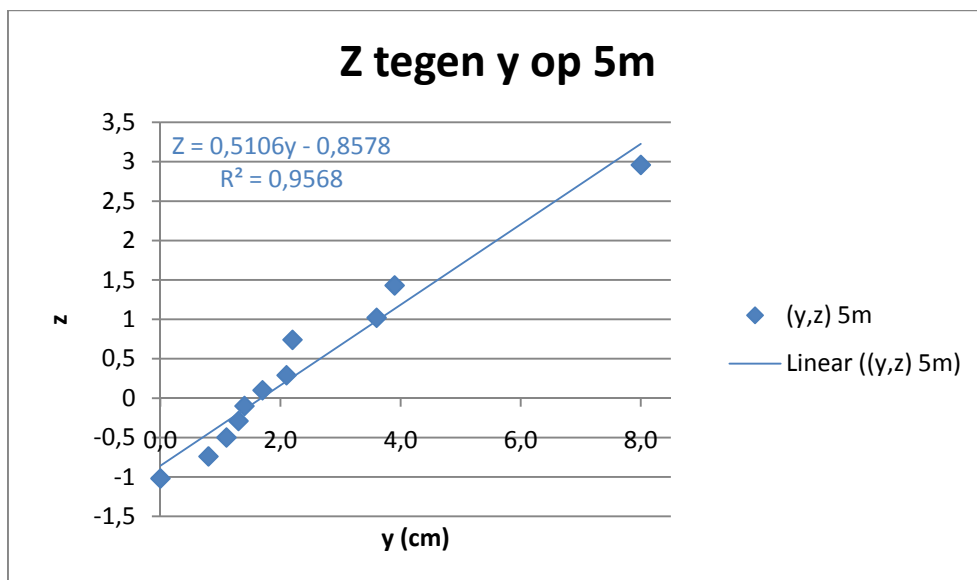
Z-waarden voor y op 5 m				
y	ni	Ai	ai/n	z
0,0	2	2,0	0,154	-1,02
0,8	1	3,0	0,231	-0,74
1,1	1	4,0	0,308	-0,5
1,3	1	5,0	0,385	-0,29
1,4	1	6,0	0,462	-0,1
1,7	1	7,0	0,538	0,1
2,1	1	8,0	0,615	0,29
2,2	2	10,0	0,769	0,74
3,6	1	11,0	0,846	1,02
3,9	1	12,0	0,923	1,43
8,0	1	13,0	1,000	2,96

Tabel 3, z-waarden voor spreiding in y-richting

Met deze z-waarden kan vervolgens de rechte van Henry opgesteld worden door ze tegen de bijbehorende x- dan wel y-waarden uit te zetten. Zodoende ontstaat een "puntenwolk". Wanneer door deze puntenwolk de best passende rechte getrokken wordt, kan een visuele controle van de normaalwet plaatsvinden. Als alle punten gesitueerd zijn in de nabijheid van de rechte, kan de normaalwet goed gebruikt worden. In de volgende figuren zijn voor zowel de spreiding in x- als in y-richting de rechten opgesteld.



Figuur 2, de rechte van Henry voor de spreiding in x-richting op 5m



Figuur 3, de rechte van Henry voor de spreiding in y-richting op 5m

De beide rechte lijnen hebben een  $R^2$ -waarde van ongeveer 95%. Dit geeft aan dat de rechten een vrij nauwkeurige representatie van de punten zijn en dus dat de normale wet van toepassing is op de spreiding. Wanneer in de formules voor z nu respectievelijk een x- en een y-waarde van 6,94 en 4,86 ingevuld wordt, kan de kans opgezocht worden in de tabel voor cumulatieve kansen bij de standaardnormale verdeling dat x en y kleiner of gelijk aan deze waarde zijn. Dit levert voor x een z-waarde van 3,96 met een bijbehorende kans van 100% en voor y een z-waarde van 1,62 met een bijbehorende kans van 95%. Vermenigvuldiging van beide kansen levert een kans van 95% op op drie impacten op de berekende oppervlakte van 33,7cm<sup>2</sup>.