

ONGERUBRICEERD

Lange Kleiweg 137
2288 GJ Rijswijk
Postbus 45
2280 AA Rijswijk
The Netherlands

www.tno.nl

T +31 88 866 80 00
F +31 88 866 69 49
infodesk@tno.nl

TNO-rapport**TNO 2015 M11093****Reconstructie van het schadebeeld door inslag van
hoog energetische deeltjes op Malaysia Airlines
vlucht MH17**

Datum	augustus 2015
Auteur(s)	-
Exemplaarnummer	-
Oplage	-
Aantal pagina's	41
Aantal bijlagen	2
Opdrachtgever	Onderzoeksraad voor Veiligheid (OVV)
Projectnaam	Fragmentuitwerking
Projectnummer	060.15020
Rubricering rapport	Ongerubriceerd
Gerubriceerd door	Ministerie van Defensie
Rubriceringsdatum	28 augustus 2015
	<i>Deze rubricering wijzigt niet</i>
Titel	Ongerubriceerd
Rapporttekst	Ongerubriceerd
Bijlagen A, B	Ongerubriceerd

Alle rechten voorbehouden.

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

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

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

© 2015 TNO

ONGERUBRICEERD

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Studieplan	4
2.1	Stap 1: visueel waarneembare schade	4
2.2	Stap 2: opzet simulatieomgeving	4
2.3	Stap 3: matching	4
3	Visueel waarneembare schade	5
3.1	Aangetroffen toestand van het vliegtuig	5
3.2	Fragmentschade inspectie	6
3.3	Blast schade inspectie	8
3.4	Analyse van het schadebeeld	10
4	Opzet van de eindballistische simulatie	12
4.1	Referentie assenstelsel	12
4.2	Naderingssnelheden	12
4.3	Gevechtslading	13
4.4	Vliegtuig	16
5	Schade matching	17
5.1	Variatie van gevechtslading positie en oriëntatie	17
5.2	Schade matching condities	18
5.3	Vergelijk van waargenomen en gesimuleerde fragmentschade	19
5.4	Mogelijkheid van een lichtere gevechtslading	22
6	Conclusies en aanbevelingen	24
7	Referenties	25
	Bijlagen	
A	Inslagpatroon van gevechtslading 9N314M	
B	Inslagpatroon van een 40 kg gevechtslading	

1 Inleiding

De Onderzoeksraad voor Veiligheid (OVV) onderzoekt het neerstorten van *Malaysia Airlines* vlucht MH17 op donderdag 17 juli 2014 in de regio Donetsk (Oekraïne). De Raad wil een zo helder mogelijk beeld geven over de oorzaak van de crash met de MH17. Een mogelijke oorzaak van de crash is dat de fatale schade aan het vliegtuig is veroorzaakt door de gevechtslading van een geleid wapen.

De OVV is in haar rapport van eerste bevindingen over de crash van vlucht MH17 tot de volgende vaststelling gekomen: “de schade aan de voorste sectie van het vliegtuig lijkt erop te wijzen dat het vliegtuig is doorboord door een groot aantal voorwerpen met hoge energie van buiten het vliegtuig” [1]. Een verschervende gevechtslading bezit dergelijke voorwerpen c.q. deeltjes. Het schadebeeld als gevolg van inslag van de deeltjes hangt af van de positie en oriëntatie van de gevechtslading ten opzichte van het vliegtuig op moment van detonatie, en van de inherente eigenschappen van de gevechtslading. De onderzoeksvraag is welke kenmerkende gevechtslading eigenschappen in staat zijn de waargenomen schade te veroorzaken. De OVV wil deze vraag beantwoorden met hulp van experts van het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (NLR), het Ministerie van Defensie en TNO.

TNO heeft een plan van aanpak voorgesteld voor de reconstructie van het schadebeeld, door een combinatie van schade-analyse aan het vliegtuig en simulatie van de fysieke, eindballistische prestaties van een gevechtslading [2]. OVV gaf daarop opdracht voor het analyseren van het schadebeeld en het schatten van het springpunt van de gevechtslading op basis van de teruggevonden delen van het vliegtuig [3]. De uitkomsten dragen het karakter van een *subject matter expert* oordeel.

Doel van dit onderzoek is het bepalen van het meest waarschijnlijke springpunt van een typische verschervende gevechtslading, teneinde de condities te vinden waarbij de waargenomen schade zo goed mogelijk gereproduceerd wordt. Uitgangspunt is een gevechtslading met *high explosive* materiaal en voorgevormde fragmenten.

Deze studie maakt gebruik van gerubriceerde gegevens zoals bedoeld in de Wet Bescherming Staatsgeheimen. De rapporttekst is geïnspecteerd en vrijgegeven voor publicatie door het Ministerie van Defensie.

Hoofdstuk 2 geeft het studieplan voor het onderzoek. Hoofdstuk 3 bevat de analyse van het schadebeeld na visuele inspectie van de vliegtuigdelen. Hoofdstuk 4 bevat de opzet van een eindballistische simulatie om het schadebeeld te reconstrueren. De schadebeelden van visuele inspectie en simulatie zijn met elkaar vergeleken in Hoofdstuk 5, teneinde het springpunt te schatten. Hoofdstuk 6 bevat de conclusies.

2 Studieplan

De werkzaamheden zijn gericht op het vinden van een *match* tussen het waargenomen schadebeeld en een berekend schadebeeld. Uitgangspunt is dat de schade wordt veroorzaakt door een gevechtslading met *high explosive* materiaal en voorgevormde fragmenten. De *high explosive* veroorzaakt een schokgolf, explosieve overdruk (*blast*) en geeft de fragmenten hun snelheid. De fragmenten en de *blast*, alleen of in combinatie, beschadigen het vliegtuig. Op voorhand is geen criterium gesteld voor de kwaliteit van de *match*; de resultaten van deze studie hebben het karakter van een *subject matter expert* oordeel.

2.1 Stap 1: visueel waarneembare schade

Vaststellen van het vermoede schadegebied als gevolg van fragmenten en *blast*.

- Inventarisatie van gaten welke toe te kennen zijn aan inslag van fragmenten.
- Relatieve oriëntatie van geperforeerde vliegtuigdelen.
- Inventarisatie van plastische vervorming en scheuren/breuken welke toe te kennen zijn aan *blast*.

2.2 Stap 2: opzet simulatieomgeving

Definities van condities voor eindballistische simulaties.

- Referentie assenstelsel.
- Snelheidsvectoren van vliegtuig en gevechtslading.
- Opbouw van de gevechtslading (geometrie, materiaal).
- Uitwerpcondities van individuele fragmenten (snelheid, richting).
- Opbouw van de vliegtuiggeometrie (contour).

2.3 Stap 3: matching

Overeen brengen van gesimuleerde schade met waargenomen schade.

- Variatie van fragment schade als gevolg van variatie in springpunt positie en oriëntatie van de gevechtslading. Startpunt voor de *matching* is de positie en oriëntatie van de gevechtslading zoals initieel bepaald door NLR.
- Vinden van de beste *match* op basis van fragmentschade.
- Verificatie met *blast* schade: ondersteunt de *match* of spreekt deze tegen.

3 Visueel waarneembare schade

Vier TNO medewerkers met deskundigheid op wapensysteem prestaties en wapenuitwerking op constructies hebben de visueel waarneembare schade opgenomen. De inspectie vond plaats op vliegbasis Gilze-Rijen in de periode februari 2015 – augustus 2015, aan de toen aanwezige vliegtuigdelen, en concentreerde zich op het voorste gedeelte van het vliegtuig.

3.1 Aangetroffen toestand van het vliegtuig

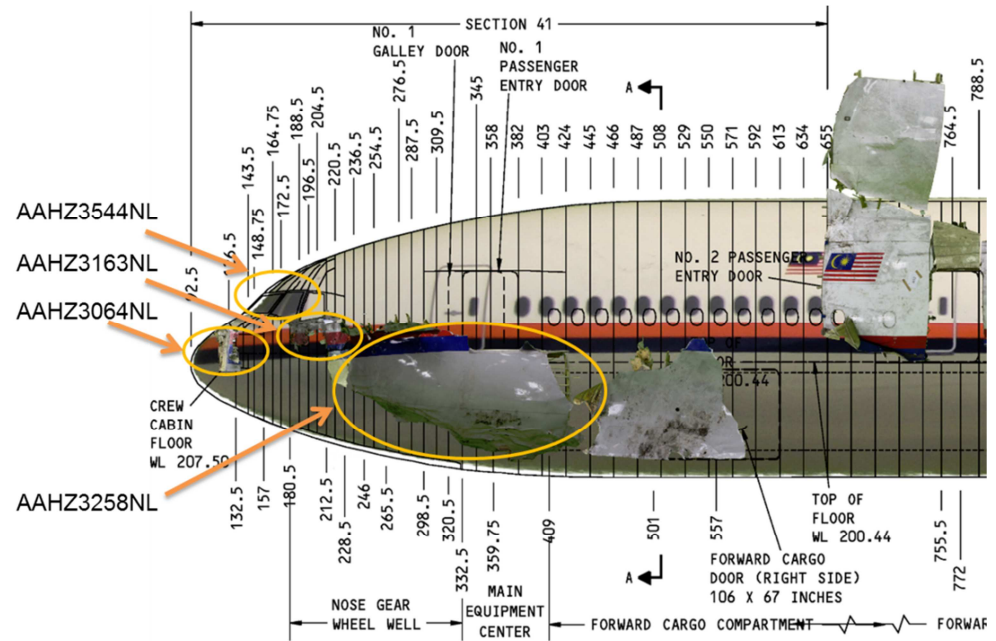
Volgens opgave OVV was ca. 20-25% van het vliegtuig geborgen (situatie februari 2015). De onderdelen worden bewaard op verschillende locaties op de vliegbasis. Vliegtuigdelen die behoren tot het voorste deel van de romp en de linker vleugel zijn samengebracht in een hangar en uitgelegd volgens het spantenplan van de Boeing 777-200ER (zie figuur 3.1). Hiermee wordt een indruk verkregen van de relatieve positie van de geborgen delen tot elkaar.



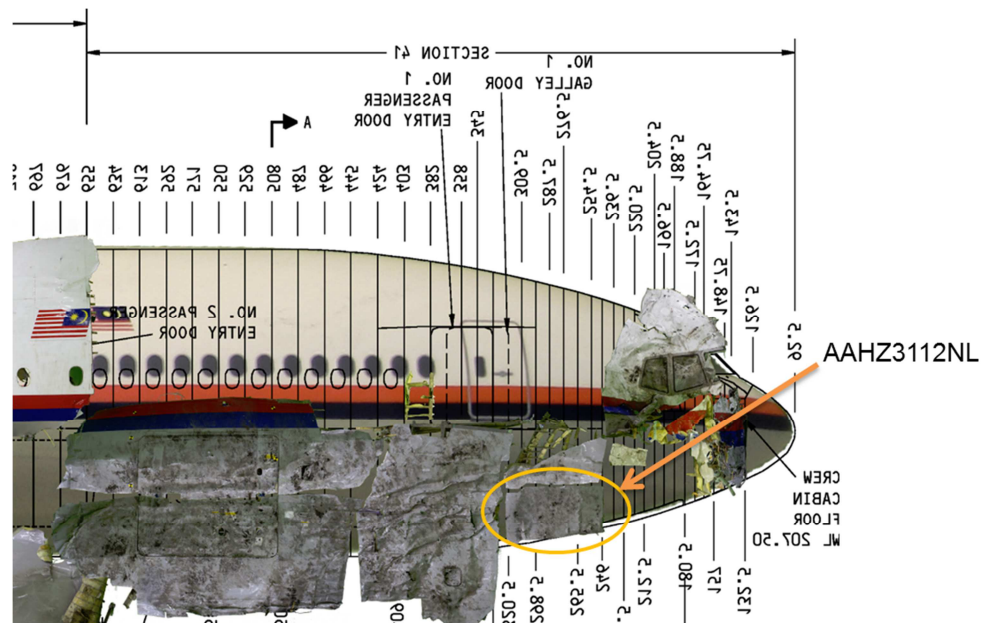
Figuur 3.1: Reconstructie van de MH17 aan de hand van geborgen delen van het vliegtuig (bron: TNO). Op de voorgrond is zichtbaar de cockpit en rechtsachter de inlaat van de linker motor. De relatieve hoogte van de verschillende delen is niet waarheidsgetrouw.

De TNO medewerkers hebben hun indrukken opgedaan aan de hand van de uitgelegde delen in de hangar. Het waarneembare schadegebied bleek onvolledig, omdat er grote delen ontbraken. Vele delen zijn namelijk nog niet geborgen.

Een ruimtelijke positionering van de geborgen delen is/wordt door een andere partij gerealiseerd in een computeromgeving. Onderdeel van dat werk is het categoriseren van de vliegtuigdelen met behulp van identificatienummers. In het vervolg zijn de identificatienummers bij de vliegtuigdelen vermeld. Het spantenplan biedt een verdere mogelijkheid om locaties te bepalen. De spanten worden aangeduid met *station* (STA) nummers (zie figuur 3.2 en figuur 3.3). Het verschil van twee STA nummers is de afstand tussen die twee stations in inches.



Figuur 3.2: Linker zijaanzicht van het cockpit gebied van de Boeing 777-200ER met STA nummering en positie van geborgen vliegtuigdelen (bron: OVV). De oranje omcirkelde panelen met identificatienummers worden besproken in paragraaf 3.2.



Figuur 3.3: Rechter zijaanzicht van het cockpit gebied van de Boeing 777-200ER met gespiegelde STA nummering en positie van geborgen vliegtuigdelen (bron: OVV). Het oranje omcirkelde paneel met identificatienummer wordt besproken in paragraaf 3.3.

3.2 Fragment schade inspectie

Fragment schade is afhankelijk van de afstand tot de gevechtslading, de oriëntatie van het vliegtuig ten opzichte van de fragmentenwolk en de inslagsnelheid van de fragmenten. De inslagsnelheid wordt bepaald door de vectoriële som van de gevechtslading snelheid, de uitwerpsnelheid van de fragmenten en de snelheid van

het vliegtuig. Fragmenten ondervinden afremming door de atmosfeer, perforeren de vliegtuigconstructie en verliezen kinetische energie met elke volgende perforatie.

3.2.1 *Waarneembaarheid van fragmentschade*

Fragmenten van een gevechtslading worden in een bepaalde voorkeursrichting uitgeworpen (zie paragraaf 4.3), zodat perforatieschade als gevolg van fragmenten beperkt blijft tot bepaalde gebieden op het vliegtuig. Gezocht wordt naar een “band” van perforaties over de vliegtuigcontour.

Verschervende gevechtsladingen bedoeld voor het uitschakelen van luchtdoelen zijn, voor zover bekend, uitsluitend voorzien van voorgevormde fragmenten. Dat houdt in dat de fragmentvorm vast ligt en dat fragmenten op een bepaalde manier op de omhulling van de *high explosive* lading zijn uitgelegd. Die omhulling is in de regel van metaal en niet voorgevormd, zodat er ook altijd een zeker (klein) aandeel natuurlijk gevormde fragmenten met een willekeurige fragmentvorm voorkomen. Uitworp van voorgevormde fragmenten resulteert in een kenmerkend gatenpatroon in het vliegtuig.

3.2.2 *Waargenomen fragmentschade*

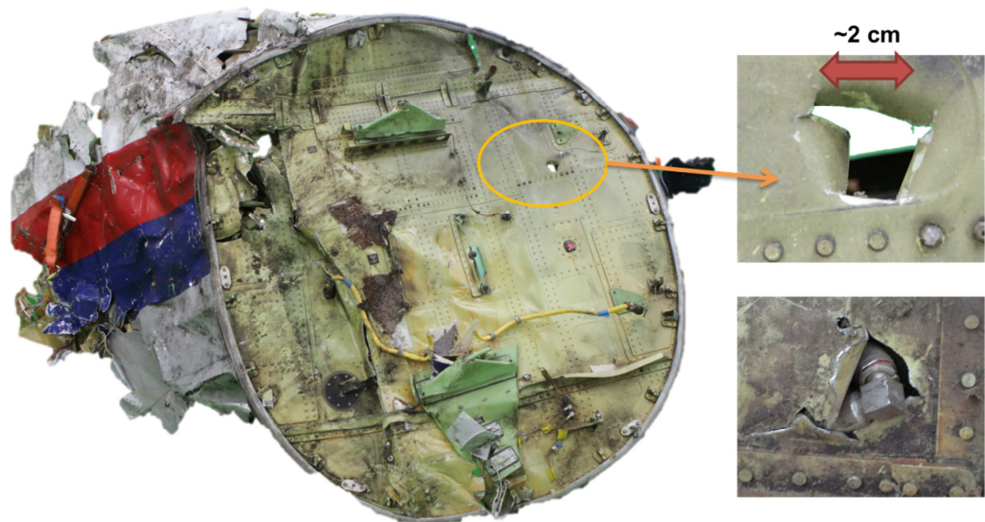
Figuren 3.4, 3.5, en 3.6 beschrijven waargenomen fragmentschade op de vliegtuigdelen. Daarnaast is ook fragmentschade gezien in een paneel van het cockpit dak. De fragmentschade is plaatselijk. Op het geborgen linker paneel lopend van ca. STA 220 tot ca. STA 410 (zie figuur 3.2) en op verder weg gelegen panelen (hogere STA nummers) is geen fragmentschade aangetroffen. Het cockpit schot AAHZ3064NL (zie figuur 3.4) op STA 132.5 lijkt de voorste begrenzing van de fragmentschade te zijn.



