



Dedicated to innovation in aerospace

NLR-CR-2024-300 | januari 2025

Actualisatie ongevalgevolgen zware vastevleugelvliegtuigen

Ten behoeve van berekening externe-veiligheidsrisico's rond
burgerluchthavens

OPDRACHTGEVER: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat



Koninklijke NLR - Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum

Actualisatie ongevalgevolgen zware vastevleugelvliegtuigen

Ten behoeve van berekening externe-veiligheidsrisico's rond burgerluchthavens



Probleemstelling

Het externe-veiligheidsmodel voor luchthaven Schiphol en voor overige burgerluchthavens dat geïmplementeerd is in het GEVERS-pakket was opgezet in respectievelijk 2000 en 2002. In opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (Min. IenW) heeft het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) onlangs een review uitgevoerd op de Nederlandse rekenmethode externe veiligheid luchtvaart. Daaruit is gebleken dat een update in het rekenmodel noodzakelijk is gezien het feit dat de onderliggende gegevens gedateerd zijn.

RAPPORTNUMMER

NLR-CR-2024-300

Bescherming persoonlijke levenssfeer

RUBRICERING RAPPORT

ONGERUBRICEERD

DATUM

januari 2025

KENNISGEBIED(EN)

Luchtvaartveiligheid
Externe Luchtvaart
Veiligheid en
beleidsondersteuning

TREFWOORD(EN)

Ongevalgevolgen
Ongevalgevolgebied
Letaliteit
Externe Veiligheid
Debris area

Beschrijving van de werkzaamheden

In navolging van de conclusie en toetsing van het RIVM onderzoek heeft NLR in opdracht van Min. IenW de ongevalgevolgen voor zware vaste vleugelvliegtuigen van het civiele verkeer geactualiseerd met recentere gegevens. De ongevalgevolgen van het externe-veiligheidsmodel voor luchthavens behelzen ongevalgevolgebied en letaliteit. De actualisatie vindt plaats middels een verzameling en analyse van geselecteerde luchtvaartongevallen wereldwijd.

Resultaten en conclusies

Op basis van 149 datapunten is een nieuwe relatie afgeleid tussen het ongevalgevolgebied en het maximale startgewicht van een vliegtuig waarbij het ongevalgevolgebied wordt beschreven door een cirkelvormig gebied, en wordt berekend op de volgende manier:

$$\text{Ongevalgevolgebied [m}^2\text{]} = 65 \text{ [m}^2\text{/ton]} * \text{maximaal startgewicht [ton]}$$

De nieuwe relatie levert ten opzichte van de oorspronkelijke modellering een kleiner ongevalgevolgebied op, maar is robuuster omdat deze gebaseerd is op een grotere dataverzameling.

Op basis van 70 datapunten is de letaliteit geactualiseerd op 0,274. De nieuwe waarde is ten opzichte van die van het oorspronkelijke model nagenoeg gelijk. De nieuwe waarde voor letaliteit is nauwkeuriger bepaald omdat de basis van dataverzameling groter is.

Toepasbaarheid

De geactualiseerde parameters voor ongevalgevolgen van zware vaste vleugelvliegtuigen kunnen worden toegepast in de officiële berekening van externe veiligheidsrisico's van Schiphol en overige burgerluchthavens. Hiervoor dienen de waarden zoals opgenomen in de bijlage 2 van Regeling burgerluchthavens (Rbl) te worden vervangen met de gewijzigde waarden.

De nieuwe waarden mogen alleen worden toegepast met de toestemming van Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.

NLR

Anthony Fokkerweg 2

1059 CM Amsterdam

p) +31 88 511 3113

e) info@nlr.nl | www.nlr.nl



Dedicated to innovation in aerospace

NLR-CR-2024-300 | januari 2025

Actualisatie ongevalgevolgen zware vastevleugelvliegtuigen

Ten behoeve van berekening externe-veiligheidsrisico's rond
burgerluchthavens

OPDRACHTGEVER: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Bescherming persoonlijke levenssfeer



Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt, op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de eigenaar en/of opdrachtgever.

OPDRACHTGEVER	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
CONTRACTNUMMER	Opdrachtbrief 4500405194
EIGENAAR	NLR
NLR DIVISIE	Aerospace Operations
VERSPREIDING	Beperkt
RUBRICERING TITEL	ONGERUBRICEERD

GOEDGEKEURD DOOR:		
AUTEUR	REVIEWER	BEHERENDE AFDELING
<h1 style="color: red;">Bescherming persoonlijke levenssfeer</h1>		

Samenvatting

Het externe-veiligheidsmodel voor luchthaven Schiphol en voor overige burgerluchthavens dat geïmplementeerd is in het GEVERS-pakket was opgezet in respectievelijk 2000 en 2002. In opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (Min. IenW) heeft het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) onlangs een review uitgevoerd op de Nederlandse rekenmethode externe veiligheid luchtvaart. Daaruit bleek dat een update in het model noodzakelijk is gezien het feit dat de onderliggende gegevens mogelijk gedateerd zijn. In navolging van de conclusie en toetsing van het RIVM onderzoek heeft NLR in opdracht van Min. IenW de ongevalgevolgen voor zware vastevleugelvliegtuigen (vliegtuigen met een maximaal startgewicht van minstens 5.670 kg) van het civiele verkeer geactualiseerd met recentere gegevens.

De ongevalgevolgen in het externe-veiligheidsmodel voor luchthaven Schiphol en overige burgerluchthavens betreffen het ongevalgevolggebied en de letaliteit in het ongevalsgebied. Beide parameters zijn geactualiseerd voor zware vastevleugelvliegtuigen middels een verzameling en analyse van geselecteerde luchtvaartongevallen wereldwijd.

De update van het ongevalgevolggebied is gebaseerd op een verzameling van 149 datapunten van ongevallen. Met behulp van statistische analyses middels drie verschillende regressietesten is een nieuwe relatie bepaald tussen het ongevalgevolggebied en het maximale startgewicht van een vliegtuig. Van de drie uitkomsten is het besluit vanuit Min. IenW genomen om de conservatieve benadering van de relatie te kiezen, namelijk:

$$\text{Ongevalgevolggebied [m}^2\text{]} = 65 \text{ [m}^2\text{/ton]} * \text{maximaal startgewicht [ton]}$$

De nieuwe relatie levert ten opzichte van de oorspronkelijke modellering een kleiner ongevalgevolggebied op van 65m²/ton maximaal startgewicht versus de eerder bepaalde 83m²/ton maximaal startgewicht met robuustere relatie door de grotere omvang van dataverzameling.

Voor de update van de letaliteit zijn 70 valide datapunten verzameld. Op basis van de analyse van deze datapunten is de geactualiseerde waarde voor letaliteit bepaald als:

$$\text{Letaliteit} = 0,274$$

De nieuwe waarde is ten opzichte van die van het oorspronkelijke model nagenoeg gelijk (0,274 versus 0,278). De nieuwe waarde voor letaliteit is nauwkeuriger bepaald omdat de basis van dataverzameling groter is.

Er wordt voorgesteld om op termijn de geactualiseerde parameters voor ongevalgevolgen van zware vastevleugelvliegtuigen te introduceren voor gebruik in de berekening van externe-veiligheidsrisico's voor Schiphol en overige burgerluchthavens. Dit betekent voor luchthaven Schiphol dat de nieuwe modelparameters moeten opgenomen worden in het nieuw op te stellen rekenvoorschrift en voor overige burgerluchthavens betekent dit dat het voorschrift (bijlage 2, als bedoeld in artikel 5, van de Regeling burgerluchthavens) aangepast moeten worden.

De nieuwe modelparameters mogen alleen met de toestemming van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat toegepast worden in de officiële externe-veiligheidsberekeningen in het kader van m.e.r.-studies, Luchthavenverkeersbesluit (Schiphol), en luchthavenbesluiten burgerluchthavens.

Inhoudsopgave

Afkortingen	6
1 Inleiding	8
1.1 Achtergrond studie	8
1.2 Uitgangspunten studie	9
2 Huidige modellering ongevalgevolgen	10
2.1 Ongevalgevolggebied	10
2.2 Letaliteit	11
3 Databronnen en selectiecriteria	12
3.1 Databronnen	12
3.2 Data selectiecriteria	12
4 Datavergaring en analyse	14
4.1 Ongevalgevolggebied	14
4.2 Letaliteit	18
5 Resultaten en Bespreking	20
5.1 Ongevalgevolggebied	20
5.2 Letaliteit	27
6 Conclusies en Aanbevelingen	28
6.1 Conclusies	28
6.2 Aanbevelingen	28
7 Referenties	29
Appendix A Dataset Letaliteit	30

Afkortingen

ACRONIEM	OMSCHRIJVING
AAIB (Maleisië)	Air Accident Investigation Bureau
AAIB (VK)	Air Accident Investigation Branch
AAID (Zuid-Soedan)	Air Accident Investigation Department
AIB (Ghana)	Aircraft Accident and Incident Investigation and Prevention Bureau
AIB (Nigeria)	Accident Investigation Bureau
AMC (VS)	Air Mobility Command
ANSV (Italië)	Agenzia Nazionale per la Sicurezza del Volo
ASC (Taiwan)	Aviation Safety Council
ATSB (Australië)	Australian Transport Safety Bureau
BASI (Pakistan)	Bureau of Air Safety Investigation
BEA (Frankrijk)	Bureau d'Enquêtes et d'Analyses
CAAC (China)	Civil Aviation Administration of China
CAAN (Nepal)	Civil Aviation Authority of Nepal
CAO (Iran)	Civil Aviation Organization
CCAA (Kameroen)	Cameroon Civil Aviation Authority
CEIAA (Cuba)	Comisión Estatal de Investigación de Accidentes de Aviación
CENIPA (Brazilië)	Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos
DGAC (Mexico)	Dirección General de Aeronáutica Civil
GCAA (VAE)	General Civil Aviation Authority
GR	Groepsrisico
GRIAA (samenwerking van meerdere landen)	Grupo Investigación de Accidentes Aéreos
IAC (Gemenebest van Onafhankelijke Staten)	Interstate Aviation Committee
JIAAC (Argentinië)	Junta de Investigación de Accidentes de Aviación Civil
JTSB (Japan)	Japan Transport Safety Board
KTS	Kendall-Theil-Sen
LCAA (Libië)	Libyan Civil Aviation Authority
MAIB (Myanmar)	Myanmar Accident Investigation Bureau
m.e.r	Milieueffectrapportage
Min.IenW	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
MTOW	Maximum Take Off Weight, maximaal startgewicht
NLR	Royal NLR - Netherlands Aerospace Centre, Nederlands Lucht-en Ruimtevaartcentrum
NTSB (VS)	National Transportation Safety Board
NTSC (Indonesië)	National Transportation Safety Committee
OVV (Nederland)	Onderzoeksraad Voor Veiligheid

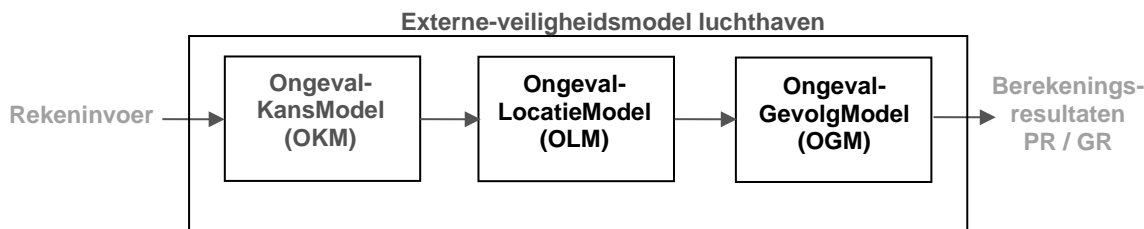
ACRONIEM	OMSCHRIJVING
PR	Plaatsgebonden Risico
Rbl	Regeling burgerluchthavens
RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
SACAA (Zuid-Afrika)	South African Civil Aviation Authority
SHK (Zweden)	Statens Haverikommission
SLR	Simple Linear Regression
TSB (Canada)	Transportation Safety Board
UAEAC (Colombia)	Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil

1 Inleiding

1.1 Achtergrond studie

Voor het berekenen van het externe-veiligheidsrisico voor luchthaven Schiphol en overige burgerluchthavens (zowel van nationale betekenis als van regionale betekenis), dient er gebruik te worden gemaakt van het GEVERS-pakket dat voldoet aan de daarvoor geldende rekschriften. Voor luchthaven Schiphol wordt doorgaans verwezen naar de NLR rekenmethodiek voor grote luchthavens uit het rapport “Voorschrift en procedure voor de berekening van Externe Veiligheid rond luchthavens”, NLR-CR-2004-083 [Ref. 1]¹, aangezien het wettelijke voorschrift voor het berekenen van externe-veiligheidsrisico's in geval van berekeningen ten behoeve van milieueffectrapportage (m.e.r.) studies en gebruiksprognoses nog opgesteld worden. Voor overige burgerluchthavens is Bijlage 2 van Regeling burgerluchthavens (Rbl) van toepassing.

Een externe-veiligheidsmodel voor luchthaven bestaat uit drie modelonderdelen (Figuur 1-1), te weten: Ongevalkansmodel (OKM)², Ongevallocatiemodel (OLM) en Ongevalgevolgmodel (OGM). De rekenmodellen voor luchthaven Schiphol en overige burgerluchthavens zijn recentelijk geactualiseerd voor het onderdeel Ongevalkansen van vastevleugelvliegtuigen. Aangezien er geen actualisatie is geweest voor de onderdelen Ongevallocaties en Ongevalgevolgen van Schiphol (sinds 2000, Ref. 1) en die van overige burgerluchthavens (sinds 2002, Ref. 2) en de onderliggende gegevens behoorlijk verouderd kunnen zijn (meer dan 20 jaar oud), bestaat daarom de beleidsbehoefte om die onderdelen te updaten.



Figuur 1-1: Schematische voorstelling van externe-veiligheidsmodel voor luchthaven

In opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (hierna: Min. IenW) heeft het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) onlangs een review uitgevoerd op de Nederlandse rekenmethode externe veiligheid luchtvaart (Ref. 4). Daarin wordt onder meer geconcludeerd dat de ongevalgevolgen van vastevleugelvliegtuigen niet recent herzien zijn en daardoor mogelijk niet meer aansluiten bij de huidige situatie.

In navolging van de conclusie en toetsing van het RIVM onderzoek heeft het NLR in opdracht van Min. IenW de ongevalgevolgen van het vliegverkeer met zware vastevleugelvliegtuigen geactualiseerd met recentere gegevens. De nieuw te actualiseren ongevalgevolgen kunnen worden toegepast in de berekening van externe-veiligheidsrisico's voor het zware vliegverkeer van civiele luchthavens (Schiphol en overige burgerluchthavens).

¹ met uitzondering van de ongevalkansen voor derde-generatie vliegtuigen aangeziene ongevalkansen voor deze vliegtuigen zijn geactualiseerd.

² In dit rapport wordt gekozen om de schrijfwijze zonder 's' te gebruiken voor ongeval(s)kans, ongeval(s)locatie, ongeval(s)gevolgen en ongeval(s)type om aan te sluiten bij de officiële bewoording zoals gehanteerd in Regeling burgerluchthavens (Rbl).

1.2 Uitgangspunten studie

Voor het onderhavig onderzoek worden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

1. De wijze van afleiding dient (zoveel mogelijk) aan te sluiten bij de wijze die gehanteerd was in de oorspronkelijke opzet van het EV-model voor luchthaven (Ref. 2);
2. De focus is gelegd op zware vaste-vleugelvliegtuigen. Deze betreffen vliegtuigen met een maximaal startgewicht (MTOW) van 5.670 kg of hoger. Dit betreft bijvoorbeeld passagierstransport, vrachtvervoer, of ferry-vluchten. Dit kunnen civiele vliegtuigen maar ook militaire transportvliegtuigen zijn zolang er geen wapens en/of explosieven vervoerd werden; en
3. De ongevalgevolgen bestaan uit twee componenten: ongevalgevolggebied en letaliteit.

Leeswijzer

Dit rapport is als volgt georganiseerd: Na de inleiding (Hoofdstuk 1) wordt in Hoofdstuk 2 kort ingegaan op de definitie van ongevalgevolgen in termen van ongevalgevolggebied en letaliteit. Hoofdstuk 3 betreft gebruikte databronnen voor de actualisatie van ongevalgevolgen en de gehanteerde selectiecriteria. Hoofdstuk 4 presenteert de verkregen sets van ongevallen voor ongevalgevolggebied en letaliteit. Hoofdstuk 5 is gewijd aan de bepaling van ongevalgevolgen, inclusief een bespreking van de resultaten. Als afsluiting van het rapport geeft Hoofdstuk 6 de conclusies en enkele aanbevelingen ten aanzien van de resultaten.

2 Huidige modellering ongevalgevolgen

De ongevalgevolgen zijn de effecten (gevolgen) van een vliegtuigongeval op een locatie. De ongevalgevolgen in de modellering van externe veiligheid worden beschreven door twee componenten: het ongevalgevolgebied en de letaliteit. Dit hoofdstuk geeft een korte beschrijving van de huidige modellering van de ongevalgevolgen.