Figuur 3.4: Cockpit paneel links AAHZ3163NL met uitvergroot detail (bron: OVV). De perforatieschade heeft een regelmatig patroon van grotere en kleinere gaten. De huidbeplating is verder beschadigd door *pitting*, wat kan zijn veroorzaakt door de inslag van vele kleine hete deeltjes, zoals kruitresten en gesmolten metaal. De *pitting* schade is plaatselijk; naburige panelen hebben geen schade door *pitting*.



Figuur 3.5: Raamstijl links midden AAHZ3544NL met uitvergroot detail (bron: TNO). De perforatie schade heeft een regelmatig patroon van grotere en kleinere gaten. Dit wijst op een gevechtsslading met verschillende fragmentvormen.



Figuur 3.6: Cockpit schot (scheiding met radome) AAHZ3064NL met detail rechtsboven (bron: OVV). Er is geen perforatieschade aangetroffen die met voldoende zekerheid van fragmentinslag afkomstig is. De perforatie in de oranje omcirkeling kan ook het gevolg zijn van andere vliegtuigdelen die door de beplating heen zijn gedrukt. Zie ter illustratie het detail rechtsonder, aangetroffen op een ander paneel (bron: TNO).

3.3 Blast schade inspectie

Blastschade is sterk afhankelijk van de afstand tot de gevechtsslading, de oriëntatie van het vliegtuigdeel (ontvangt invallende of gereflecteerde blast) en de snelheid van het vliegtuig. *Blast* heeft de volgende uitwerking op vliegtuigconstructies, in oplopende *blast* intensiteit:

- Indrukking van huidpanelen tussen spanten en verstijvers waarbij de huid niet scheurt, en spanten en verstijvers niet vervormen (*dishing*).
- Vervorming van spanten en verstijvers; loslating van huidpanelen en verbindingen.
- Scheuren van huidpanelen en verstijvers.

3.3.1 Waarneembaarheid van blast schade

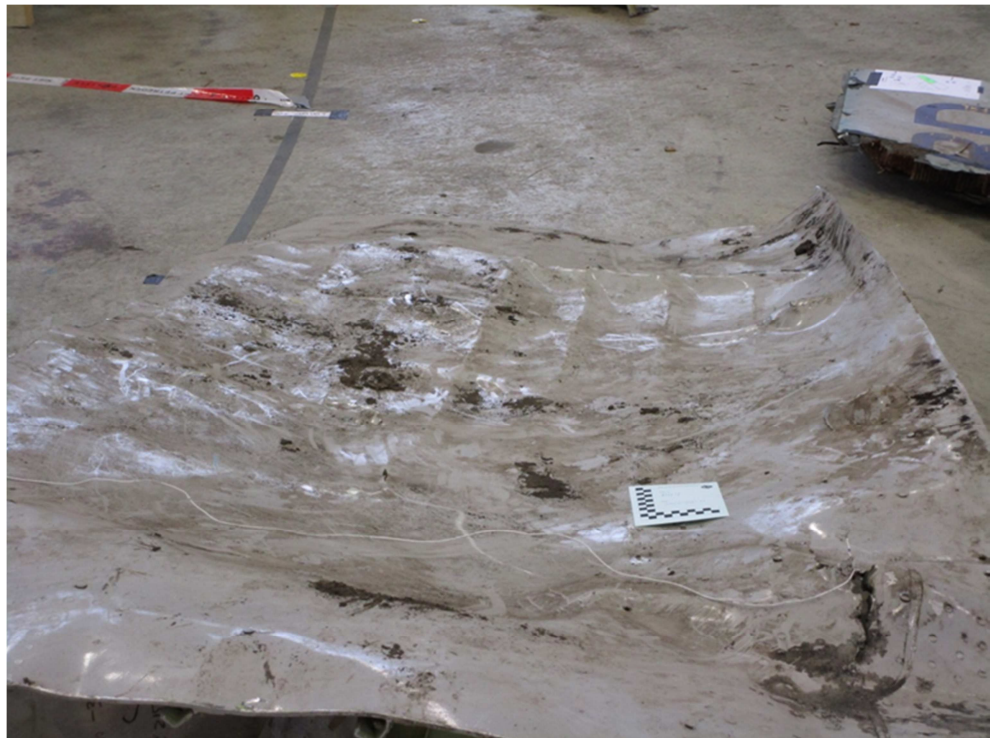
Blast schade kan verhuld zijn door perforatieschade, schade als gevolg van het opbreken van het vliegtuig en de inslag op de grond. Van alle *blast*-typische schade is *dishing* schade in dit geval het best visueel waarneembaar.

Indrukking van huidpanelen kan ook veroorzaakt worden door het uitbuigen van vliegtuigdelen tijdens het opbreken en inslag van vliegtuigdelen op de grond. Verschillende indrukkingen zijn gevonden waarvan niet met voldoende zekerheid kon worden vastgesteld dat het *dishing* betreft.

3.3.2 Waargenomen blast schade

In het cockpit paneel links (figuur 3.4) is de vliegtuighuid in het meer naar achter gelegen gedeelte tussen de verticale verstijvingen gedrukt. Deze schade kan veroorzaakt zijn door de overdruk als gevolg van *blast*.

Figuur 3.7 toont een paneel van de romp rechts van het neuswielonderstel, tussen STA 250 en STA 330. Dit paneel heeft *dishing* schade. Een naburig deel van de neuswieldeur (STA 184) had geen waarneembare *blast* schade. Echter, dit deel van de neuswieldeur is gemaakt van een honingraat constructie die zeer goed bestand is tegen de effecten van *blast*.



Figuur 3.7: Paneel AAHZ3112NL met zichtbare *dishing* schade (bron: TNO). Het paneel is daarnaast ook beschadigd door het opbreken van het vliegtuig en de inslag op de grond.

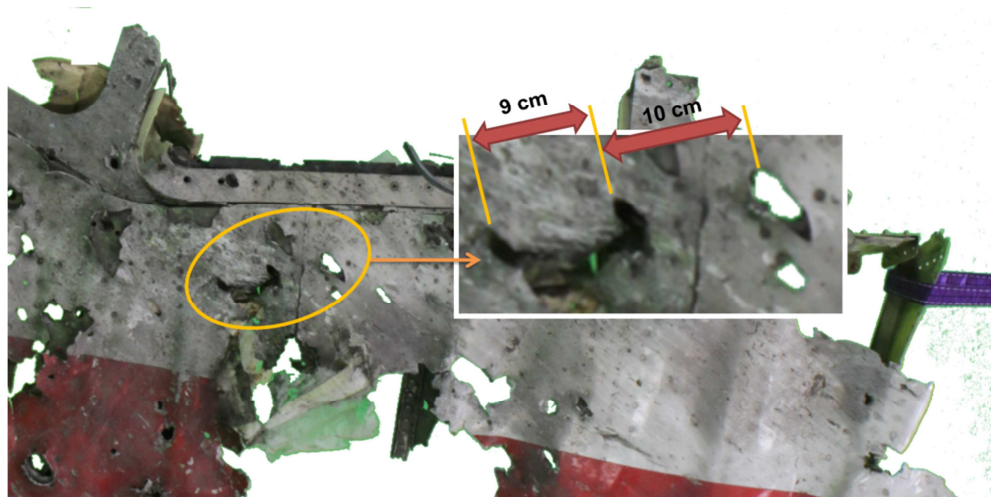
Het romphuiddeel AAHZ3258NL aan de linkerzijde tussen STA 230 en STA 420 (zie figuur 3.8) heeft geen waarneembare *blast* schade. Dit paneel stelt een grens aan het *blast* schade gebied. Het lager gelegen deel van dit paneel is sterk vervormd, waarschijnlijk door opbreken van het vliegtuig en de inslag op de grond. Ook het cockpit schot (figuur 3.6) had geen waarneembare *blast* schade.



Figuur 3.8: Paneel AAHZ3258NL zonder waarneembare *blast* schade (bron: TNO). Dit paneel stelt een grens aan het *blast* schadegebied. Het paneel is wel beschadigd door het opbreken van het vliegtuig en de inslag op de grond.

3.4 Analyse van het schadebeeld

De waargenomen perforatieschade aan paneel AAHZ3163NL en raamstijl AAHZ3544NL wijst op een gevechtslading met voorgevormde fragmenten. De relatieve afstand tussen twee fragmentgaten (de “steek”) is een aanwijzing voor de afstand tussen gevechtslading en vliegtuig. De steek is in hoofdstuk 5 gebruikt bij het *matchen* van het waargenomen en gesimuleerde schadebeeld. Figuur 3.9 toont een uitvergroting van paneel AAHZ3163NL. Uit het gatenpatroon is een steek tussen twee fragmenten van het zelfde type afgeleid van ca. 9-10 cm.



Figuur 3.9: Uitvergroting van paneel AAHZ3163NL waarop de afstand tussen soortgelijke gaten is bepaald. Zie detail rechts: de gekozen gaten zijn langwerpig met een typische insnoering in het midden (bron: OVv).

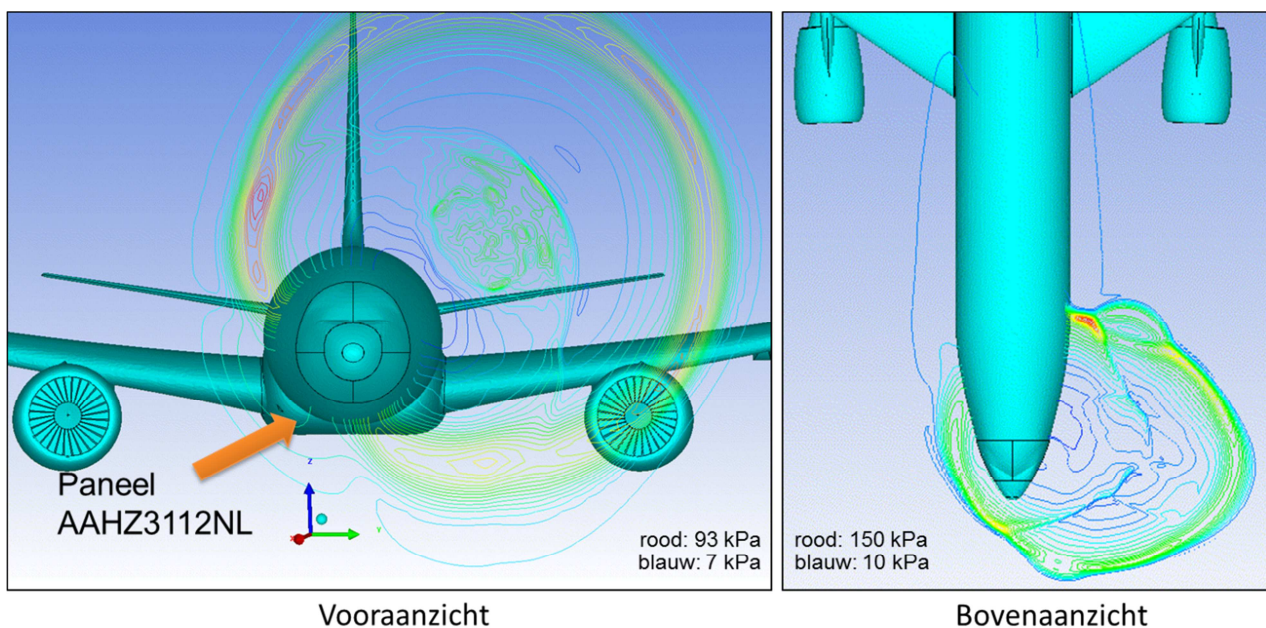
Er zijn plaatselijk gaten waargenomen, op regelmatige afstand van elkaar, met verschillende gatvormen en gatoppervlaktes. Dit wijst op een gevechtsslading met verschillende, specifieke fragmentvormen.

Paneel AAHZ3163NL is beschadigd door *pitting*. De *pitting* schade is plaatselijk en kan het gevolg zijn van hete deeltjes van een nabij detonerende gevechtsslading.

Het waargenomen gatenpatroon kan niet veroorzaakt zijn door volkaliber projectielen uit een middenkaliber kanonsysteem, zoals van een boordkanon of van luchtafweergeschut. De steek tussen de gaten is daarvoor te klein, de gatoppervlaktes zijn te klein en de gatoppervlaktes variëren te veel.

Paneel AAHZ3112NL en paneel AAHZ3163NL hebben visueel waarneembare schade die vermoedelijk het gevolg is van *blast* werking. Schade aan de andere geïnspecteerde panelen kan niet met voldoende zekerheid aan *blast* toegeschreven worden. Paneel AAHZ3258NL is van de panelen die géén waarneembare *blast* schade vertonen het paneel dat zich het dichtst bij de detonatie bevond.

Blast breidt zich in eerste instantie sferisch uit na detonatie van een gevechtsslading. Echter, *blast* stroomt om obstakels heen en belast dan ook de achterzijde van dat obstakel. Dit maakt het mogelijk dat *blast* schade aan de rechterzijde van het vliegtuig kan optreden als gevolg van een detonatie aan de linkerzijde. Dit fenomeen is geïllustreerd in figuur 3.10.



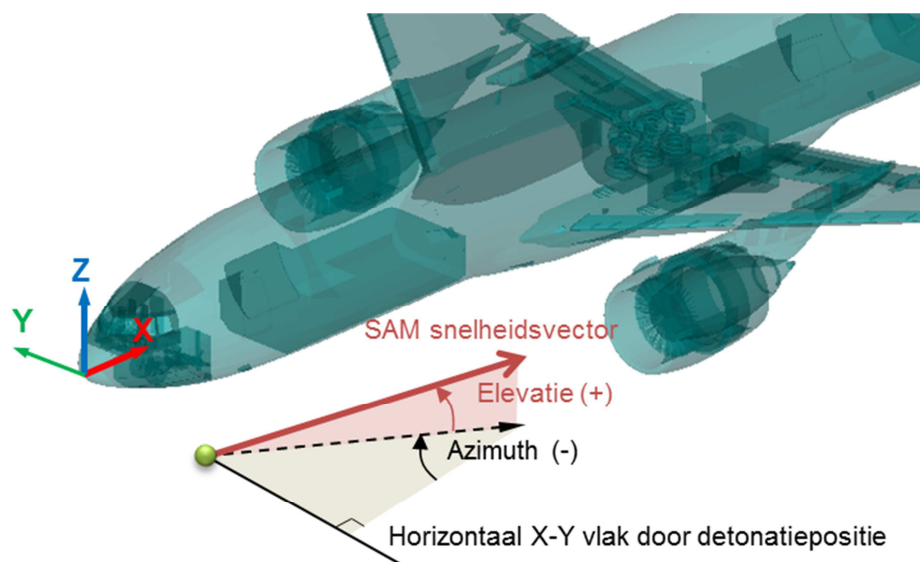
Figuur 3.10: Vooraanzicht en bovenaanzicht met een detonerende gevechtsslading aan de linkerzijde van het vliegtuig (7,2 ms na detonatie) [9]. *Blast* (gekleurde lijnen) vanuit het detonatiepunt bereikt ook het paneel aan de rechterzijde van het vliegtuig.

4 Opzet van de eindballistische simulatie

De afdeling *Weapon Systems* van TNO is gespecialiseerd in het bepalen van de werking en effectiviteit van alle soorten wapensystemen. Voor technische adviezen op het gebied van wapen-doel interacties maakt *Weapon Systems* vaak gebruik van een eindballistische simulatie. De eindballistische simulatie is een krachtig hulpmiddel voor reconstructie van het schadebeeld. Het maakt het verloop van de confrontatie tussen wapen en doel expliciet. De simulatie is opgebouwd uit de elementen die in de volgende paragrafen worden besproken.

4.1 Referentie assenstelsel

De oriëntaties van het vliegtuig en de gevechtslading op het moment van detonatie van de gevechtslading zijn vastgelegd in een ruimtelijk assenstelsel dat dienst doet als referentie (zie figuur 4.1).

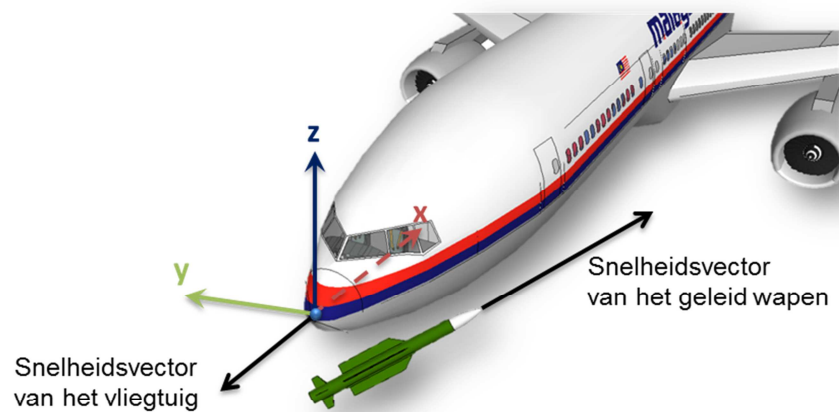


Figuur 4.1: Rechtsdraaiend assenstelsel voor het bepalen van de positie van het geometrische midden van de gevechtslading en de standhoeken (oriëntatie) in relatie tot het vliegtuig. De Z-as valt samen met STA 92.5 en de X-as valt samen met WL 198. De figuur toont de positieve richtingen van het assenstelsel en de standhoeken.