2.1 Ongevalgevolgebied

In de Regeling burgerluchthavens (Rbl), bijlage 2, wordt de definitie van het ongevalgevolgebied gegeven als volgt: *“Het gebied waarbinnen de gevolgen van een ongeval met een luchtvaartuig potentieel dodelijk zijn.”*

Voor het afleiden van het ongevalgevolgebied worden gegevens gebruikt uit verschillende databronnen. Belangrijk zijn de officiële ongevalsrapportages en daarnaast de digitale databases met informatie over vliegtuigongevallen (zie Hoofdstuk 3 voor detail). In de databronnen wordt deze informatie vaak aangeduid met termen als ‘Crash area’, ‘Debris area’ of ‘Wreckage information’.

Opgemerkt wordt dat in de literatuur, naast de term ‘Crash area’, ook gebruik wordt gemaakt van de term ‘Consequence area’. Het is belangrijk om het verschil tussen deze twee termen te noemen. De ‘Crash area’ is het gebied dat getroffen wordt door de directe inslag van het vliegtuig. De afmeting van dit gebied wordt, onder meer, beïnvloed door de grootte van het vliegtuig, crash kinetica (inslaghoek en -snelheid) en de terreingesteldheid (open, bebouwd, bebost, enz.). De ‘Consequence area’ van een vliegtuigongeval betreft niet alleen het gebied van de directe impact, maar ook het oppervlak waarbinnen effecten dodelijk kunnen zijn voor mensen op de grond, zoals door de verspreiding van brokstukken van het vliegtuigwrak. In sommige databronnen wordt de term ‘Debris area’ gebruikt voor het gebied waarbinnen de brokstukken van het vliegtuigwrak zich bevinden en verspreiden.

Ongevalgevolgebied is binnen de context van externe-veiligheid voor luchthaven/luchtvaart een modelparameter en is een resultaat van een (statistische) analyse van een verzameling ‘Crash area’ of ‘Debris area’ datapunten. Het ongevalgevolgebied voor zware vastevleugelvliegtuigen wordt gemodelleerd als een cirkelvormig gebied waarbij de grootte afhankelijk is van de afmeting van een vliegtuig. De afmeting van een vliegtuig wordt in de huidige modellering bepaald op basis van het maximaal startgewicht. Het ongevalgevolgebied werd tot op heden beschreven door het lineaire verband als volgt:

$$\text{Ongevalgevolgebied [m}^2\text{]} = 83 \text{ [m}^2\text{/ton]} * \text{maximaal startgewicht [ton]}$$

Voorbeeld: een groot passagiersvliegtuig in de klasse van Boeing 747 met een maximaal startgewicht van 400 ton (een metrische ton is 1.000 kilogram) heeft een ongevalgevolgebied van 33.200 m² (=3,32 hectare, waarbij een hectare 100 bij 100 meter is). Dit gebied wordt in de berekening gegeven als een cirkel met een straal (radius) van bijna 103 meter.

2.2 Letaliteit

In de Regeling burgerluchthavens (Rbl), bijlage 2, wordt de definitie van de letaliteit gegeven als volgt:

“De fractie mensen buiten het luchtvaartuig, maar binnen het ongevalgevolgebied, dat bij een ongeval met een luchtvaartuig overlijdt.”

De letaliteit is een modelparameter en wordt bepaald door de ratio tussen het aantal slachtoffers op de grond en het totaal aantal aanwezigen op de grond binnen het ongevalgevolgebied. Evenals het ongevalgevolgebied worden voor het afleiden van de letaliteit gegevens ontleend aan de officiële ongevalsrapportages. De hiervoor benodigde informatie is het gerapporteerde aantal slachtoffers en gewonden op de grond, en het geschat aantal overige aanwezigen op de grond binnen het ‘Crash area’.

$$\text{Letaliteit} = \frac{\# \text{slachtoffers}}{(\# \text{slachtoffers} + \# \text{gewonden} + \# \text{overige aanwezigen})}$$

Het aantal slachtoffers en gewonden op de grond ligt vastgelegd in de officiële ongevalsrapportages. Voor het bepalen van aantal personen aanwezig op de grond binnen het gebied van de vliegtuigcrash, wordt gebruik gemaakt van beschrijvingen, beeldmaterialen van (video)camera’s en schetsen die in de rapportage staan vermeld en weergegeven.

Voor de bepaling wordt eveneens gekeken naar het type en aantal (bouw)objecten zoals woningen, scholen, campers, auto’s, enz. welke informatie kunnen leveren over het mogelijke aantal personen. Ook het tijdstip (dag of nacht) waarop het ongeval plaatsvindt kan eveneens een invloed hebben op de schatting van de aantallen.

De letaliteit voor de zware vastevleugelvliegtuigen in het huidige EV-model is bepaald op 0,278. Dat betekent dat de kans dat iemand overlijdt op de grond als gevolg van een vliegtuigongeval binnen het ongevalgevolgebied tot op heden ongeveer 28% is.

3 Databronnen en selectiecriteria

3.1 Databronnen

Om de update van het ongevalgevolgebied en de letaliteit mogelijk te maken zijn ongevalsgegevens verzameld uit de ongevalsrapporten van de volgende officiële onderzoeksautoriteiten en veiligheidsraden over de periode 1999 tot en met 2023. Tabel 3-1 geeft een overzicht van de gebruikte bronnen.

Tabel 3-1: Geraadpleegde databronnen voor ongevalsrapportages

AAIB (Maleisië)	CAAC (China)	JTSB (Japan)
AAIB (VK)	CAAN (Nepal)	LCAA (Libië)
AAID (Zuid-Soedan)	CAO (Iran)	MAIB (Myanmar)
AIB (Ghana)	CCAA (Kameroen)	Ministry of Civil Aviation (India)
AIB (Nigeria)	CEIAA (Cuba)	NTSB (VS)
AMC (VS)	CENIPA (Brazilië)	NTSC (Indonesië)
ANSV (Italië)	DGAC (Mexico)	OVV (Nederland)
ASC (Taiwan)	GCAA (VAE)	SACAA (Zuid-Afrika)
ATSB (Australië)	GRIAA (samenwerking van meerdere landen)	SHK (Zweden)
BASI (Pakistan)	IAC (Gemenebest van Onafhankelijke Staten)	TSB (Canada)
BEA (Frankrijk)	JIAAC (Argentinië)	UAEAC (Colombia)

Deze data worden samen met de bestaande dataset zoals gebruikt in het oorspronkelijke model beschouwd in de bepaling van ongevalgevolgen. De dataset van de oorspronkelijke modellering loopt tot en met 1998.

Naast de officiële databronnen is ook informatie uit de media en van openbare digitale bronnen gebruikt, bijvoorbeeld de website Aviation Safety Network (ASN). Vaak gaat het hier om foto's van de ongevalslocatie in combinatie met een beschrijving van het ongeval. De ASN website bevat veelal links naar mediabronnen maar soms ook links naar de beschikbare officiële rapporten. Er moet erbij vermeld worden dat sommige links na verloop van tijd niet meer kunnen werken doordat de referentie naar die rapportages gewijzigd wordt.

3.2 Data selectiecriteria

De selectie van de bruikbare ongevallen voor de vaststelling van ongevalgevolgen vindt plaats op basis van volgende criteria:

1. Het vastevleugelvliegtuig moet een maximaal startgewicht hebben van minstens 5.670 kilogram;
2. Het ongeval moet gerelateerd zijn aan een luchthaven in één van de volgende vluchtfases:
 - a. Start
 - b. Initiële klim
 - c. Klim naar kruisvlucht
 - d. Daling
 - e. (eind) nadering
 - f. Landing
 - g. Go-around
 - h. Kruisvlucht / en-route tot beperkte afstand na de klim naar kruisvlucht of vóór de daling.

3. Buiten beschouwing zijn:
- a. Ongevallen als gevolg van sabotage, terroristisch aanslag, kaping ('hijack') en zelfmoordactie;
 - b. Ongevallen tijdens een air show of vluchtdemonstratie (bijv. het Shoreham airshow-ongeval³ in het Verenigd Koninkrijk in 2015);
 - c. Ongevallen met militaire vliegtuigtypes die wapens en/of explosieven vervoerden;
 - d. Ongevallen door botsing in de lucht;
 - e. Ongevallen als gevolg van een explosie;
 - f. Ongevallen waarbij brokstukken in het water terecht zijn gekomen.

De achterliggende redenering hier is dat ongevallen als gevolg van sabotage, terroristische aanslag, kaping en zelfmoordacties niet representatief zijn voor externe-veiligheidsrisico's omdat deze met opzet zijn veroorzaakt. Ongevallen tijdens een air show of vluchtdemonstratie zijn atypische vluchten waar anders wordt omgegaan met het vliegtuig dan tijdens een civiele vlucht. Ongevallen door een botsing in de lucht of als gevolg van een explosie in de lucht veroorzaken dusdanig grote spreiding van grote en kleine brokstukken dat de afmeting van het ongevalsgebied niet meer te achterhalen valt. Militaire vliegtuigen die wapens en/of explosieven vervoerden werden uitgesloten van de bepaling van ongevalgevolgen gezien de reële kans dat lading is ontploft en daarmee invloed heeft gehad op de grootte van het brokstukkengebied. Brokstukken die in het water terecht zijn gekomen, kunnen zich verspreiden door de stroming wat het brokstukkengebied niet representatief maakt.