Het referentie assenstelsel helpt bij de communicatie over het vermoede springpunt van de gevechtslading. NLR en TNO houden hetzelfde referentie assenstelsel aan. Indien gewenst is conversie naar een ander assenstelsel altijd mogelijk. Dit heeft geen invloed op de uitkomst van de eindballistische simulatie.

4.2 Naderingssnelheden

Het vliegtuig en de gevechtslading hebben elkaar volgens bepaalde vliegbanen benaderd. Voor de eindballistische simulatie is alleen de situatie vlak voor detonatie van de gevechtslading van belang (zie figuur 4.2).



Figuur 4.2: Positie en snelheid van vliegtuig en geleid wapen (drager van de gevechtslading) in het referentie assenstelsel. Merk op dat de positie van de gevechtslading een variabele is in de eindballistische simulatie. Met andere woorden: deze figuur dient ter illustratie en geeft niet de geschatte positie van de gevechtslading.

Relevante snelheden zijn verkregen van het NLR en OVV (zie tabel 4.1). Een eventuele rolhoek, standhoek en sliphoek van het vliegtuig zijn door NLR verwaarloosbaar klein verondersteld [7]. NLR heeft een waarschijnlijke eindsnelheid van het geleid wapen bepaald middels een *fly out* simulatie [7].

Tabel 4.1: Snelheden op het moment van detonatie van de gevechtslading. Voor de eindsnelheid van het geleid wapen zijn twee snelheden in beschouwing genomen.

Snelheid	Waarde	Waarde (SI eenheden)
Vliegtuig (-X richting)	494 kts <i>ground speed</i> [1]	254 m/s
Geleid wapen (opgave NLR)		~ 600 m/s*
Geleid wapen		730 m/s

* De exacte waarde is niet vrijgegeven voor publicatie.

4.3 Gevechtslading

Uitgangspunt voor de eindballistische simulatie is een gevechtslading met voorgevormde fragmenten. In overleg met OVV, NLR en Defensie is de gevechtslading 9N314M van *Surface to Air Missile* (SAM) type 9M38M1 gemodelleerd.

4.3.1 De fysieke gevechtslading

Van gevechtslading type 9N314M is uit open bron bekend dat deze ca. 70 kg weegt en drie verschillende fragmentvormen bevat, aangeduid als *bowtie*, *filler* en *square* (zie figuur 4.3) [4]. Om de gevechtslading met voldoende detail te modelleren is gebruik gemaakt van aanvullende gegevens uit nationale bronnen.

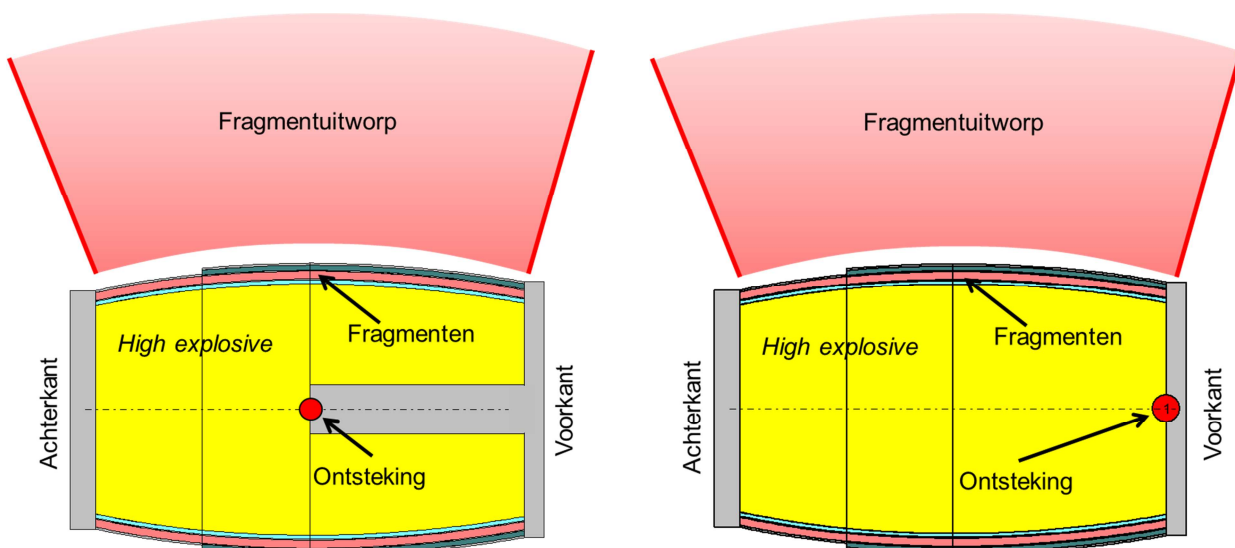
In het verloop van de studie gaf de Russische fabrikant van SAM type 9M38M1, JSC Almaz Antey (Алмаз-Антей), meer inzage in de werking van gevechtslading 9N314M [5]. Ook deze gegevens zijn gebruikt in de studie.



Figuur 4.3: Aanzicht van gevechtslading 9N314M (cyrillische H is gelijk aan N) met onder de verschillende fragmentvormen die deze bevat (*bowtie*, *filler*, *square*). Bron: [5].

4.3.2 Implementaties van de gevechtslading (ontwerpen)

Het gevechtsladingsmodel is geïmplementeerd in Split-X software om de uitwerpsnelheden en –hoeken van de fragmenten te bepalen. De gebruikte bronnen zijn niet eensluidend over de belangrijkste prestatiekenmerken van de gevechtslading. Daarom zijn drie verschillende implementaties (ontwerpen) van de zelfde gevechtslading doorgerekend. Zie figuur 4.4 voor een overzicht.



Figuur 4.4: Geometrische opbouw (doorsnede in langsrichting) van gevechtslading 9N314M. Links: ontwerp I. Rechts: ontwerp II en ontwerp III. Het gele gebied is het *high explosive* materiaal. De voorgevormde fragmenten bevinden zich op de buitenomtrek van de gevechtslading in twee lagen. De eerste laag (rood) bedekt de volledige buitenomtrek (*bowtie* en *filler*), de tweede laag (grijs) bedekt slechts een gedeelte (*square*). Het rode vlak geeft een indicatie van het gebied waarin de fragmenten worden uitgeworpen bij een statische detonatie.

Tabel 4.2 geeft een samenvatting van de belangrijkste prestatieverschillen tussen de ontwerpen. Ontwerp II maakt gebruik van de gespecificeerde fragmenten en ontsteekpositie volgens Almaz Antey [5]. De bijbehorende uitwerphoeken en fragmentsnelheden van ontwerp II zijn bepaald door TNO met de Split-X software v.5.3.1.0. Ontwerp III adopteert alle gevechtslading prestaties volgens Almaz Antey zonder enige bewerking.

Tabel 4.2: Prestaties van drie ontwerpen van gevechtslading 9N314M. Ontwerp I is gebaseerd op nationale bronnen, Ontwerp III is gebaseerd op informatie van Almaz Antey [5]. Ontwerp II gebruikt het geometrisch ontwerp volgens Almaz Antey, maar de bijbehorende uitwerphoeken en fragmentsnelheden zijn berekend door TNO.

Kenmerk	Ontwerp I	Ontwerp II	Ontwerp III
Aantal voorgevormde fragmenten	(niet beschikbaar)*	1825 <i>bowtie</i> 1825 <i>filler</i> 4093 <i>square</i>	1870 <i>bowtie</i> 1870 <i>filler</i> 4100 <i>square</i>
Minimale uitwerphoek [°]**	72	76	68
Maximale uitwerphoek [°]**	109	112	126
Laagste fragmentsnelheid [m/s]	~1700	~1300	~1110
Hoogste fragmentsnelheid [m/s]	~2300	~2520	~2460
Ontsteekpositie	Midden	Voor	Voor

* Dit kenmerk is niet vrijgegeven voor publicatie.

** Nul graden in langsrichting naar voren wijzend.

TNO beoordeelt ontwerp II als het meest realistisch voor het doel van dit onderzoek vanwege de fysische basis van het ontwerp. Het belangrijkste verschil met ontwerp III is het kleinere hoekbereik van de fragmentuitworp. Merk op dat het gevechtslading model uitsluitend voorgevormde fragmenten van de gevechtslading bevat. Andere fragmenten die ontstaan bij het uiteen vallen van het SAM zijn niet in het model opgenomen.

4.3.3 Gevechtslading modelleren in Split-X

De Split-X software gebruikt in deze studie is commercieel verkrijgbaar. De aanbieder Numerics vermeldt op haar website dat Split-X is gebaseerd op analytische procedures and engineering benaderingen, die gekalibreerd zijn met behulp van experimentele resultaten [10]. Split-X is gevalideerd (dat wil zeggen modelresultaten komen overeen met testresultaten) voor de fragmentuitwerphoeken en bijbehorende fragmentsnelheden van gevechtsladingen met zowel natuurlijke gevormde fragmenten als voorgevormde fragmenten.

TNO beoordeelt bij aanvang van elke studie of software geschikt is voor het voldoende waarheidsgetrouw berekenen van resultaten. Split-X is door TNO gevalideerd voor verschillende verschervende munitiesoorten en gevechtsladingen. Op die basis is Split-X geschikt bevonden voor gebruik in deze studie. TNO gebruikt Split-X en andere modellen geregeld voor studieopdrachten van het Nederlandse ministerie van Defensie en andere opdrachtgevers. Vanwege geldende rubriceringsrichtlijnen kunnen details over het TNO-interne validatieproces echter niet vrijgegeven worden.

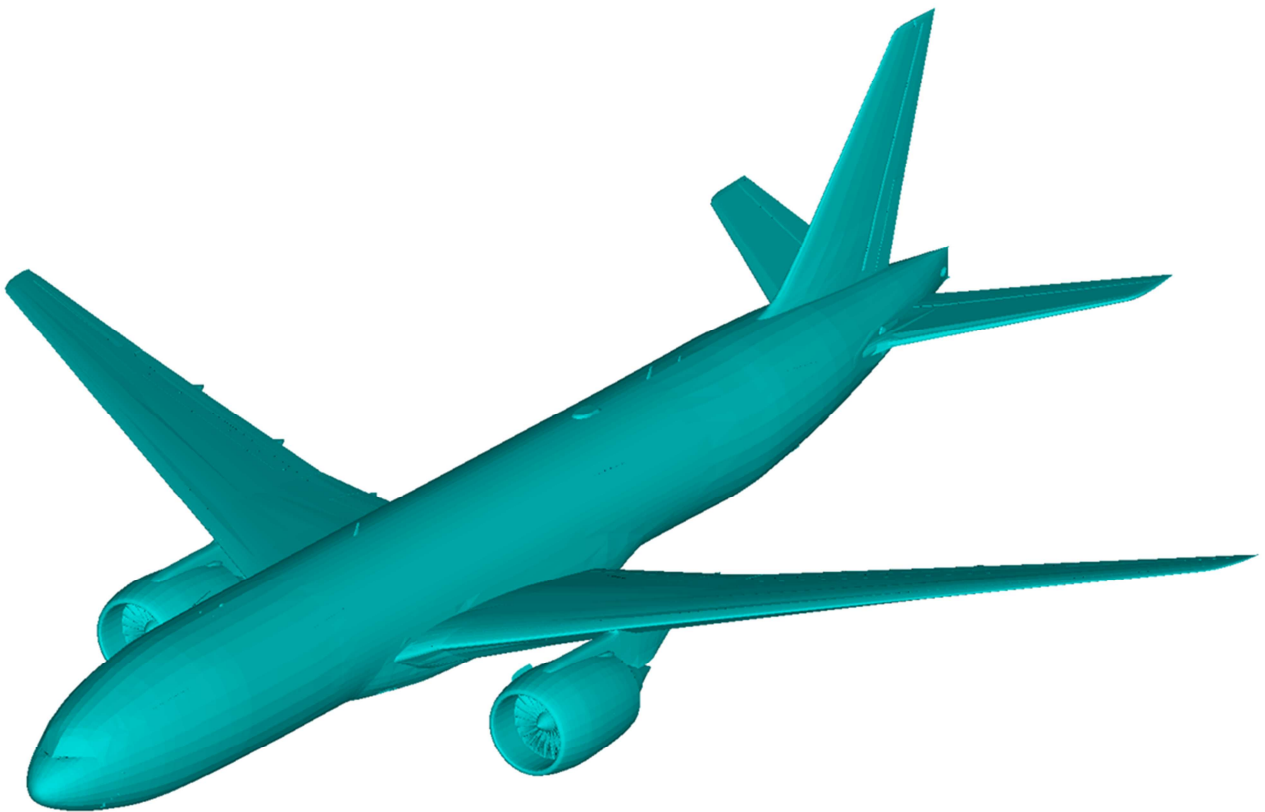
4.3.4 *Simulatie van de vlucht van de gevechtladingsfragmenten*

De fragmenten bewegen in een rechte lijn vanaf het lanceerpunt. Het lanceerpunt is een positie op de gevechtslading met een bepaalde lanceerhoek en -snelheid. De eindballistische simulatie berekent banen van elk individueel fragment. De eindige dimensies van de gevechtslading worden daarbij meegenomen (geen puntbron benadering).

De ondervonden luchtweerstand op vlieghoogte is meegenomen in de simulatie. De invloed van luchtweerstand op de resultaten is klein.

4.4 **Vliegtuig**

Een waarheidsgetrouwe contour van het vliegtuig is van belang voor het bepalen van de inslaglocaties van de individuele fragmenten. De hoogste nauwkeurigheid wordt verkregen uit bouwtekeningen van vliegtuigfabrikant Boeing. In deze studie is gewerkt met een benadering van de contour die op internet verkrijgbaar is (zie figuur 4.5). Deze contour is door TNO experts beoordeeld als voldoende nauwkeurig voor de doelstelling van de studie.



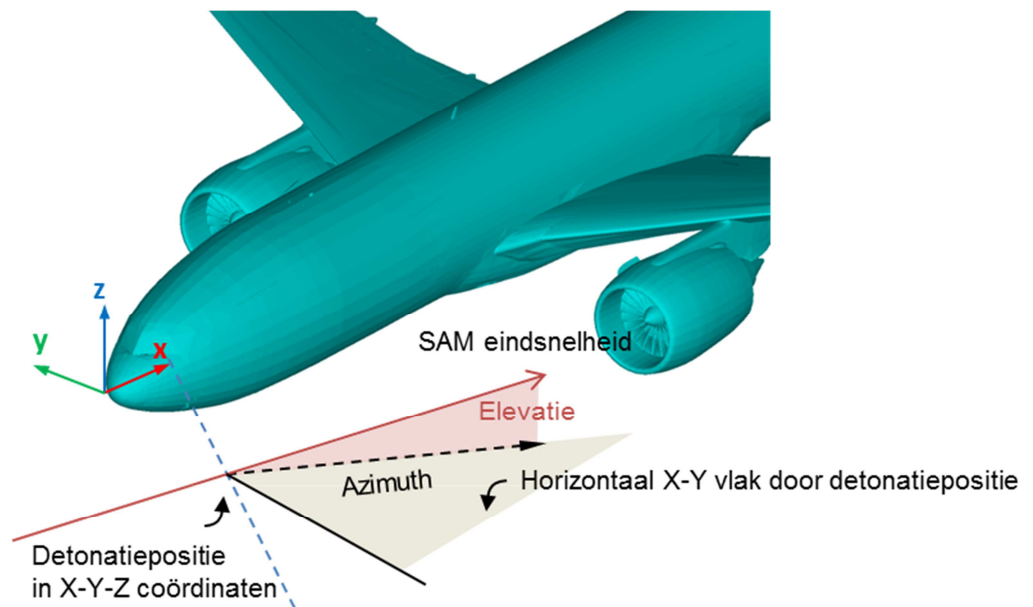
Figuur 4.5: Contour van de Boeing 777-200ER volgens turbosquid.com [6].

5 Schade matching

In dit hoofdstuk zijn het waargenomen schadebeeld en het gesimuleerde schadebeeld met elkaar vergeleken. De eindballistische simulatie maakt het mogelijk positie en oriëntatie van de gevechtslading ten opzichte van het vliegtuig net zo lang te variëren totdat de beide fragmentschades zo goed mogelijk overeen komen.

5.1 Variatie van gevechtslading positie en oriëntatie

Figuur 5.1 geeft een overzicht van de simulatiestrategie. De simulatie geeft een inslagpatroon van de fragmenten op de contour van het vliegtuig. Startpunt van de eindballistische simulatie is de gevechtslading positie (X, Y, Z) en oriëntatie (azimuth, elevatie) volgens initiële opgave NLR [7].



Figuur 5.1: Variatie van de gevechtslading positie en oriëntatie. Startpunt voor de simulaties is de initiële positie en oriëntatie volgens opgave NLR. De blauwe stippellijn is een hulp om de absolute afstand tussen detonatiepunt en vliegtuigcontour te bepalen.

De eindballistische simulatie is als volgt uitgevoerd voor elk van de drie gevechtslading ontwerpen:

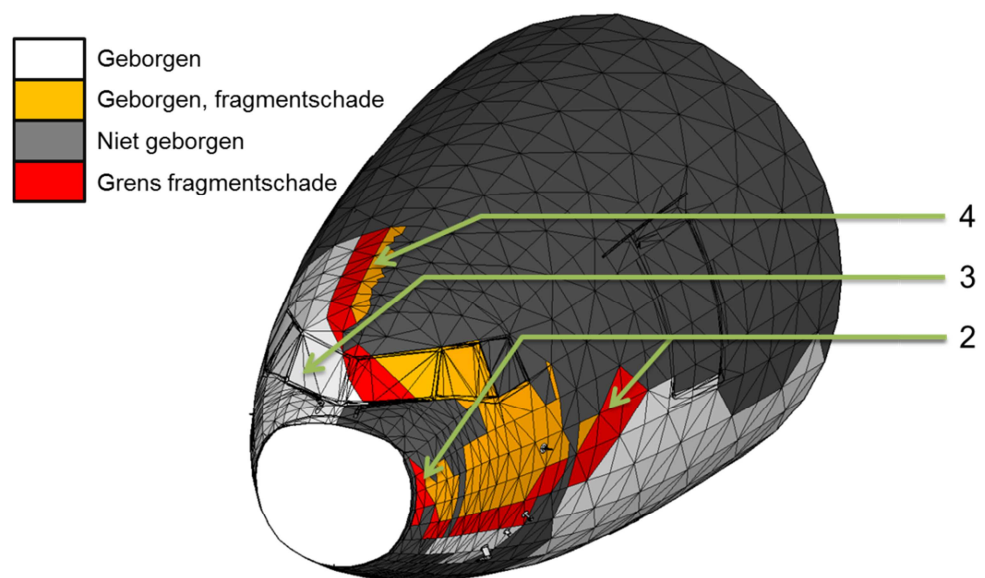
1. Bepaling van het fragmentinslagpatroon bij positie en oriëntatie volgens initiële opgave NLR.
2. Positievaryatie van de gevechtslading langs de SAM vliegrichting; bepaling van de invloed op het fragmentinslagpatroon.
3. Positievaryatie van de gevechtslading loodrecht op de SAM vliegrichting; bepaling van de invloed op het fragmentinslagpatroon.
4. Bijstelling van oorspronkelijke gevechtslading positie (*matching*).
5. Bijstelling van de oriëntatie voor de bijgestelde gevechtslading positie (*matching*).

5.2 Schade matching condities

Uit het waargenomen schadebeeld is, in overleg tussen experts van TNO, NLR en de OVV, een aantal condities gesteld die dienen voor het beoordelen van de kwaliteit van een *match* met een gesimuleerd schadebeeld. De condities zijn bewust kwalitatief (zonder getalwaarden) opgeschreven om de experts enige ruimte te gunnen bij de uiteindelijke oordeelsvorming (zie figuur 5.2). Een goede *match* vereist echter dat aan alle condities gelijktijdig wordt voldaan.

De gestelde condities aan het gesimuleerde schadebeeld zijn:

1. Perforatieschade wordt uitsluitend veroorzaakt door voorgevormde fragmenten van de gevechtslading. Schade door inslag van andere delen van het SAM blijven buiten beschouwing.
2. Er is fragmentschade aan de cockpitwand linkerzijde, tussen het schot (scheiding met *radome*) AAHZ3064NL en vóór de eerste toegangsdeur links. In het gebied tussen het meest links gelegen cockpitraam en de toegangsdeur slaan fragmenten schuin in ("*grazing*"). Inslagschade stopt ter hoogte van de cockpitvloer.
3. Er is verwaarloosbare fragmentschade aan de cockpitwand rechterzijde, tussen de vloer van de cockpit en enige afstand voorbij de cockpitramen rechts.
4. Er zijn schuine inslagen ("*grazing*") van fragmenten langs het cockpit dak volgens een radiaal patroon.
5. Er is verwaarloosbare fragmentschade aan de rechtervleugel.
6. Er is verwaarloosbare fragmentschade (afkomstig van gevechtslading fragmenten) aan de linker motorgondel.



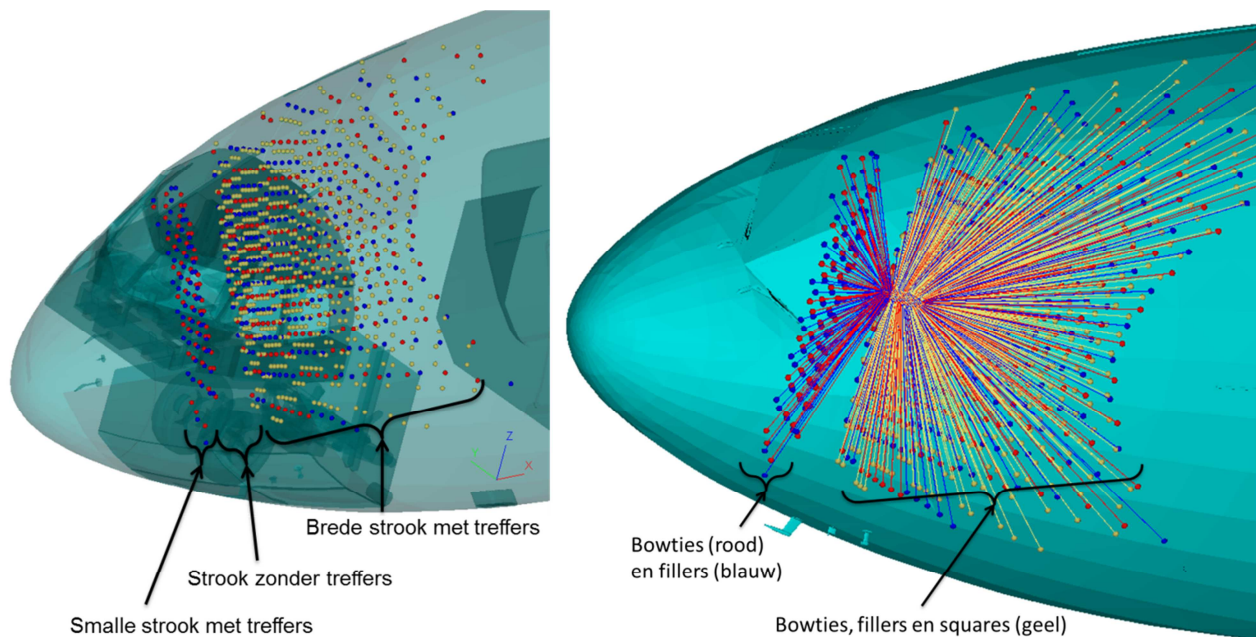
Figuur 5.2: Begrenzing van het waargenomen schade veroorzaakt door de inslag van gevechtslading fragmenten in het gebied rondom de cockpit. De nummering komt overeen met de nummering van de schade matching condities.

5.3 Vergelijk van waargenomen en gesimuleerde fragmentschade

Voor de *matching* is gebruik gemaakt van de waargenomen begrenzing van het gebied met fragmentschade, de daaruit afgeleide matching condities en de waargenomen afstand (steek) tussen individuele fragmenten (zie hoofdstuk 2).

5.3.1 Verdeling van fragmenten binnen het schadegebied

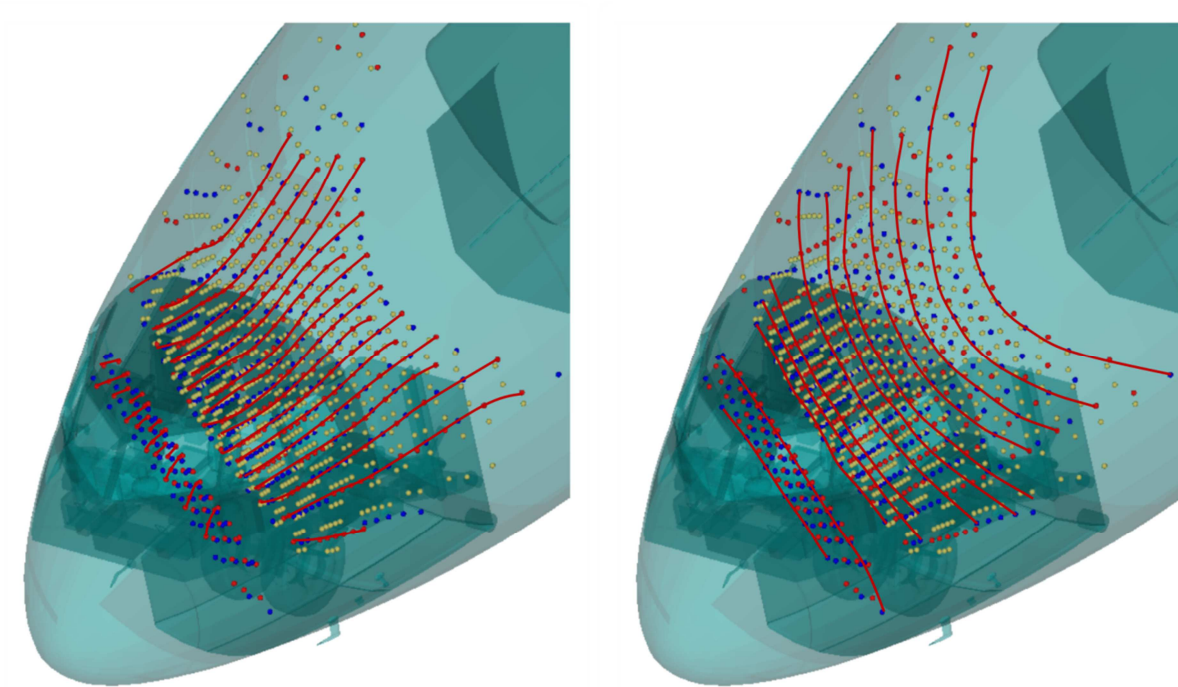
De simulatie van de uitworp van individuele fragmenten vereist enige toelichting. De figuren 4.3 en 4.4 tonen een abrupte overgang in de dikte van de buitenomtrek van de gevechtsslading. Door het gebruikte model voor de gevechtsslading ontstaat een abrupte overgang in het verloop van de fragmentsnelheid over de contour van het vliegtuig. Het gevolg voor het fragmentschadegebied is te zien in figuur 5.3.



Figuur 5.3: Gesimuleerde fragmentinslag op de contour van het vliegtuig (links het inslagpatroon en rechts de fragmentbanen). De inslag van *bowtie*, *filler* en *square* fragmenten is ingekleurd in respectievelijk rood, blauw en geel. De overgang tussen de gebieden met en zonder *square* fragmenten komt overeen met een sprong in de fragmentsnelheden, waardoor een strook zonder treffers ontstaat.

In werkelijkheid zal de sprong in de fragmentsnelheid minder abrupt zijn, waardoor de twee stroken met fragment treffers in elkaar overvloeien. Voor het beste *matching* resultaat is de steek tussen individuele fragmenten in de brede strook met treffers gebruikt.

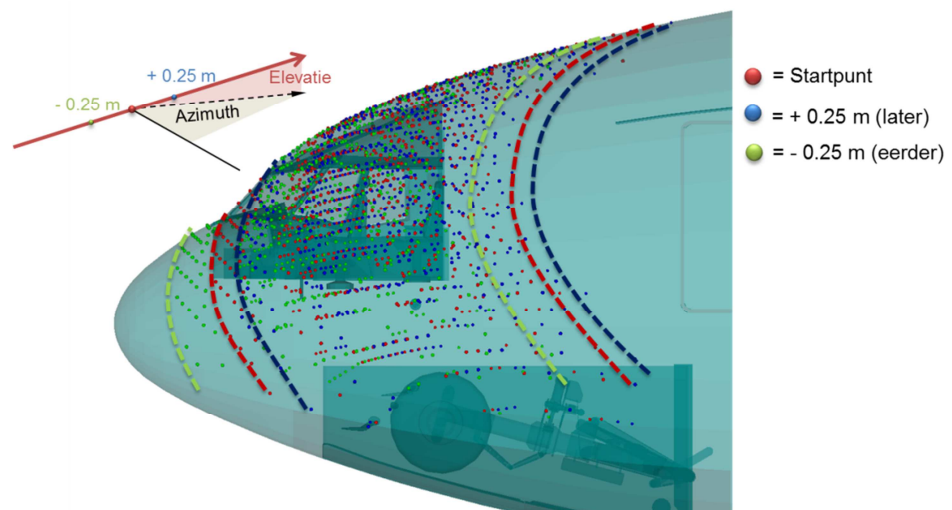
Het regelmatige gatenpatroon dat zo kenmerkend is voor een gevechtsslading met voorgevormde fragmenten is ook zichtbaar in de simulatie. Zie figuur 5.4 met het zijaanzicht (X-Z vlak in het referentie assenstelsel) van het vliegtuig. Wanneer men zich de gevechtsslading voorstelt als een (houten) ton, dan zijn de voorgevormde fragmenten gerangschikt volgens de omtrek van de ton, en ook in de langsrichting van de ton. De rangschikking in langsrichting volgt dan de “duigen” van de denkbeeldige ton.



Figuur 5.4: Links: de lijnen verbinden de *bowtie* fragmenten die in de langsrichting van de gevechtslading ('duigen') zijn gerangschikt. Rechts: de lijnen verbinden fragmenten die in de omtrekrichting van de gevechtslading ('ringen') zijn gerangschikt.

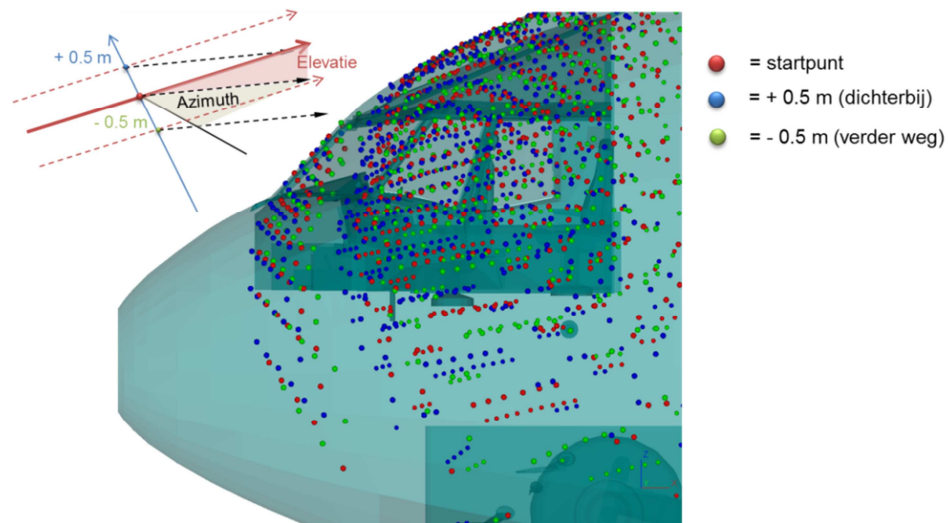
5.3.2 Positie en oriëntatie matching

Figuur 5.5 geeft een illustratie van de *matching* langs de aangenomen SAM snelheidsvector. Er zijn geen treffers waargenomen in de scheiding met de *radome* (figuur 3.6). De groene begrenzing ligt dus te ver naar voren. Er zijn wel treffers waargenomen in de middelste cockpit raamstijl (figuur 3.5). De blauwe begrenzing ligt dus te ver naar achter. De rode begrenzing geeft de beste *match*.



Figuur 5.5: *Matching* langs de aangenomen SAM snelheidsvector. De rode stippellijn geeft de begrenzing van het fragmentschadegebied in de uitgangssituatie. De begrenzing schuift naar voren op de contour bij een eerdere detonatie (groene stippellijn) en naar achter bij een latere detonatie (blauwe stippellijn).

Figuur 5.6 geeft een illustratie van de *matching* dwars op de aangenomen SAM snelheidsvector. Een verplaatsing van een halve meter naar het vliegtuig *matcht* het best met de waargenomen steek tussen individuele fragmenten (zie figuur 3.9).

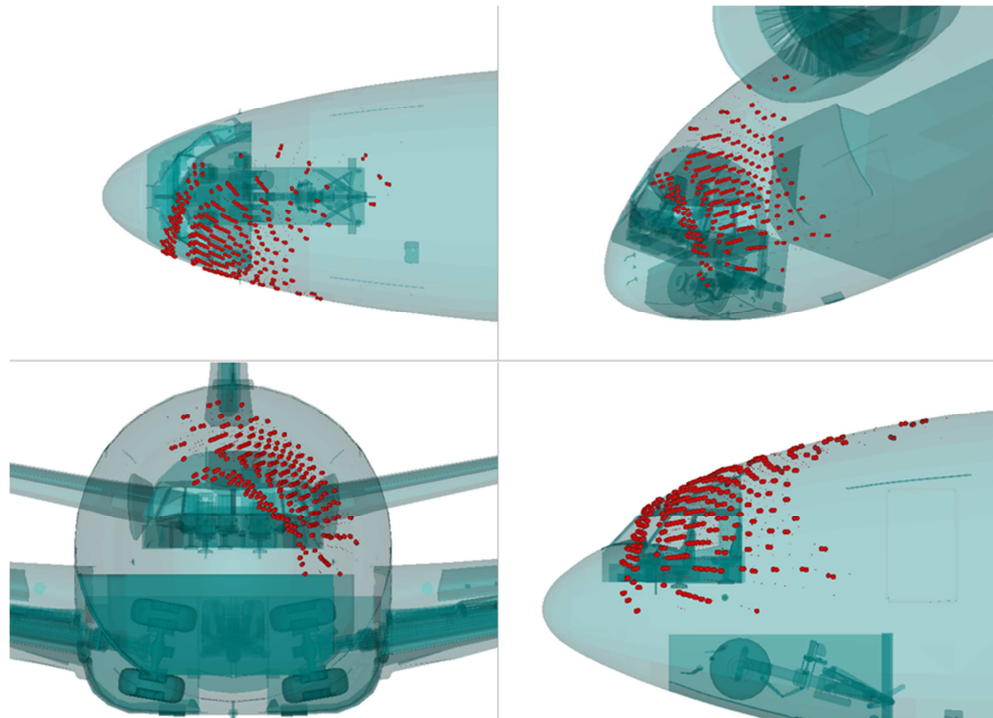


Figuur 5.6: *Matching* dwars op de aangenomen SAM snelheidsvector. De rode inslagen zijn de uitgangssituatie. De relatieve afstand tussen fragmenten neemt af wanneer de gevechtslading dichterbij detoneert (blauwe inslagen) en neemt toe wanneer deze verder weg detoneert (groene inslagen).