³ Op 22 augustus 2015 crashte een Hawker Hunter militair toestel tijdens een airshow in Shoreham waarbij elf weggebruikers en omstanders overleden als gevolg. Verder zijn dertien mensen gewond geraakt, waaronder de piloot zelf.

4 Datavergaring en analyse

Dit hoofdstuk legt uit hoe de update van het ongevalgevolgebied en de letaliteit is bepaald. Een totaal van 97 relevante ongevallen werd verzameld. Niet elk datapunt kon gebruikt worden voor het bepalen van het ongevalgevolgebied of de letaliteit omdat de nodige gegevens onvoldoende/niet gedocumenteerd waren.

4.1 Ongevalgevolgebied

Voor elk datapunt werd het volgende bepaald:

- Grootte van het gebied waarbinnen de brokstukken van het vliegtuigwrak zich bevinden en verspreiden, 'debris area';
- De spanwijdte van het vliegtuig;
- Het maximale startgewicht van het vliegtuig; en
- Het type terrein waarin het vliegtuig is neergestort (open terrein of bebouwd/met obstakels).

De grootte van het brokstukkengebied werd geschat op basis van de verdeling van de grotere onderdelen van het vliegtuig. Kleine vliegtuigonderdelen, zoals bijvoorbeeld schroeven, werden niet meegenomen. Indien beschikbaar, werd de grootte van het brokstukkengebied geschat op basis van een foto of tekening van de ongevalslocatie.

Dit werd gedaan door een herkenbaar brokstuk (bijvoorbeeld het horizontale staartvlak) te identificeren, de grootte hiervan te achterhalen via de website van de vliegtuigfabrikant en dit te relateren aan de rest van de brokstukken.

In Figuur 4-1 is een voorbeeld gegeven van hoe het brokstukkengebied wordt bepaald met behulp van een luchtfoto.



Figuur 4-1: Voorbeeld van het bepalen van het brokstukkengebied aan de hand van een foto

Het bepalen van de grootte en afmeting van het brokstukkengebied werkt het best wanneer er een foto van bovenaf beschikbaar is of wanneer een schets is bijgevoegd in de informatie. Foto's die vanaf een invalshoek zijn genomen, geven een iets minder accurate oppervlakte-informatie maar kunnen nog steeds gebruikt worden voor het inschatten van het gebied. Indien mogelijk worden de coördinaten van de ongevalslocatie opgezocht op Google Maps en werden deze geverifieerd en vergeleken met de foto's. Dit is enkel mogelijk wanneer er duidelijke herkenningspunten zijn waarvan de grootte en afmeting kon worden afgeleid met de aanwezige schaal in Google Maps. Deze methode is dus niet toepasbaar voor een ongeval in een veld, maar wel in een bebouwd gebied zoals een woonwijk waar bijvoorbeeld een specifiek object (zoals een huis) herkend kan worden.

Wanneer er geen grafische weergave van de situatie beschikbaar is, wordt het ongevalsrapport onderzocht op aanwijzingen voor de grootte van het gevolgebied. Dit resulteert echter soms in sterk afwijkende waarden, zie Tabel 4-1. Het ongevalgevolgebied van deze datapunten is uit hun respectievelijk ongevalsrapport gehaald.

Tabel 4-1: Besproken datapunten met afwijkende waardes

Maximaal startgewicht [ton]	Spanwijdte [m]	Ongevalgevolgebied [m ²]	Type terrein
21,86	19,61	100.000	Niet-bebouwd
78,32	34,31	194.955	Niet-bebouwd
400	64,4	356	Niet-bebouwd
77	35,8	100	Bebouwd/met obstakels

Rij 1 en 2 in Tabel 4-1 tonen gebieden die een stuk hoger liggen dan men zou verwachten. Het verschil in grootte van het ongevalsgevolgebied kan mede zijn veroorzaakt doordat een andere definitie gehanteerd werd van het brokstukkengebied, waar ook kleine vliegtuigonderdelen meegenomen werden in de bepaling van het gebied. Deze datapunten bleken een relatief grote impact te hebben op de relatie tussen het startgewicht en het ongevalgevolgebied, zoals geïllustreerd wordt in het volgende hoofdstuk. Gecombineerd met de mogelijkheid dat deze afwijkende waardes zijn veroorzaakt door een andere definitie, is de beslissing genomen om deze niet mee te nemen in verdere analyse.

Er werden ook een aantal datapunten gevonden waar het ongevalsgebied een stuk lager lag dan verwacht op basis van het maximaal startgewicht, bijvoorbeeld in de derde rij in Tabel 4-1. Deze oppervlaktes werden afgeleid aan de hand van foto's en zijn dus niet veroorzaakt door een afwijkende definitie van het brokstukkengebied maar waarschijnlijk eerder door de inslaghoek. Omdat een variatie in inslaghoek in de realiteit nu eenmaal voorkomt, is de beslissing genomen deze datapunten *niet* te verwijderen. Het datapunt in de vierde rij in Tabel 4-1: Besproken datapunten met afwijkende waardes. lijkt ook een onevenredig klein ongevalgevolgebied te hebben tegenover de grootte en het gewicht van het vliegtuig maar dit datapunt geeft weer hoe bebouwing het oppervlakte van het ongevalgevolgebied beperkt.

In verschillende gevallen werd het gevolgebied berekend door de spanwijdte van het vliegtuig te vermenigvuldigen met de gemelde slipafstand (de afstand die het vliegtuig op de grond heeft afgelegd tot het tot stilstand kwam). Het was niet altijd mogelijk om een redelijke oppervlakte te bepalen. In sommige gevallen was de documentatie van het ongeval onvoldoende om de afmetingen van het gebied te reconstrueren. Deze datapunten werden dan ook uitgesloten. Voor 17 ongevallen konden geen foto's noch een rapport gevonden worden, deze ongevallen konden dus niet gebruikt worden.

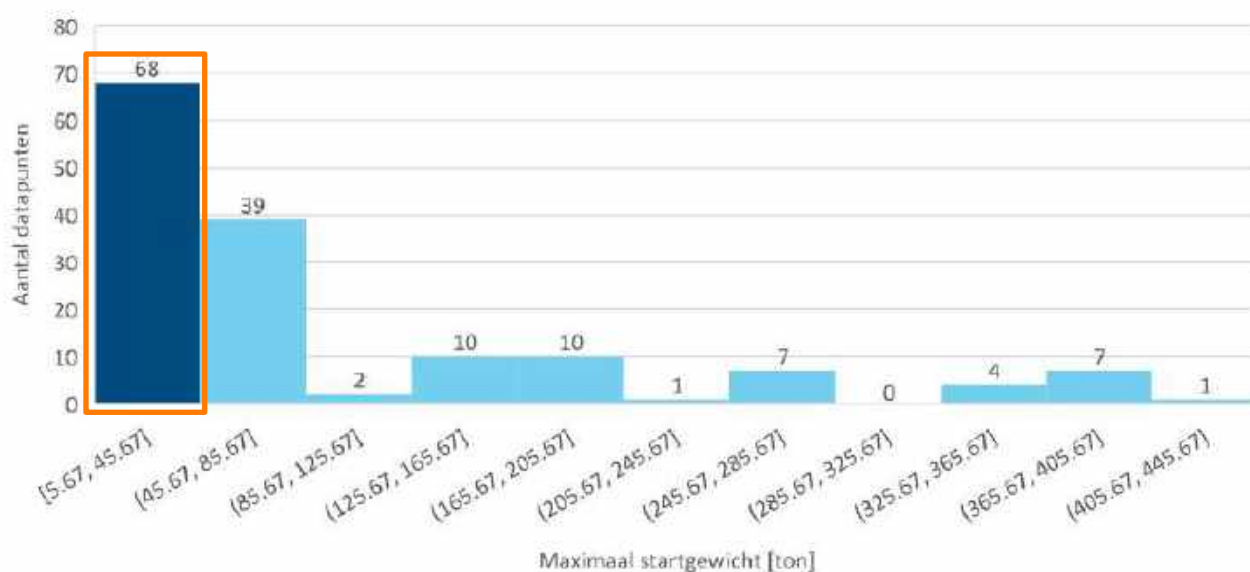
Een samenvatting van het aantal datapunten die gebruikt zijn in het bepalen van een relatie voor het ongevalgevolggebied is gegeven in Tabel 4-2. De dataset is samengesteld uit de set van het oorspronkelijke model (toegepast in 2000 en 2002) en de voor deze studie nieuw verzamelde data.