De resultaten van de gevolgde *matching* procedure voor de verschillende gevechtslading ontwerpen is beschikbaar in bijlage A. De beste *match* is gegeven in tabel 5.1 en figuur 5.7. Merk op dat de *match* een combinatie van positie en oriëntatie is; indien men de positie zou veranderen, verandert de oriëntatie mee. De bijbehorende kleinste afstand tussen het geometrisch midden van de gevechtslading en de cockpit is ca. 3 m.

Tabel 5.1: "Best match" gevechtsladingpositie (geometrisch midden) en oriëntatie in het referentie assenstelsel.

Gevechtslading	Eindsnelheid SAM [m/s]	X [m]	Y [m]	Z [m]	Azimuth [°]	Elevatie [°]
Ontwerp II	730	0,0	-2,0	3,7	-27	10



Figuur 5.7: Fragmentinslagpatroon van gevechtslading ontwerp II, snelheid 730 m/s, positie [0,0 m; -2,0 m; 3,7 m], oriëntatie [-27°, 10°] en aantal treffers 1186.

5.3.3 Gevoeligheid van het resultaat

Het matchingsresultaat bevindt zich in een oplossingsruimte. Dat wil zeggen: het is niet mogelijk om één combinatie voor detonatiepunt en oriëntatie te vinden. Echter, de oplossingsruimte is beperkt omdat men immers aan alle schade matching condities (beschreven in paragraaf 5.2) dient te voldoen. Meer specifiek:

- De resultaten zijn minder gevoelig voor de gevechtslading positie. De positie verandert weinig voor verschillende SAM eindsnelheden en gevechtslading ontwerpen.
- De resultaten zijn gevoelig voor de gevechtslading oriëntatie. Dit heeft te maken met het zeer nabije detonatiepunt.

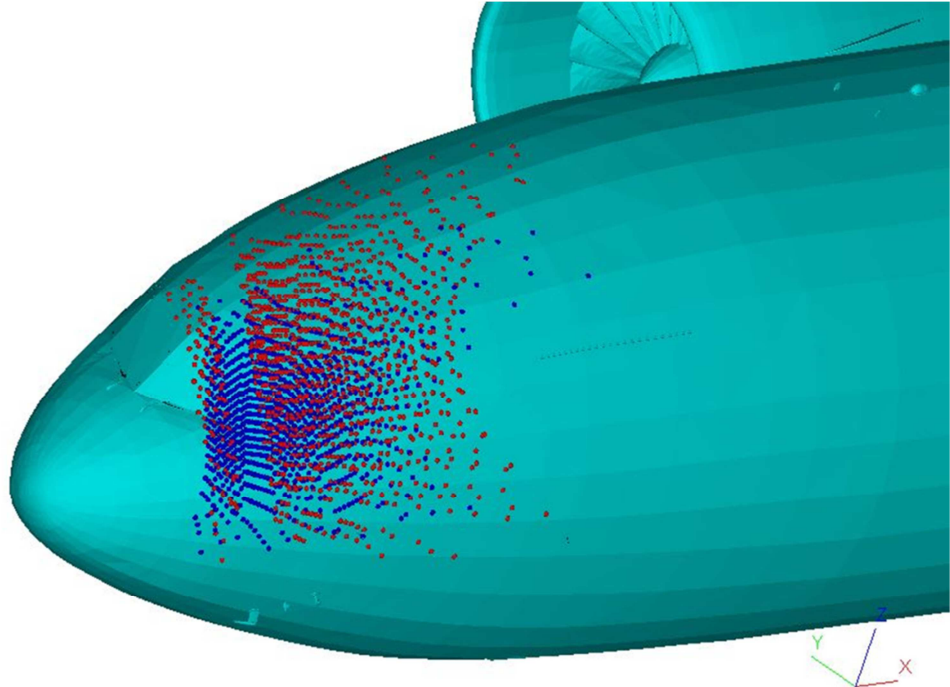
Voor een gegeven positie kan de azimuth 3° positief en negatief, en de elevatie 5° positief en negatief variëren zonder de kwaliteit van de *match* te verminderen.

5.4 Mogelijkheid van een lichtere gevechtslading

In de loop van het onderzoek is de mogelijkheid van een lichtere gevechtslading (lichter dan 70 kg) besproken. De stelling is dat ook een *match* met de waargenomen schade wordt gevonden indien een lichtere gevechtslading dichterbij het vliegtuig zou detoneren. In overleg met OVV is een simulatie opgezet waarbij een 40 kg gevechtslading binnen 1,5 m van het vliegtuig detoneert.

Gedetailleerde resultaten zijn opgenomen in bijlage B. Drie verschillende 40 kg gevechtslading ontwerpen (A, B, en C) met elke twee mogelijke eindsnelheden (500 m/s en 800 m/s) zijn beschouwd. Het belangrijkste verschil tussen de ontwerpen is het bereik aan mogelijk fragmentuitwerphoeken (ontwerp C heeft het grootste bereik). Een gedeeltelijke *match* is gevonden met ontwerp C, die zich

voortbeweegt met 500 m/s. De andere ontwerpen geven geen *match* omdat niet aan de gestelde condities is voldaan (zie paragraaf 5.2). Figuur 5.8 illustreert de verschillen tussen de best passende 70 kg en best passende 40 kg gevechtslading. De 70 kg *match* is beter.



Figuur 5.8: Rood: fragmentinslagen voor “best match” gevechtslading ontwerp II (70 kg 9N314M).
Blauw: fragmentinslagen voor “best match” gevechtslading ontwerp C (hypothetische 40 kg). Ontwerp C levert een minder passende *match* op.

Ontwerp C is extreem, in de zin dat het hoekbereik van de fragmentuitworp zo groot als fysisch mogelijk is gemaakt. Alleen met een extreem hoekbereik blijkt het mogelijk het waargenomen schadebeeld enigszins te benaderen.

Het schadebeeld van een lichtere gevechtslading dichterbij het vliegtuig lijkt niet op het schadebeeld van een zwaardere gevechtslading verder weg van het vliegtuig. TNO beoordeelt daarom de stelling dat een lichtere gevechtslading de waargenomen schade kan hebben veroorzaakt als onwaarschijnlijk.

6 Conclusies en aanbevelingen

De Onderzoeksraad voor Veiligheid wil een zo helder mogelijk beeld geven over de oorzaak van de crash van vlucht MH17. Een mogelijke oorzaak van de crash is dat de fatale schade aan het vliegtuig is veroorzaakt door de gevechtslading van een geleid wapen. De onderzoeksvraag is welke kenmerkende gevechtslading eigenschappen in staat zijn de waargenomen schade te veroorzaken.

Visuele inspectie van de geborgen delen heeft een gatenpatroon opgeleverd dat kenmerkend is voor de uitwerking van een gevechtslading met voorgevormde fragmenten. Schade door explosieve overdruk (*blast*), voor zover aantoonbaar, ondersteunt de waarneming.

Het waarneembare schadegebied bleek onvolledig, omdat grote delen van de cockpit sectie ontbreken. Plaatselijk, aan de linkerzijde van de cockpit buitenzijde, is fragmentschade waargenomen. Er zijn gaten waargenomen, op regelmatige afstand van elkaar, met verschillende gatvormen en gatoppervlaktes. Dit wijst op een gevechtslading met verschillende, specifieke fragmentvormen. Op een paneel aan de rechterzijde van de cockpit buitenzijde is schade aangetroffen die vermoedelijk het gevolg is van *blast*.

Met hulp van simulaties is een schatting gemaakt van de plaats waar de gevechtslading zou moeten detoneren om de waargenomen schade te veroorzaken. Het gereconstrueerde schadebeeld laat zien dat de omschreven gevechtslading 9N314M op ca. 3 meter van het vliegtuig gedetoneerd moet zijn om de waargenomen fragmentschade te veroorzaken. Ter oriëntatie: het detonatiepunt lag linksboven en vlak voor de cockpit.

Het waargenomen gatenpatroon kan niet veroorzaakt zijn door vol kaliber projectielen uit een middenkaliber kanonsysteem.

TNO heeft twee aanbevelingen voor verdergaand onderzoek, indien nodig:

- Reconstrueer de gevechtslading door middel van verdergaande analyse van de aangetroffen resten en sporen. Denk aan de metallurgische karakterisatie van fragmenten, chemische karakterisatie van residu en schatting van de gevechtslading massa op basis van fragmentaantallen.
- Breid de schadeanalyse uit als opstap voor faalanalyse, ook door schade binnen de vliegtuigcontour te beschouwen. Start met het bepalen van de interne schade in een computeromgeving, gevolgd door beproevingen.

7 Referenties

- [1] Onderzoeksraad voor Veiligheid, *Rapport van eerste bevindingen – Crash van Malaysia Airlines Boeing 777-200 vlucht MH17, Hrabove, Oekraïne – 17 juli 2014*, Den Haag, september 2014.
- [2] Deursen, J.R. van, *Springpunt en schadebeeld (Vertrouwelijk)*, TNO offertenummer 919486, aanbiedingsbrief 15 EBP/032, Rijswijk, 29 januari 2015.
- [3] Opdrachtovereenkomst tussen OVV en TNO, *inzake het uitvoeren van de opdracht met betrekking tot het opstellen van een advies in verband met MH17*, TNO-referentie SP50749, 16 februari 2015.
- [4] Internet, www.whathappenedtoflightmh17.com, website bezocht maart 2015.
- [5] JSC Almaz Antey, *Materials – according to the characteristics of the rockets BUK, requested by experts NLR* (Engelse vertaling), Referentie no. 01-09/548K, 29 juli 2015.
- [6] <http://www.turbosquid.com/3d-models/3d-aircraft-malaysia-airlines-boeing-model/816230>, website bezocht maart 2015.
- [7] NLR, *flight data*, e-mail bericht, 28 januari 2015, Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium.
- [8] JSC Almaz Antey, *Findings of expert assessments on MH17 accident – Modulation results* (Engelse vertaling), presentatie, 6 augustus 2015.
- [9] TNO, *Numerical simulation of blast loading on Malaysia Airlines flight MH17 due to a warhead detonation*, TNO rapport 2015 M10626, Rijswijk, mei 2015.
- [10] Numerics, *SPLIT-X - Fragmentation Warhead Expert System*, folder, download van website www.numerics-gmbh.de, geraadpleegd april 2015.

A Inslagpatroon van gevechtslading 9N314M

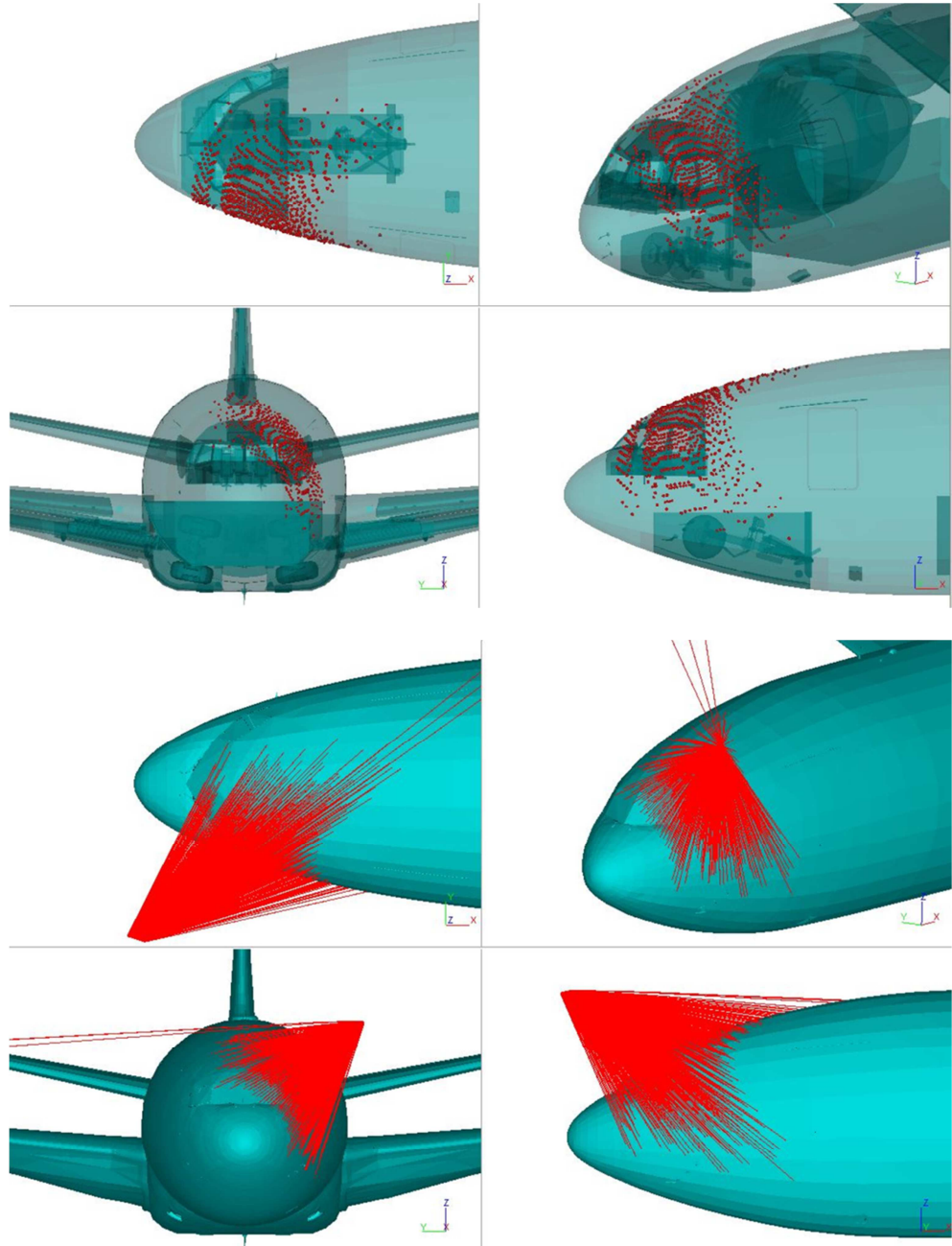
Deze bijlage bevat de resultaten van de schade matching procedure voor drie ontwerpen van de 70 kg gevechtslading 9N314M met voorgevormde fragmenten.

A.1 Gesimuleerd fragmentinslagpatroon

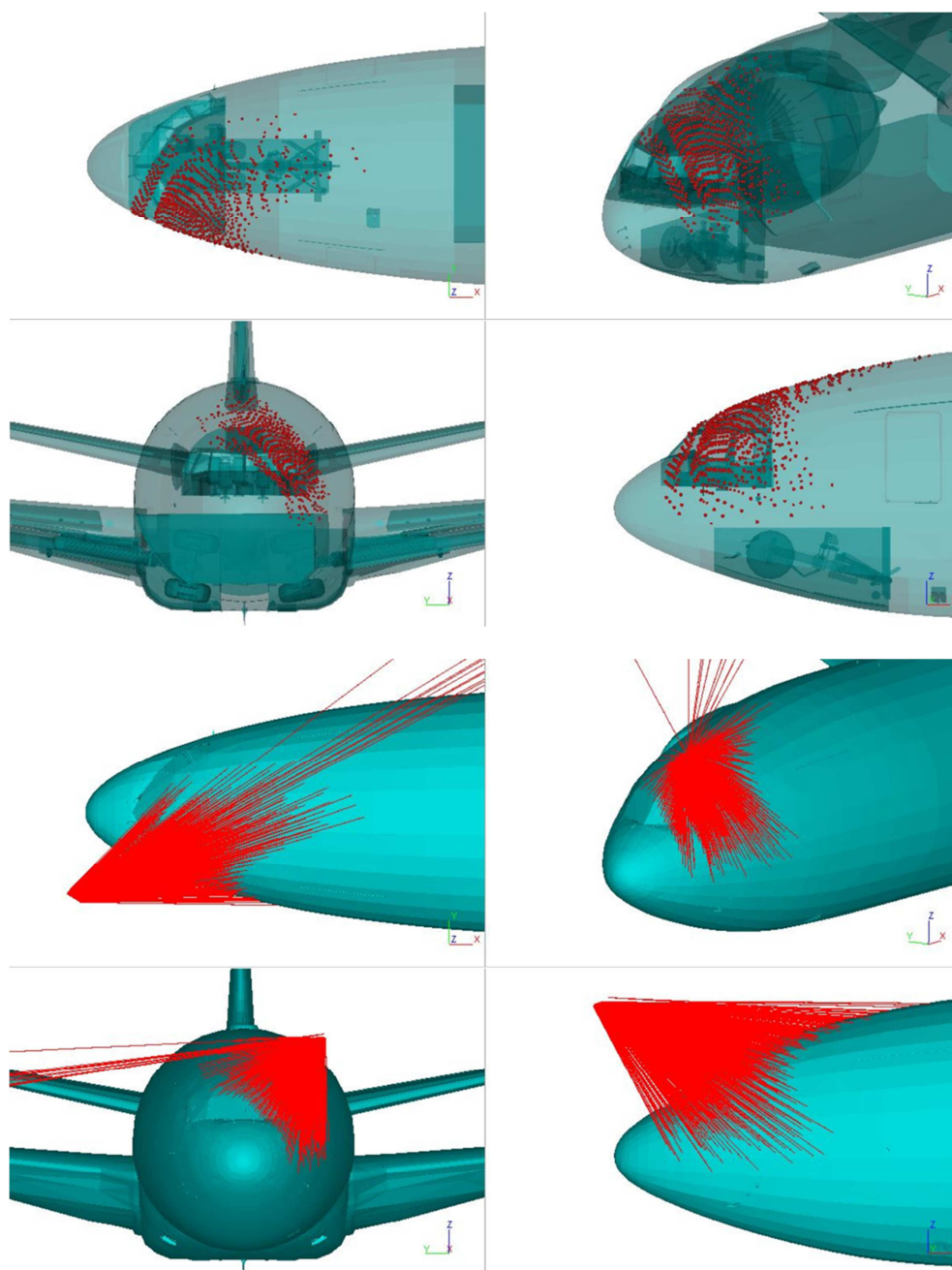
De drie gevechtslading ontwerpen zijn voor twee eindsnelheden van het geleid wapen gesimuleerd (~600 m/s en 730 m/s). De positie en oriëntatie van de gevechtslading op het moment van detonatie is gevarieerd om een zo goed mogelijk gelijkende schade te verkrijgen.

A.1.1 Ontwerp I, eindsnelheid ~600 m/s

Het simulatieresultaat is te zien in figuur A.1. Onder deze meest gunstige gevechtsslading positie en oriëntatie wordt aan de *match* condities voldaan. Figuur A.2 toont een alternatieve gevechtsslading positie en oriëntatie die een redelijke *match* oplevert. Dit toont dat er een bepaalde 'bewegingsvrijheid' (oplossingsruimte) bestaat bij het maken van de *match*.



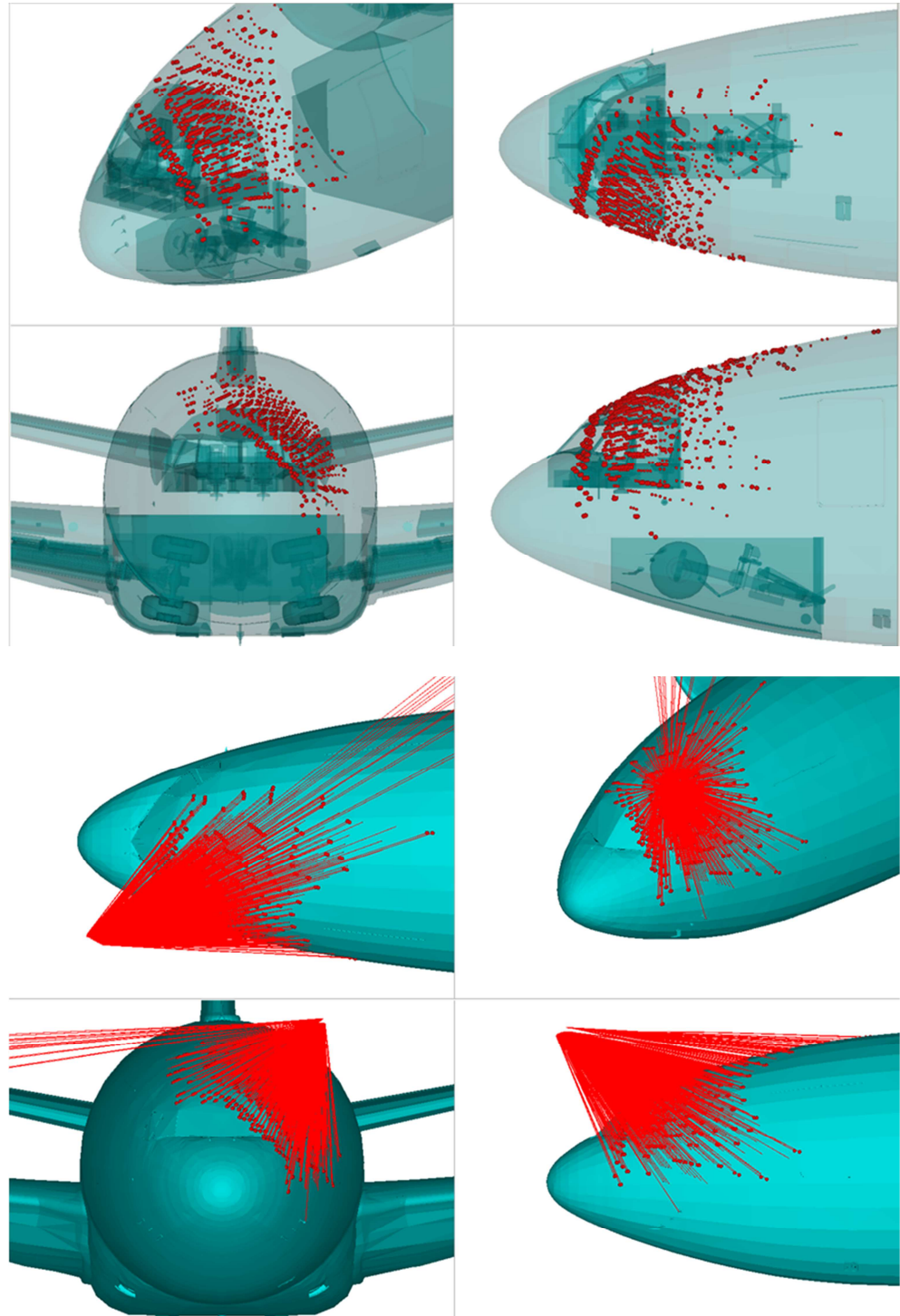
Figuur A.1: Inslagpatroon (boven) en bijbehorende fragmentbanen (onder) van gevechtsslading ontwerp I, snelheid ~600 m/s, positie [-0,4 m; -3,5 m; 3,7 m], oriëntatie [-17°, 7°] en aantal treffers 769.



Figuur A.2: Inslagpatroon (boven) en bijbehorende fragmentbanen (onder) van gevechtslading ontwerp I, snelheid ~600 m/s, positie [-0,7 m; -2,0 m; 3,5 m], oriëntatie [-35°, 10°] en aantal treffers 869.

A.1.2 Ontwerp II, eindsnelheid ~600 m/s

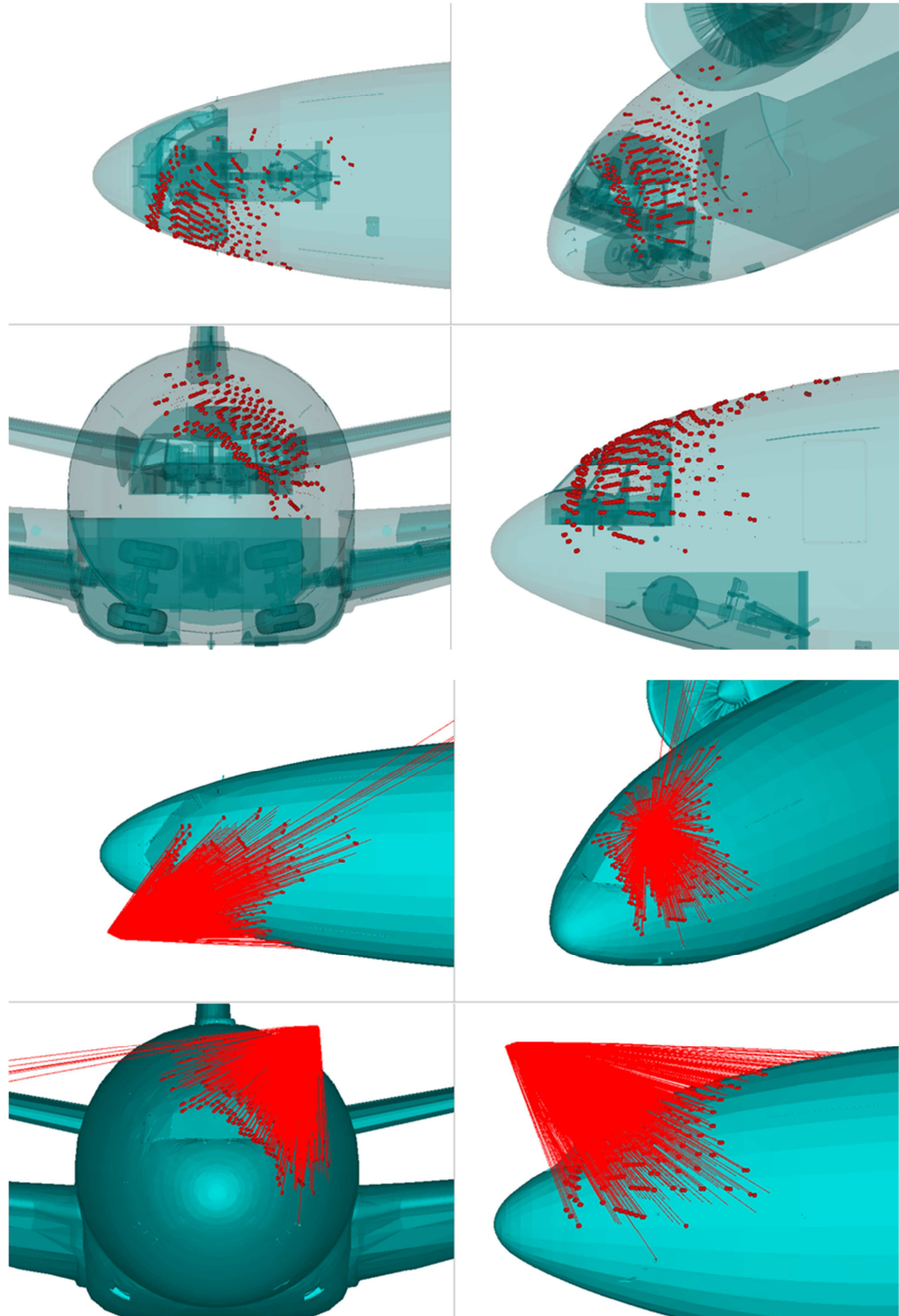
Het simulatieresultaat is te zien in figuur A.3. Onder deze meest gunstige gevechtslading positie en oriëntatie wordt aan de *match* condities voldaan.



Figuur A.3: Inslagpatroon (boven) en bijbehorende fragmentbanen (onder) van gevechtslading ontwerp II, snelheid ~600 m/s, positie [0,0 m; -2,0 m; 3,7 m], oriëntatie [-30°, 15°] en aantal treffers 1157.

A.1.3 Ontwerp II, eindsnelheid 730 m/s

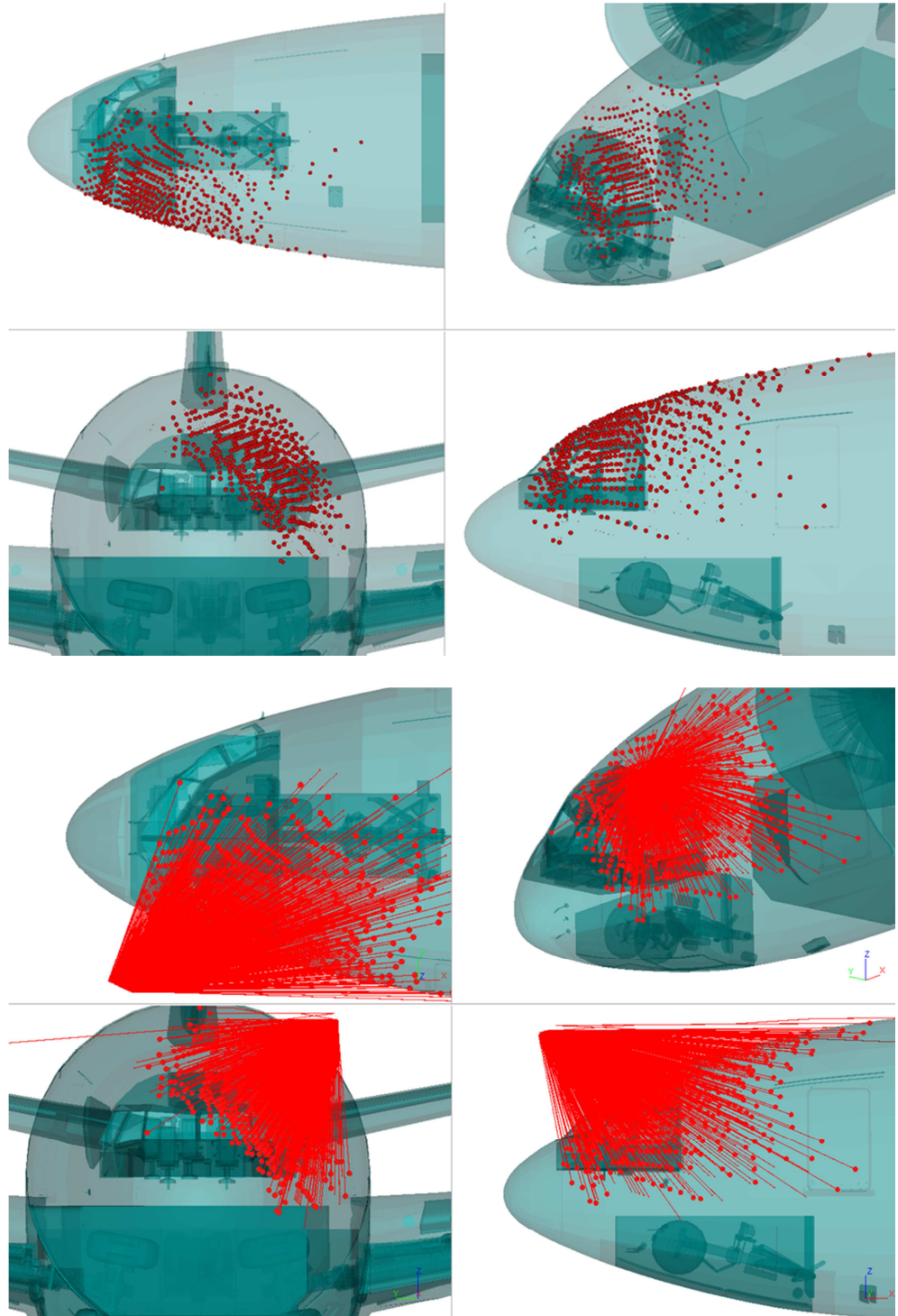
Het simulatieresultaat is te zien in figuur A.4. Onder deze meest gunstige gevechtsslading positie en oriëntatie wordt aan de *match* condities voldaan.



Figuur A.4: Inslagpatroon (boven) en bijbehorende fragmentbanen (onder) van gevechtsslading ontwerp II, snelheid 730 m/s, positie [0,0 m; -2,0 m; 3,7 m], oriëntatie [-27°, 10°] en aantal treffers 1186.