Tabel 4-2: Het aantal gebruikte datapunten per type terrein voor het bepalen van het ongevalgevolggebied

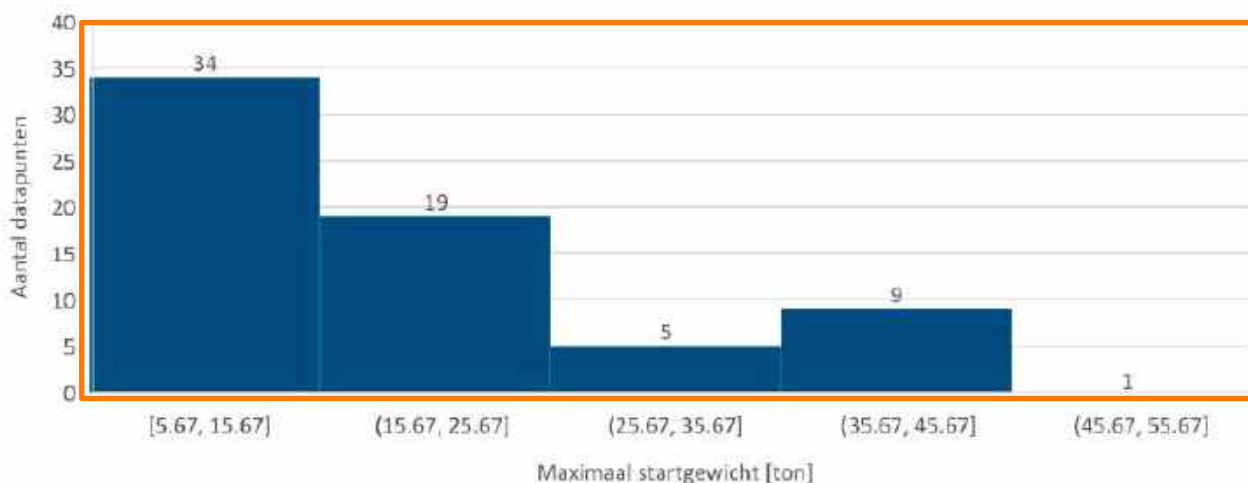
Dataset	Terrein		Totaal (dataset)
	Open	Bebouwd/met obstakels	
Oorspronkelijk	43	28	71
Nieuw	45	33	78
Totaal (terrein)	88	61	149

Een onderscheid is gemaakt tussen vliegtuigen die neer zijn gestort in bebouwd en niet-bebouwd gebied omdat dit impact kan hebben op de grootte van het ongevalgevolggebied. De aanwezigheid van obstakels (gebouwen, bomen etc.) zorgt ervoor dat de brokstukken zich minder ver kunnen verspreiden waardoor het gebied compacter kan zijn. In een open gebied wordt de kinetische energie die vrijkomt bij een crash niet gedempt en kan het gebied groter zijn. Er zijn echter geen harde criteria gedefinieerd over wanneer een terrein open of bebouwd/met obstakels is. Dit onderscheid wordt gemaakt per ongeval op basis van kwalitatieve beoordeling. Voorbeeld: een start- en landingsbaan wordt gezien als niet-bebouwd, terwijl een autoweg zowel als open (bijv. een snelweg tussen velden) als bebouwd (bijv. een weg in een stad) kan worden beschouwd.

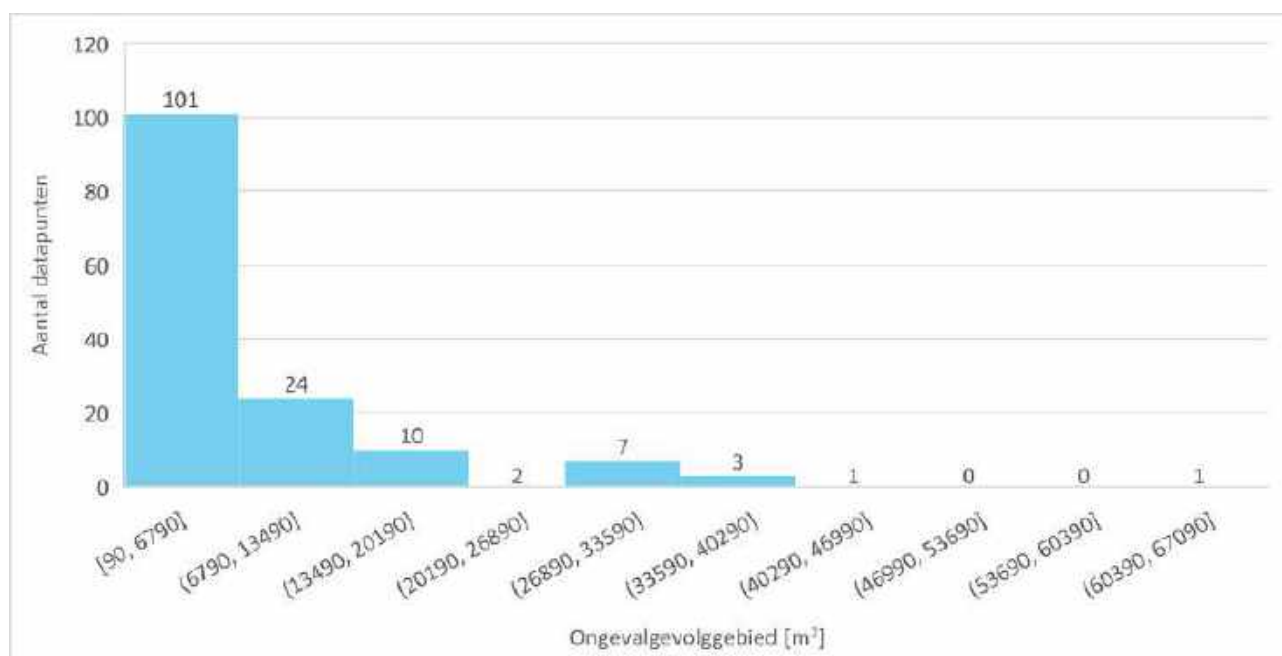
Figuur 4-2 en Figuur 4-3 tonen de verdeling van het maximale startgewicht van de vliegtuigen gebruikt voor het bepalen van het ongevalgevolggebied. Uit deze verdeling is duidelijk te zien dat de dataset wordt gedomineerd door vliegtuigen met een relatief laag startgewicht, waarbij 68 van de 149 vliegtuigen een startgewicht hebben van minder dan 45,67 ton, waarvan nog eens de helft minder dan 15,67 ton. De reden voor de 'dominantie' van deze vliegtuigen ligt waarschijnlijk in het feit dat er meer bewegingen zijn van dit type tegenover de relatief zwaardere vliegtuigen. Met een Shapiro-Wilk test (met 95% significantie), werd bevestigd dat de maximale startgewichten van de gebruikte datapunten niet normaal verdeeld zijn. Hetzelfde is gebleken voor de verdeling van de ongevalgevolgebieden, wat ook zichtbaar is in Figuur 4-4.



Figuur 4-2: Verdeling van het maximale startgewicht van alle (oorspronkelijke en nieuwe) gebruikte datapunten



Figuur 4-3: Verdeling van het maximale startgewicht van alle gebruikte datapunten onder 45,67 ton



Figuur 4-4: Verdeling van de ongevalgevolgebieden van alle gebruikte datapunten

Er is nog gekeken of een normale verdeling van de data kon worden gevonden in een kleiner stuk van de dataset, namelijk in het stuk waar de meest populaire vliegtuigmodellen zich bevinden. De meest populaire vliegtuigmodellen in commerciële luchtvaart in Europa zijn de A320 en B737 (uitgezonderd de B737 MAX 8) families, waarvan het startgewicht tussen de 46 en 79 ton zit. Verschillende opties zijn getest op normaliteit: maximaal startgewicht onder 100 ton, onder 80 ton en tussen 46 en 79 ton en hun respectievelijke ongevalgevolgebieden. Geen van deze opties (noch het startgewicht, noch het ongevalgevolgebied) waren normaal verdeeld.

Een simpel lineair regressiemodel (SLR) gaat uit van een normale verdeling van de data en gebruikt het gemiddelde en de standaardafwijking van de datapunten tegenover dat gemiddelde om de richtingscoëfficiënt van de regressielijn te berekenen. Dit zorgt er ook voor dat afwijkende waardes sterk meegenomen worden in de berekening van de richtingscoëfficiënt. Een Kendall-Theil-Sen (KTS) regressie zou hier gepast zijn gezien die niet de aanname maakt dat de data normaal verdeeld hoeft te zijn.