A.1.4 Ontwerp III, eindsnelheid ~600 m/s

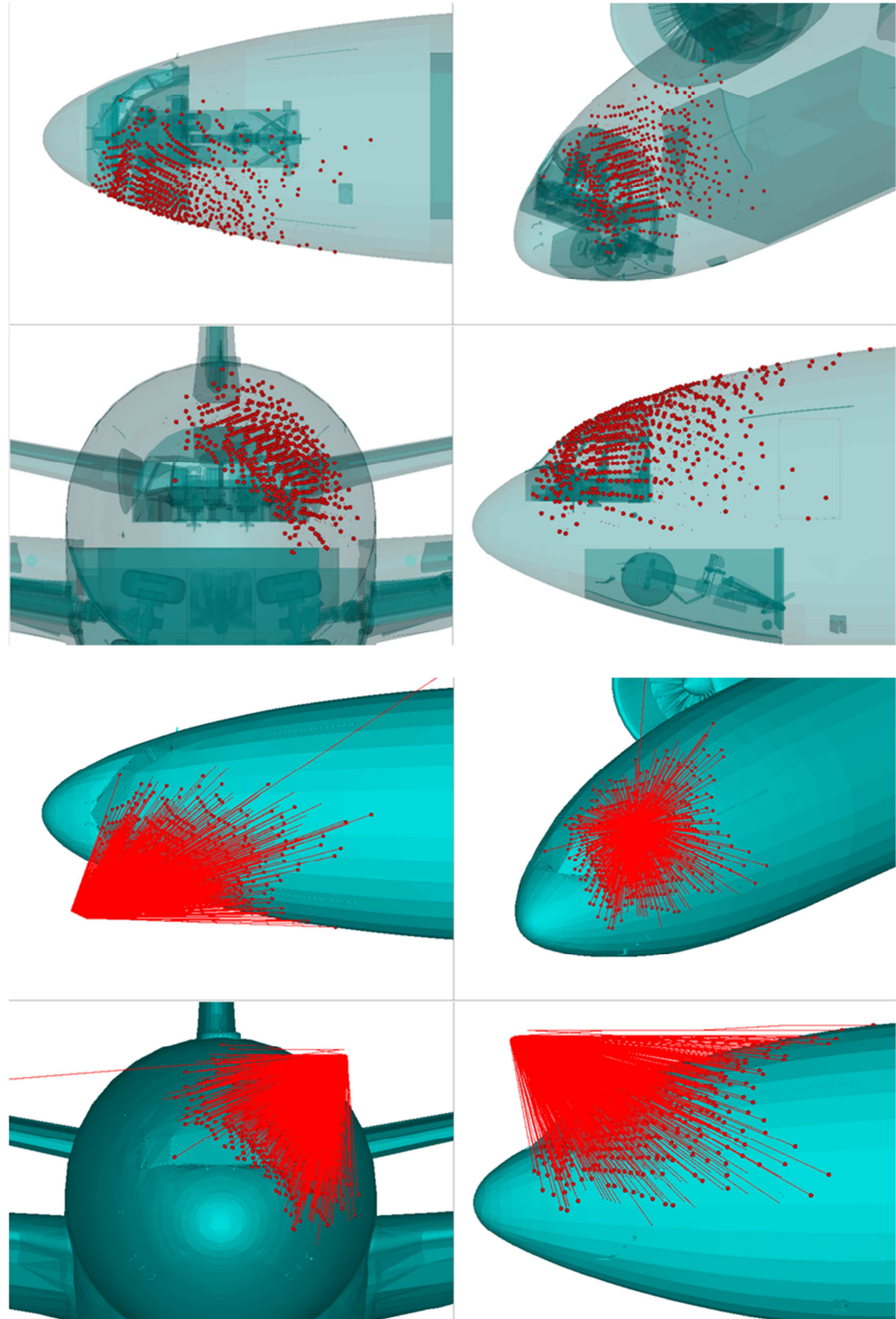
Het simulatieresultaat is te zien in figuur A.5. Onder deze meest gunstige gevechtsslading positie en oriëntatie wordt aan de *match* condities voldaan.



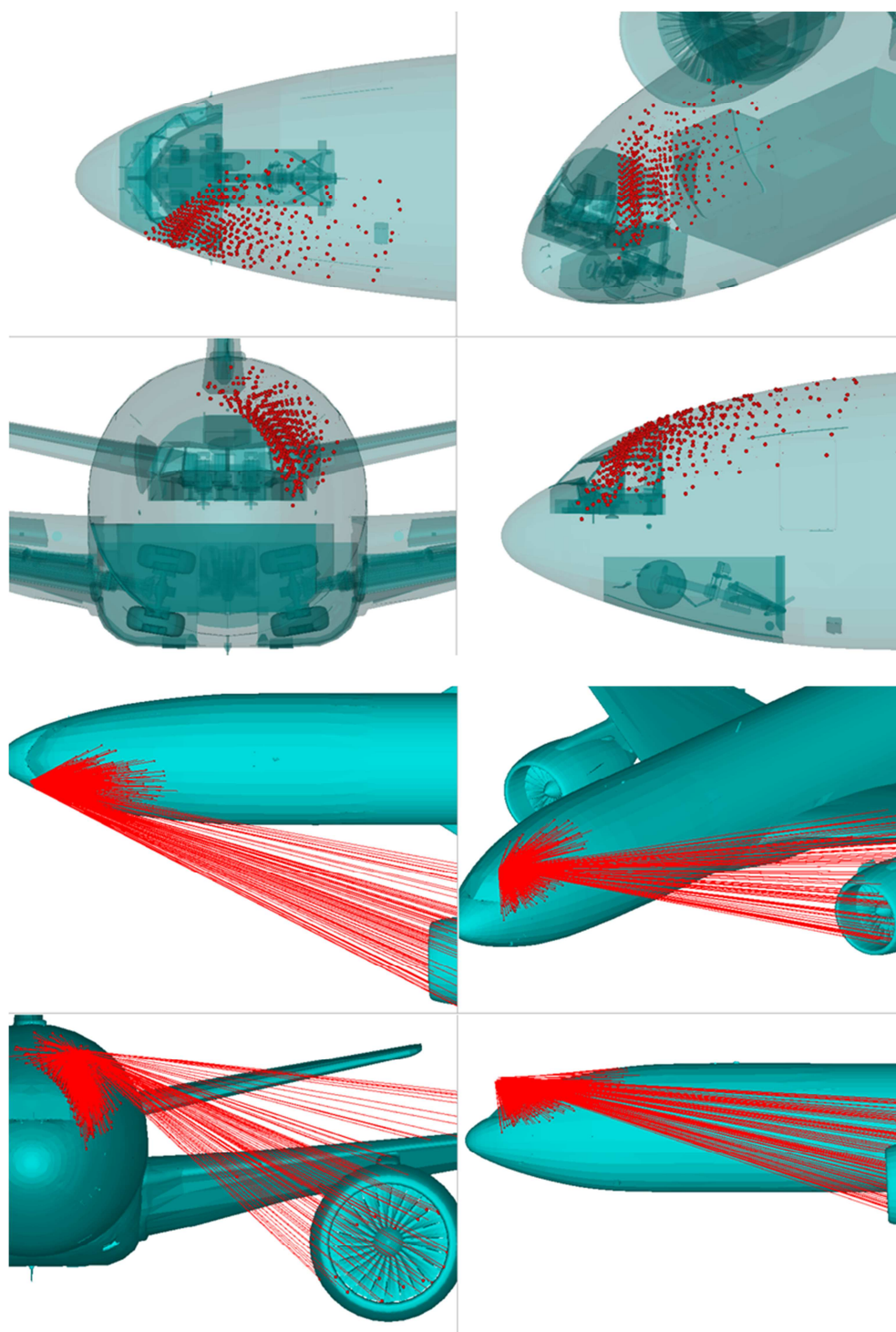
Figuur A.5: Inslagpatroon (boven) en bijbehorende fragmentbanen (onder) van gevechtsslading ontwerp III, snelheid ~600 m/s, positie [0,5 m; -2,3 m; 3,4 m], oriëntatie [-27°, 10°] en aantal treffers 1216.

A.1.5 Ontwerp III, eindsnelheid 730 m/s

Het simulatieresultaat is te zien in figuur A.6. Onder deze meest gunstige gevechtsslading positie en oriëntatie wordt aan de *match* condities voldaan. Figuur A.7 toont een alternatieve gevechtsslading positie en oriëntatie, die gegeven wordt in een studie van Almaz Antey [8]. Deze casus voldoet slechts in zeer beperkte mate aan de gestelde matching condities.



Figuur A.6: Inslagpatroon (boven) en bijbehorende fragmentbanen (onder) van gevechtsslading ontwerp III, snelheid 730 m/s, positie [0,5 m; -2,3 m; 3,4 m], oriëntatie [-24°, 7°] en aantal treffers 1254.



Figuur A.7: Inslagpatroon (boven) en bijbehorende fragmentbanen (onder) van gevechtslading ontwerp III, snelheid 730 m/s, positie [1,4 m; -0,8 m; 3,0 m], oriëntatie [-72°, 22°] en aantal treffers 898 (waarvan 810 in het gebied rond de cockpit).

A.2 Samenvatting

De resultaten zijn samengevat in Tabel A.1. De beste *match* met de waargenomen schade aan het toestel is gevonden met ontwerp II en een SAM eindsnelheid van 730 m/s. De slechtste *match* is gevonden met ontwerp III, een SAM eindsnelheid van 730 m/s en de opgegeven gevechtslading oriëntatie volgens Almaz Antey [8].

Tabel A.1: Resultaat van de schade matching procedure. Gevechtslading positie (X, Y, Z) en oriëntatie (azimuth, elevatie) in het referentie assenstelsel.

Simulatie casus	Eindsnelheid SAM [m/s]	X [m]	Y [m]	Z [m]	Azimuth [°]	Elevatie [°]
Ontwerp I (initieel)	~600	-0,4	-3,5	3,7	-17	7
Ontwerp I (alternatief)	~600	-0,7	-2,0	3,5	-35	10
Ontwerp II	~600	0,0	-2,0	3,7	-30	15
Ontwerp II	730	0,0	-2,0	3,7	-27	10
Ontwerp III	~600	0,5	-2,3	3,4	-27	10
Ontwerp III	730	0,5	-2,3	3,4	-24	7
Ontwerp III (Almaz Antey)	730	1,4	-0,8	3,0	-72	22

De resultaten laten zien dat:

- Het mogelijk is om verschillende posities en oriëntaties voor verschillende gevechtslading ontwerpen te matchen; het vinden van één enkele combinatie voor detonatiepunt en oriëntatie is niet mogelijk.
- De gevonden detonatiepunten zich binnen een beperkte oplossingsruimte bevinden. De gevechtslading positie verandert weinig over de verschillende simulatie cases. De resultaten zijn gevoelig voor de gevechtslading oriëntatie. Dit heeft te maken met het zeer nabije detonatiepunt.

B Inslagpatroon van een 40 kg gevechtslading

In de loop van het onderzoek naar de oorzaak van de crash van *Malaysia Airlines* vlucht MH17 is de mogelijkheid van een lichtere gevechtslading (lichter dan 70 kg) besproken. De stelling is dat ook een *match* met de waargenomen schade wordt gevonden indien een lichtere gevechtslading dichterbij het vliegtuig zou detoneren. OVV heeft TNO gevraagd deze mogelijkheid te onderzoeken.

Deze bijlage bevat de resultaten van de schade matching procedure voor drie ontwerpen van een 40 kg gevechtslading met voorgevormde fragmenten.

B.1 Naderingsscenario

Voor een betekenisvolle simulatie is het noodzakelijk een naderingsscenario vast te stellen. Het vliegtuig en de gevechtslading hebben elkaar volgens bepaalde vliegroutes benaderd. Voor de eindballistische simulatie is alleen de situatie vlak voor detonatie van belang.

Het vliegtuig bevindt zich in de simulatie op *Flight Level* 330 en vliegt met 254 m/s *ground speed*. De gevechtslading wordt vervoerd door een geleid wapen. Het type geleid wapen is vooralsnog onbekend, zodat hier volstaan wordt met twee relatief ver uit elkaar liggende eindsnelheden voor het geleid wapen: 500 m/s en 800 m/s.

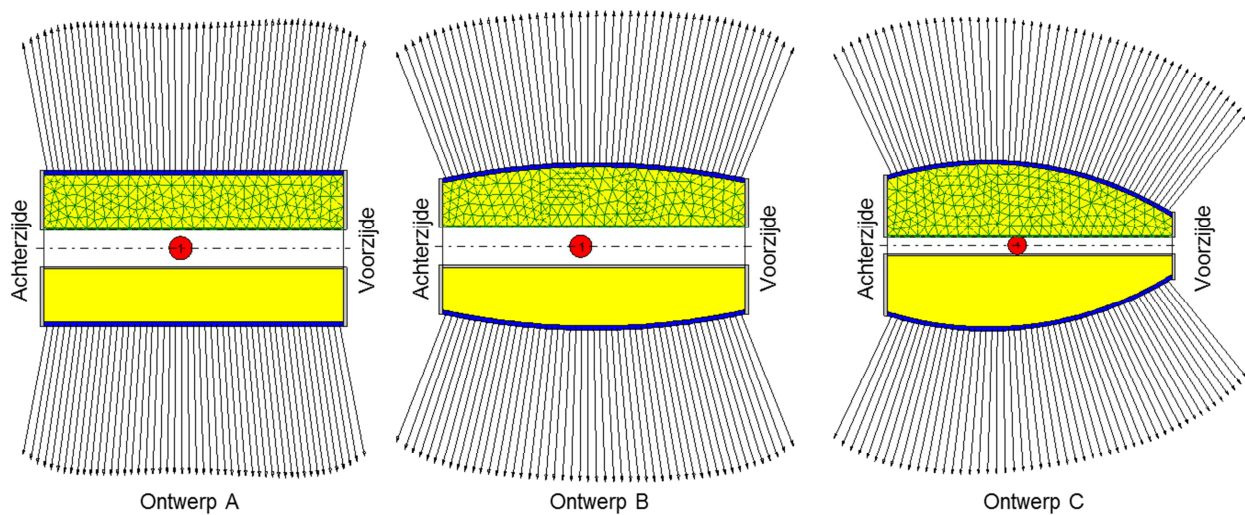
In overleg met OVV is als uitgangspunt voor de simulatie genomen dat de gevechtslading binnen 1,5 m van het vliegtuig detoneert om de waargenomen schade te veroorzaken. In het referentie assenstelsel komt dit overeen met positie [0,8 m; -1,6 m; 2,0 m].

B.2 Gevechtslading ontwerpen

Uitgangspunt voor het schade matching proces is een gevechtslading van ca. 40 kg met ca. 4000 voorgevormde fragmenten. TNO heeft met deze gegevens drie gevechtslading ontwerpen gemaakt, die zich voornamelijk onderscheiden in het bereik aan mogelijk fragmentuitwerphoeken (zie tabel B.1).

Tabel B.1: Prestaties van drie ontwerpen voor een 40 kg gevechtslading.

Kenmerk	Ontwerp A (cilindrisch)	Ontwerp B (tonvormig)	Ontwerp C (taps toelopen)
Aantal voorgevormde fragmenten	~4000 (vierkant, elk ~3 gram)	~4000 (vierkant, elk ~3 gram)	~4000 (vierkant, elk ~3 gram)
Minimale uitwerphoek [°]	79	68	50
Maximale uitwerphoek [°]	100	111	115
Minimale snelheid [m/s]	~1600	~1800	~1800
Maximale snelheid [m/s]	~2000	~2000	~2100
Ontsteekpositie	Midden	Midden	Midden



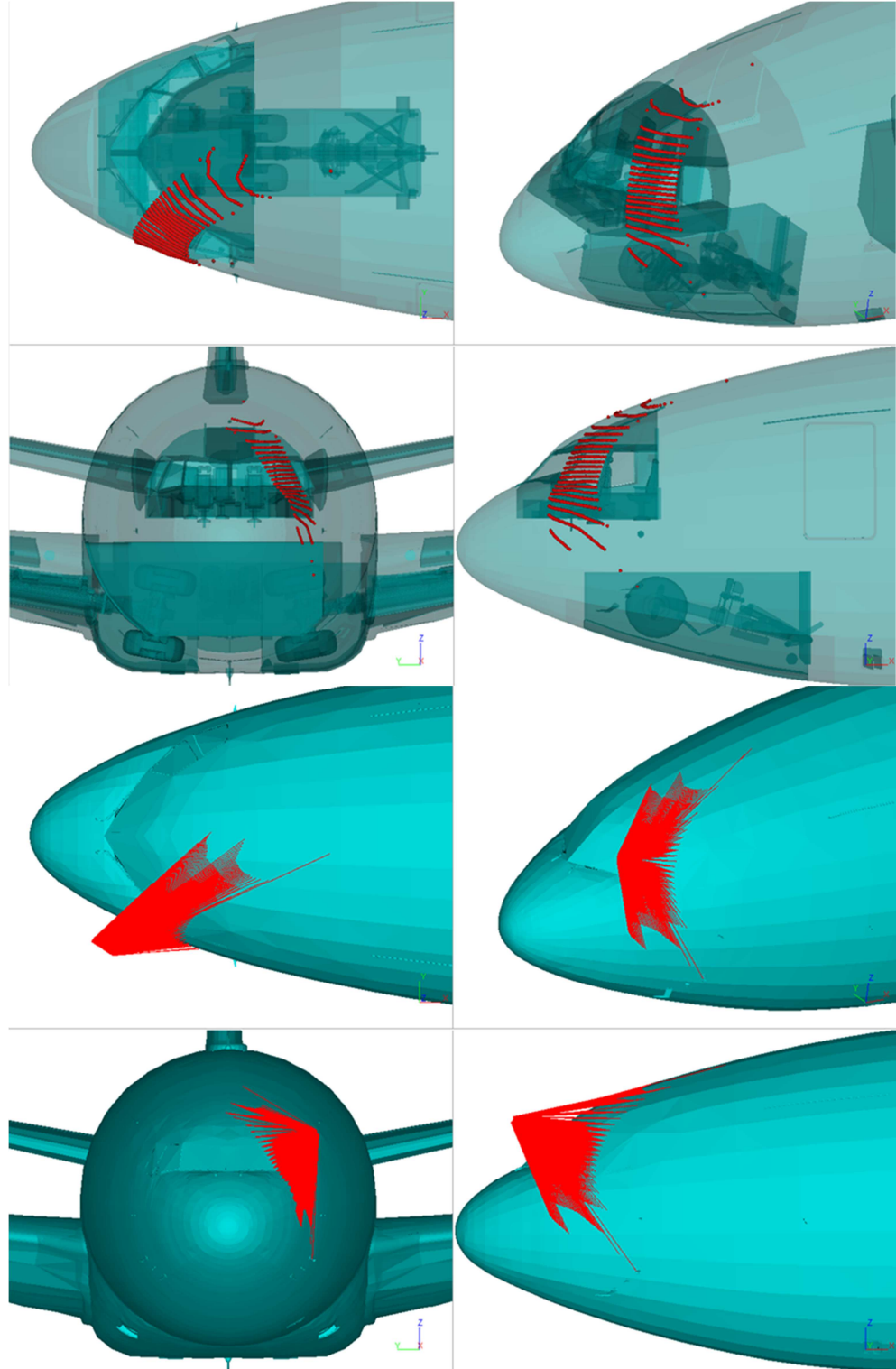
Figuur B.1: Doorsnedetekeningen van drie gevechtsladingontwerpen waarmee het fysisch mogelijk is de fragmentmassa met de in Tabel B.1 opgegeven hoeken en snelheden uit te werpen. Van links naar rechts: cilindrisch (ontwerp A), tonvormig (ontwerp B) en taps toelopend (ontwerp C). De rode punt is het startpunt van de detonatie waarmee de explosieve lading (geel) de fragmenten op de mantel (blauw) uitwerpt.