In het volgende hoofdstuk wordt het verband tussen startgewicht en ongevalgevolggebied bepaald met SLR en KTS, en de uitkomsten daarvan worden vergeleken. In de oorspronkelijke modellering (Ref. 2) werd een constante (snijpunt met de y-as) van 0 gebruikt en een regressielijn van $y = m \cdot x$ berekend. Dit onderzoek zal ook afwegen of een andere constante beter geschikt is, en een regressielijn van $y = m \cdot x + b$ dus meer geschikt is om het verband tussen grootte van ongevalgevolggebied en vliegtuiggewicht te benaderen.

4.2 Letaliteit

Voor de letaliteit zijn 43 nieuwe datapunten gevonden die voldoende informatie bevatten. Dit aantal ongevallen is meer dan hetgeen is onderzocht in de oorspronkelijke modellering in 2000 (Ref. 2). Dit betekent echter niet dat de ratio van ongevallen met externe slachtoffers hoger is dan in het oorspronkelijke onderzoek. Het aantal vliegbewegingen is namelijk enorm gestegen. Bovendien is bij het verzamelen van datapunten meer nadruk gelegd op het vinden van ongevallen met externe slachtoffers om zo de letaliteit accurater te kunnen bepalen gezien het beperkte aantal datapunten voor de letaliteit in het oorspronkelijke model.

Zoals eerder vermeld is de letaliteit de ratio van het aantal dodelijke slachtoffers op de grond en ten opzichte van het aantal aanwezigen binnen het vliegtuigongevalsgebied (crash-gebied). Het minimale aantal aanwezigen is het aantal dodelijke slachtoffers op de grond plus het aantal gewonden op de grond. In een ongevalsrapport staan deze getallen onder 'Injuries to Persons' vermeld. Echter is dit mogelijk niet het echte totale aantal mensen dat aanwezig was in het crash-gebied. Gezien het feit dat het aantal daadwerkelijk aanwezigen niet of nauwelijks in rapporten wordt vermeld, werd er gekeken naar de volgende aspecten of hints op aanwezigen:

- De plaats van het ongeval: het land, dicht- of dunbevolkt gebied, snelweg, hotel etc.;
- Wat er beschadigd is geraakt. Dit staat in rapporten onder 'Other Damage'. Sommige rapporten kunnen meer details bevatten over het aantal geraakte objecten (bijv. drie huizen) dan in andere rapporten (bijv. verschillende huizen); en
- Tijdstip van de crash en op welke dag van de week. Overdag zijn minder mensen aanwezig in een huis dan 's nachts. Bij een ongeval op een bedrijfslocatie werd gekeken of dit in de week of het weekend is gebeurd.

Op basis van deze aspecten en de volgende aannames, werd een schatting gemaakt van het aantal aanwezigen in het ongevalsgebied:

- In een auto zijn twee mensen aanwezig;
- Op een motor zit één persoon;
- Overdag zijn twee mensen aanwezig in huis; en
- 's Nachts is het aantal aanwezigen gelijk aan het gemiddelde aantal personen per huishouden voor het land waarin het ongeval gebeurd is.

In een aantal gevallen was het niet mogelijk om een schatting te maken van het aantal aanwezigen. Voor deze datapunten werd de keuze gemaakt om enkel te kijken naar het aantal dodelijke slachtoffers plus het aantal gerapporteerde gewonden. Tijdens het vergaren van de data is besloten een aantal ongevallen, zie Tabel 4-3, niet mee te nemen in de dataset voor het bepalen van de letaliteit omdat die niet representatief zijn voor de situatie in Nederland. Bij deze ongevallen schoot een vliegtuig voorbij de landingsbaan waarna het terecht kwam in een drukke markt vlak bij de luchthaven.

Tabel 4-3: Datapunten die niet zijn gebruikt voor het bepalen van de letaliteit wegens niet-representatief zijn voor de Nederlandse situatie

Locatie / Land	Jaar	Luchtvaartmaatschappij	Aantal slachtoffers
Goma, Democratische Republiek Congo	2008	Hewa Bora Airways	37
Kinshasa, Democratische Republiek Congo	2007	Africa One	30
Boende, Democratische Republiek Congo	2003	Force Aérienne Congolaise	13

In de oorspronkelijke dataset zijn ook een aantal aanpassingen doorgebracht:

- Het ongeval in Lockerbie van 14 december 1988 werd verwijderd omdat dit van terroristische aard was;
- Het ongeval in Goussainville van 3 juni 1973 werd verwijderd omdat dit tijdens een airshow gebeurde;
- Het ongeval in Fairview van 10 november 1985 werd verwijderd omdat dit werd veroorzaakt door een botsing in de lucht;
- Het ongeval Cerritos van 31 augustus 1986 werd verwijderd omdat dit werd veroorzaakt door een botsing in de lucht; en
- Het aantal dodelijke slachtoffers in de Bijlmerramp van 4 oktober 1992 is gecorrigeerd van 43 naar 39 (conform het officieel gedocumenteerde cijfer).

Het aantal datapunten dat uiteindelijk werd gebruikt om de letaliteit te bepalen is samengevat in Tabel 4-4.

Tabel 4-4: Het aantal gebruikte datapunten per type terrein voor het bepalen van de letaliteit

Dataset	Terrein		Totaal (dataset)
	Open	Bebouwd/ met obstakels	
Oorspronkelijk	5	22	27
Nieuw	11	32	43
Totaal (terrein)	16	55	70

De open gebieden waar slachtoffers zijn gevallen waren voornamelijk wegen. Bij deze datapunten was het extra moeilijk om te bepalen hoeveel mensen aanwezig waren gezien de dynamische omgeving. Een voertuig kon namelijk net ontsnapt zijn aan de vliegtuigcrash. Voor deze datapunten is dus enkel gekeken naar de gerapporteerde schade aan voertuigen en op basis daarvan is een schatting gemaakt voor het aantal aanwezigen.

5 Resultaten en bespreking

5.1 Ongevalgevolggebied

Zoals eerder aangegeven, werd de relatie tussen ongevalgevolggebied en maximaal startgewicht op verschillende manieren onderzocht:

1. Simpele Lineaire Regressie (SLR) met relatie $y = a \cdot x$ (snijpunt door $y = 0$), zie Figuur 5-3;
2. SLR met relatie $y = a \cdot x + b$, zie Figuur 5-4; en
3. Kendall-Theil-Sen (KTS) met relatie $y = a \cdot x + b$, zie Figuur 5-5.

Deze mogelijkheden zullen worden besproken en uiteindelijk zal worden beargumenteerd welke hiervan het meest toepasselijk en 'correct' is in de context van dit rapport.

Enkele termen die in deze sectie zullen worden gebruikt, worden kort hier toegelicht:

- **Regressielijn:** Een regressielijn is een wiskundige benadering van de relatie tussen twee of meer variabelen, waarbij de waarde van één variabele (de afhankelijke variabele, hier ongevalgevolggebied) wordt voorspeld op basis van de waarden van één of meer andere variabelen (de onafhankelijke variabelen, hier het maximaal startgewicht). De nauwkeurigheid van de voorspelling hangt af van de kwaliteit van de data en de complexiteit van de relatie tussen de variabelen.
- **R-squared (R^2):** R^2 is een statistische maatstaf die aangeeft hoe goed een model de variatie in de afhankelijke variabele kan verklaren. Het wordt gebruikt om de kwaliteit van een lineaire regressie-analyse te beoordelen, waarbij een waarde van 0 betekent dat het model de variatie in de afhankelijke variabele niet verklaart en een waarde van 1 volledig verklaart. R-squared is niet noodzakelijk een perfecte maatstaf voor de kwaliteit van een model, omdat het ook kan worden beïnvloed door andere factoren zoals de steekproefgrootte en de aanwezigheid van afwijkende waarden. Het geeft ook een verkeerde indicatie wanneer de data een systematische afwijking hebben.
- **Kendall's τ :** Gelijkwaardig aan R^2 maar voor een KTS regressie.
- **Betrouwbaarheidsinterval:** In dit geval wordt het betrouwbaarheidsinterval van de regressielijn bedoeld wat aangeeft hoe zeker men kan zijn over de voorspellingen die worden gedaan voor de verschillende waarden van de onafhankelijke variabele. Het betrouwbaarheidsinterval geeft aan dat er met een bepaalde mate van zekerheid (bijvoorbeeld 95%) kan worden gesteld dat de werkelijke waarde van de afhankelijke variabele binnen dit interval ligt.
- **Voorspellingsband:** Een voorspellingsband is een statistische techniek die wordt gebruikt om een interval te bepalen waarbinnen een nieuwe waarneming met een bepaalde mate van zekerheid ligt. Het is een interval rondom de regressielijn dat aangeeft hoe groot de onzekerheid is over de voorspellingen. De voorspellingsband geeft aan hoe groot de kans is dat een nieuwe waarneming binnen dit interval ligt.

SLR en KTS zijn beide statistische methoden die worden gebruikt om de relatie tussen twee variabelen te analyseren, maar er is een aantal verschillen tussen deze twee methoden:

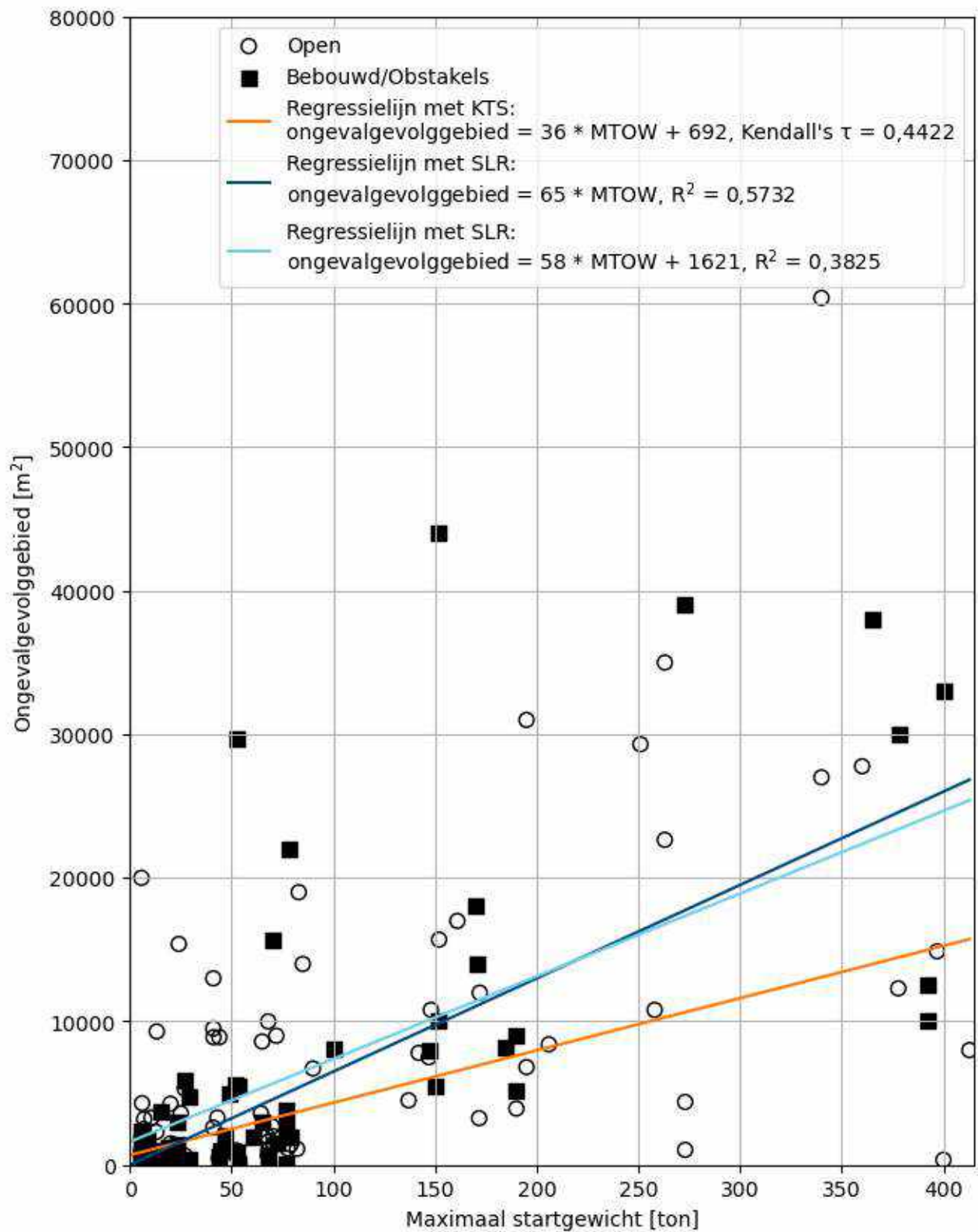
Simpele Lineaire Regressie

- Veronderstelt dat de data normaal verdeeld is;
- Is gevoelig voor afwijkende en extreme waarden; en
- Kan worden beïnvloed door niet-lineaire relaties tussen de variabelen.

Kendall-Theil-Sen Regressie

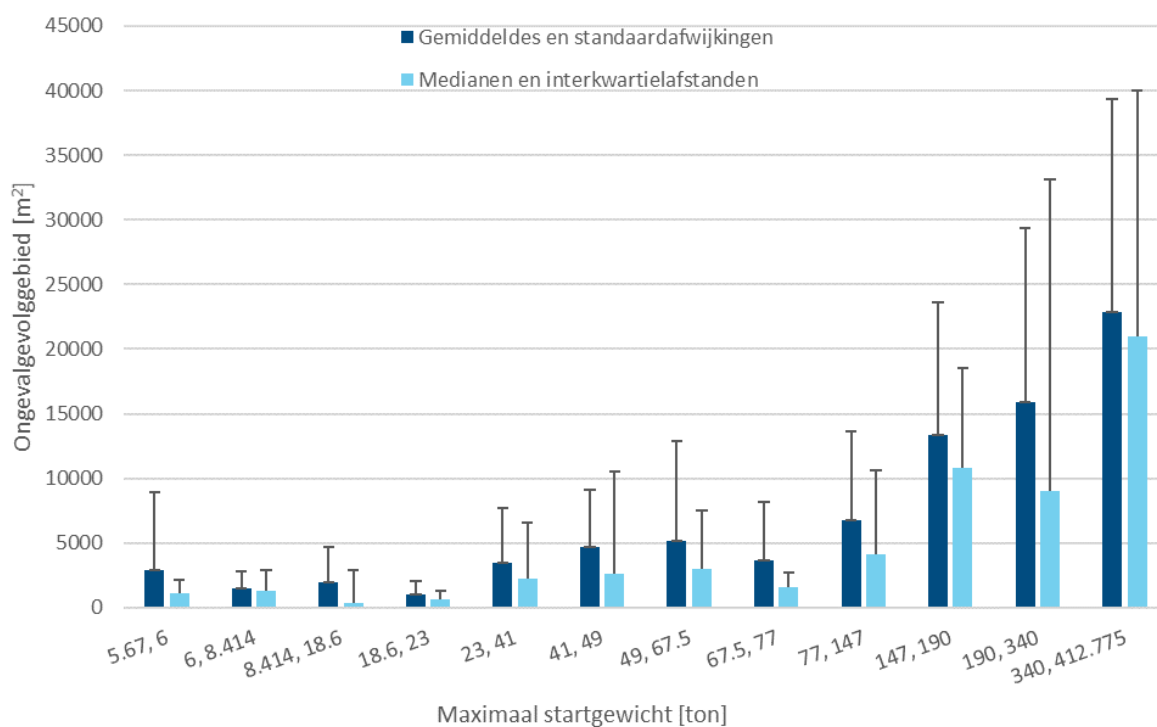
- Gebruikt een niet-parametrische benadering om de relatie te schatten;

- Is minder gevoelig voor afwijkende en extreme waarden; en
- Kan worden gebruikt om niet-lineaire relaties tussen de variabelen te analyseren.