B.3 Gesimuleerd fragmentinslagpatroon

De geometrische centra van de drie gevechtslading ontwerpen zijn op de aangegeven detonatiepositie gezet en voor de twee eindsnelheden gesimuleerd. De oriëntatie van de gevechtslading is gevarieerd om een zo goed mogelijk gelijkende schade te verkrijgen.

B.3.1 *Ontwerp A, eindsnelheid 500 m/s*

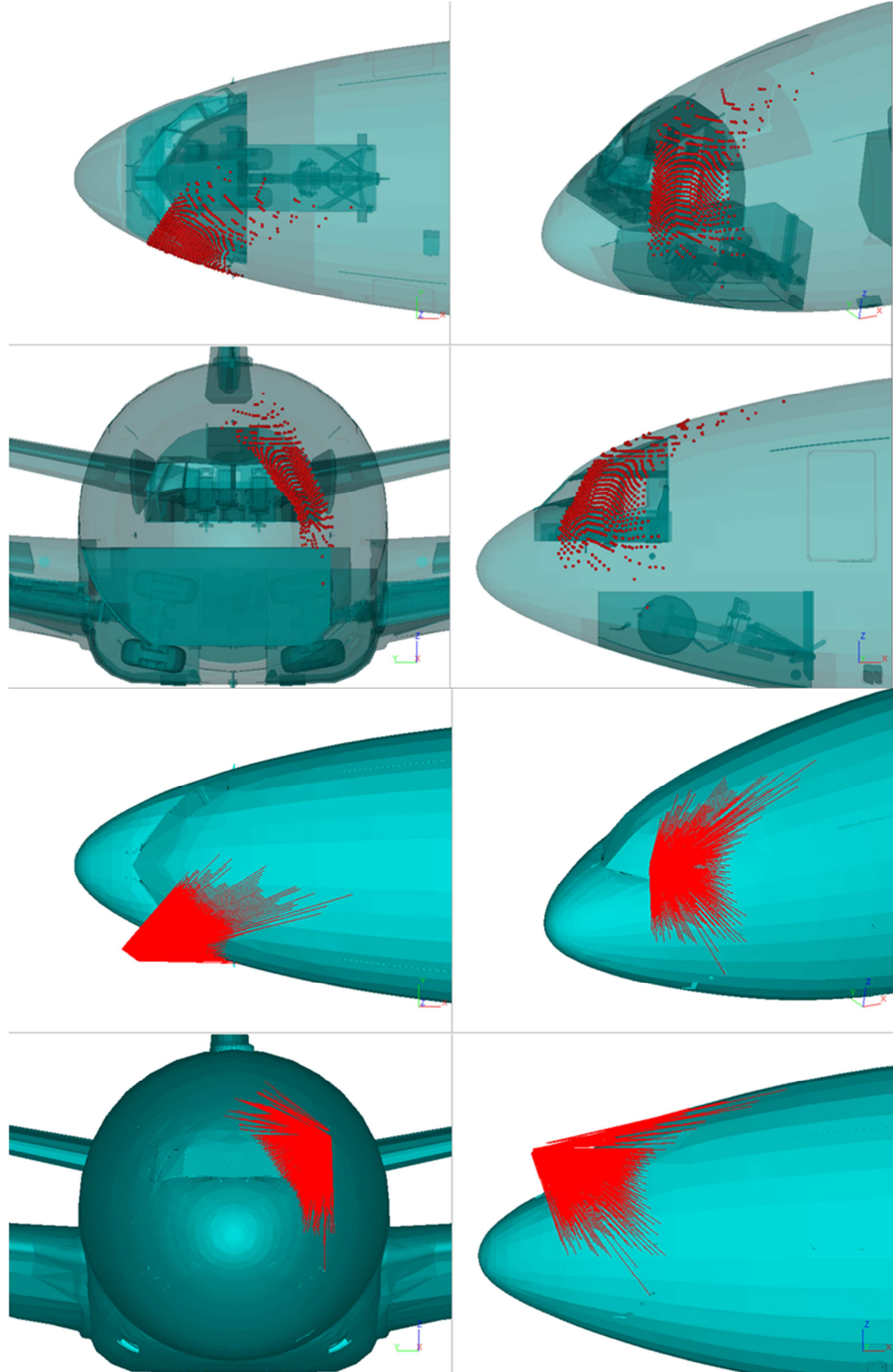
Het simulatieresultaat is te zien in figuur B.1. De bijbehorende gevechtsslading oriëntatie in het referentie assenstelsel is -35° azimuth en 0° elevatie. Onder deze meest gunstige oriëntatie wordt niet aan de *match* condities voldaan.



Figuur B.1: Inslagpatroon (boven) en bijbehorende fragmentbanen (onder) van gevechtsslading ontwerp A, snelheid 500 m/s, positie [0,8 m; -1,6 m; 2,0 m], oriëntatie $[-35^\circ, 0^\circ]$ en aantal treffers 961.

B.3.2 *Ontwerp B, eindsnelheid 500 m/s*

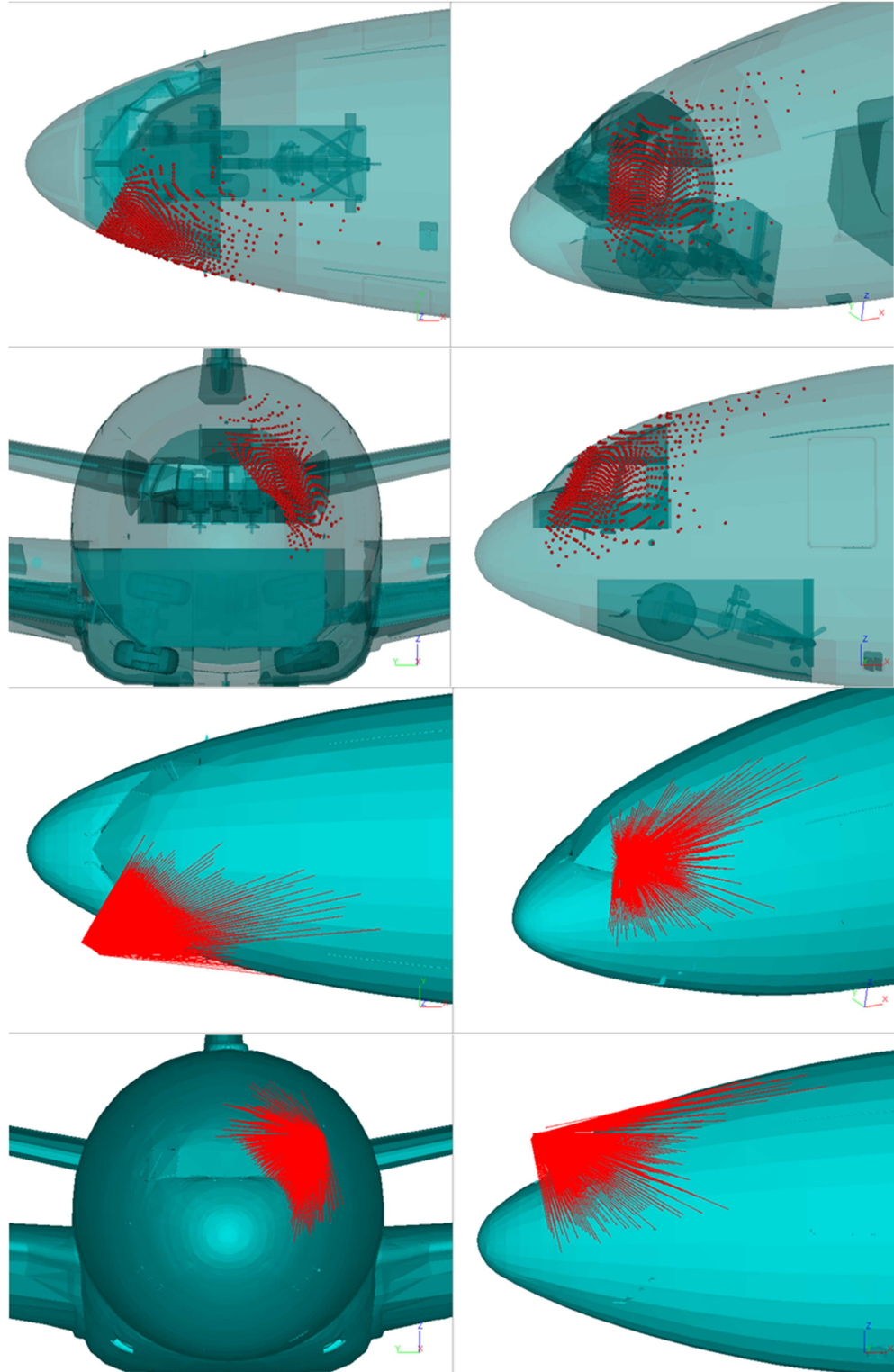
Het simulatieresultaat is te zien in figuur B.2. De bijbehorende gevechtsslading oriëntatie in het referentie assenstelsel is -40° azimuth en 5° elevatie. Onder deze meest gunstige oriëntatie wordt niet aan de *match* condities voldaan.



Figuur B.2: Inslagpatroon (boven) en bijbehorende fragmentbanen (onder) van gevechtsslading ontwerp B, snelheid 500 m/s, positie [0,8 m; -1,6 m; 2,0 m], oriëntatie $[-40^\circ, 5^\circ]$ en aantal treffers 897.

B.3.3 *Ontwerp C, eindsnelheid 500 m/s*

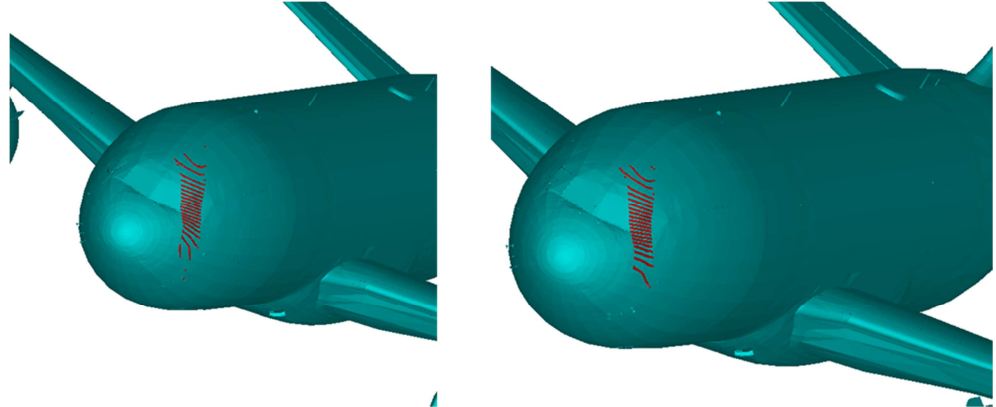
Het simulatieresultaat is te zien in figuur B.3. De bijbehorende gevechtsslading oriëntatie in het referentie assenstelsel is -35° azimuth en 5° elevatie. Onder deze meest gunstige oriëntatie wordt gedeeltelijk aan de *match* condities voldaan.



Figuur B.3: Inslagpatroon (boven) en bijbehorende fragmentbanen (onder) van gevechtsslading ontwerp C, snelheid 500 m/s, positie [0,8 m; -1,6 m; 2,0 m], oriëntatie $[-35^\circ, 5^\circ]$ en aantal treffers 888.

B.3.4 *Ontwerp A, twee eindsnelheden*

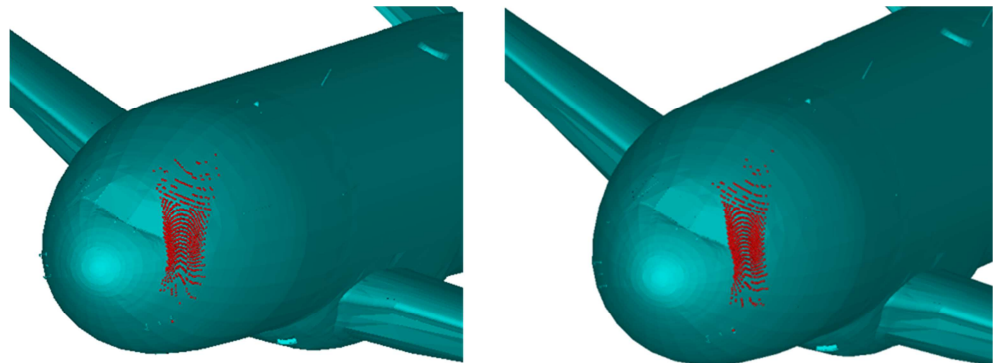
De beste *match* voor ontwerp A met SAM eindsnelheid 500 m/s (zie figuur B.1) is vergeleken met de beste *match* voor 800 m/s in figuur B.4. De *match* voor de hogere eindsnelheid is minder geslaagd omdat het schadegebied kleiner wordt.



Figuur B.4: Inslagpatroon van gevechtslading ontwerp A, positie [0,8 m; -1,6 m; 2,0 m]. Links: snelheid 500 m/s, oriëntatie [-35°, 0°]. Rechts: snelheid 800 m/s, oriëntatie [-25°, 0°].

B.3.5 *Ontwerp B, twee eindsnelheden*

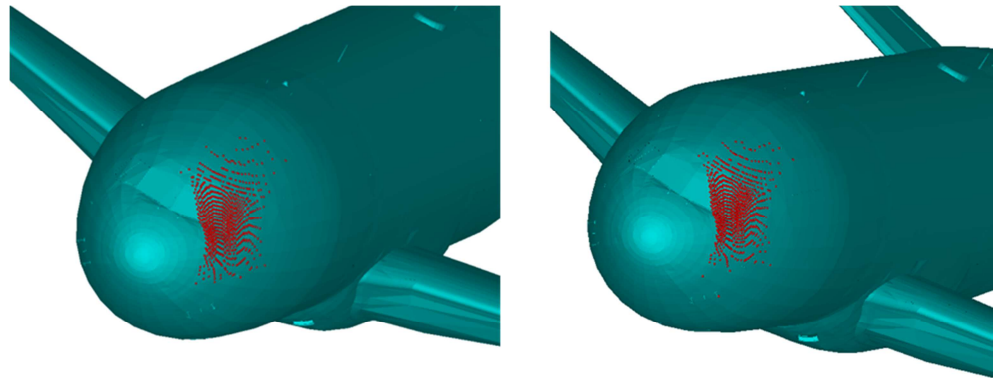
De beste *match* voor ontwerp B met SAM eindsnelheid 500 m/s (zie figuur B.2) is vergeleken met de beste *match* voor 800 m/s in figuur B.5. De *match* voor de hogere eindsnelheid is minder geslaagd omdat het schadegebied kleiner wordt.



Figuur B.5: Inslagpatroon van gevechtslading ontwerp B, positie [0,8 m; -1,6 m; 2,0 m]. Links: snelheid 500 m/s, oriëntatie [-40°, 5°]. Rechts: snelheid 800 m/s, oriëntatie [-25°, 0°].

B.3.6 *Ontwerp C, twee eindsnelheden*

De beste *match* voor ontwerp C met SAM eindsnelheid 500 m/s (zie figuur B.3) is vergeleken met de beste *match* voor 800 m/s in figuur B.6. De *match* voor de hogere eindsnelheid is minder geslaagd omdat het schadegebied kleiner wordt.



Figuur B.6: Inslagpatroon van gevechtslading ontwerp C, positie [0,8 m; -1,6 m; 2,0 m]. Links: snelheid 500 m/s, oriëntatie [-35°, 5°]. Rechts: snelheid 800 m/s, oriëntatie [-30°, 5°].

B.4 Analyse en samenvatting

Een gedeeltelijke *match* met de waargenomen schade aan het toestel is gevonden met ontwerp C en een eindsnelheid van het geleid wapen van 500 m/s. De andere gevechtslading ontwerpen geven geen *match* omdat niet aan de daarvoor gestelde condities is voldaan (zie paragraaf 5.2).

Gevechtslading ontwerp C is extreem, in de zin dat het hoekbereik van de fragmentuitworp zo groot als fysisch mogelijk is gemaakt. Alleen met een extreem hoekbereik blijkt het mogelijk het waargenomen schadebeeld enigszins te benaderen.

Verhoging van de eindsnelheid naar 800 m/s heeft een algemene verslechtering van het matching resultaat tot gevolg. De hogere eindsnelheid verkleint het schadegebied in X-richting en verhoogt de fragmentdichtheid in dat gebied.

Het schadebeeld van een lichtere gevechtslading dicht bij het vliegtuig lijkt niet op het schadebeeld van een zwaardere gevechtslading verder weg van het vliegtuig.

TNO beoordeelt daarom de stelling dat een lichtere gevechtslading de waargenomen schade kan hebben veroorzaakt als onwaarschijnlijk.