Figuur 5-1: Grafiek met de berekende regressielijnen

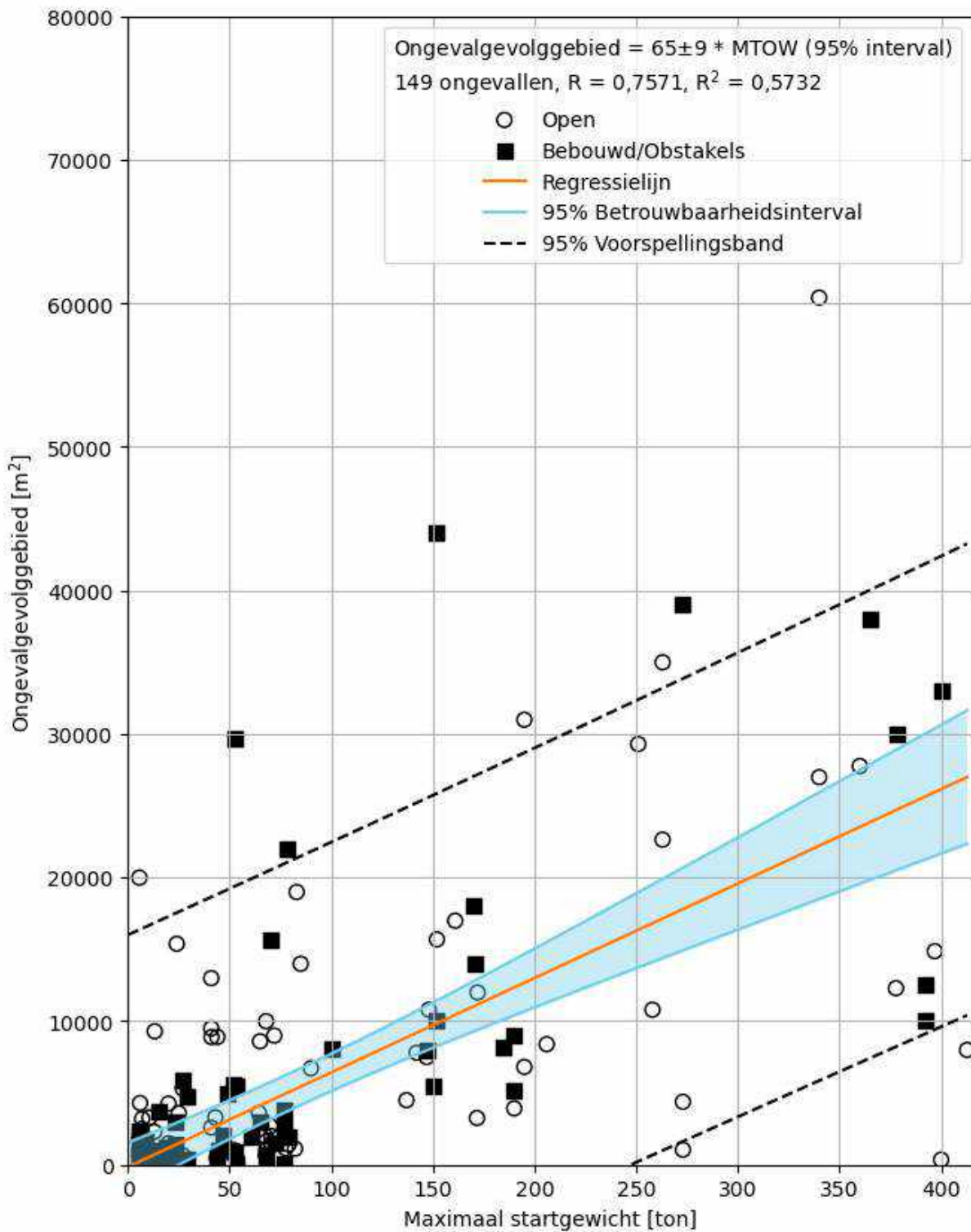
Figuur 5-1 toont de regressielijnen voor elke toegepaste methode. De regressielijnen starten relatief dicht bij elkaar en lopen verder uit elkaar naarmate het maximaal startgewicht toeneemt. De regressielijn berekend met KTS resulteert in een veel kleiner ongevalgevolggebied dan de regressielijnen berekend met SLR. Bij een maximaal startgewicht van 400 ton, geeft de SLR regressielijn door de oorsprong een ongevalgevolggebied van 26.000 m², de SLR lijn met een constante een gebied van 24.821 m² en de KTS regressielijn 15.092 m². Dit valt te verklaren door hoe beide methodes een regressielijn bepalen. De meest gebruikte methode voor SLR (die ook gebruikt is in dit geval) is Ordinary Least Squares (OLS) waarbij de gemiddeldes van de x- en y-waardes, in dit geval het maximaal startgewicht en het ongevalgevolggebied, worden gebruikt om de richtingscoëfficiënt en de constante te berekenen. KTS daarentegen gebruikt hiervoor de mediaan van de x- en y-waardes. Slechts een aantal (de hoeveelheid hiervan is afhankelijk van de grootte van de dataset) grote waardes kunnen een gemiddelde sterk naar omhoog trekken maar weinig effect hebben op de mediaan. Het gemiddelde maximale startgewicht in de gebruikte dataset is 93,5 ton terwijl de mediaan 52,4 ton is. Het gemiddelde ongevalgevolggebied is 7.094 m² terwijl de mediaan 2.600 m² is. Deze waardes liggen sterk uit elkaar wat zich doorzet naar de gevonden regressielijnen. Figuur 5-2 toont de gemiddeldes (en standaardafwijkingen) en de medianen (en interkwartielafstanden) van de ongevalgevolgebieden voor verschillende startgewicht-intervallen. De intervallen zijn dusdanig gekozen dat in elk interval ongeveer evenveel datapunten (10 tot 14 datapunten) zitten maar tegelijk ook geen twee datapunten met hetzelfde startgewicht in twee verschillende intervallen zitten. In deze grafiek is duidelijk zichtbaar dat de mediaan in elk geval lager ligt dan het gemiddelde.



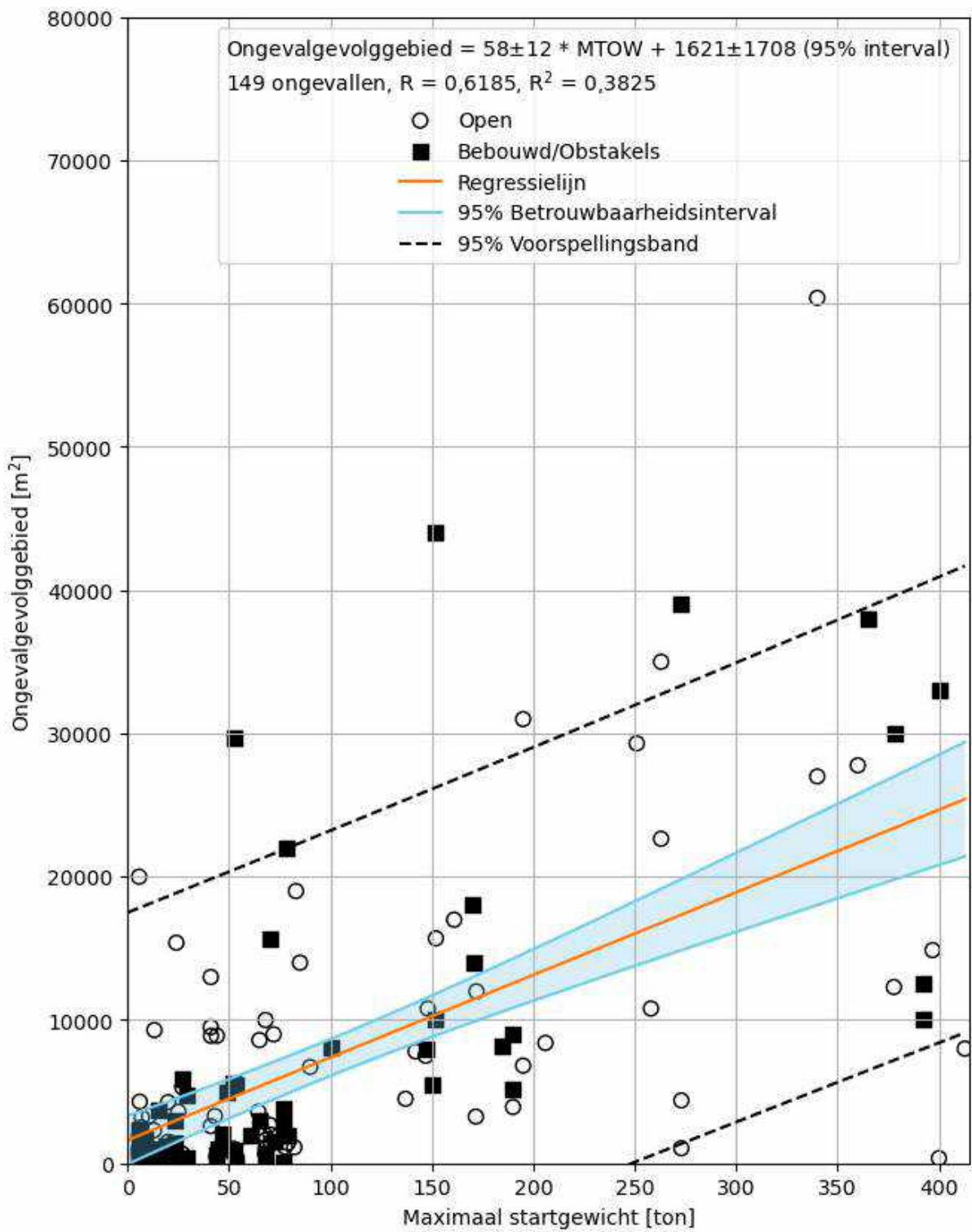
Figuur 5-2: Gemiddeldes en medianen (blokken) van de ongevalgevolgebieden voor verschillende startgewicht-intervallen, standaardafwijkingen en interkwartielafstanden (zwarte lijnen) enkel getoond in oplopende richting

De R²-waarde is relatief laag in alle gevallen. Dit komt omdat het ongevalgevolggebied afhankelijk is van meer factoren dan enkel het maximale startgewicht. De impacthoek en -snelheid hebben ook een grote invloed. Echter zijn deze factoren niet te voorspellen en worden ze ook zelden genoteerd in ongevalsrapporten. Het is dus belangrijk om in acht te nemen dat de relatie tussen het ongevalgevolggebied en het maximaal startgewicht slechts een gemiddelde is en dat afwijkende waardes altijd kunnen voorkomen.

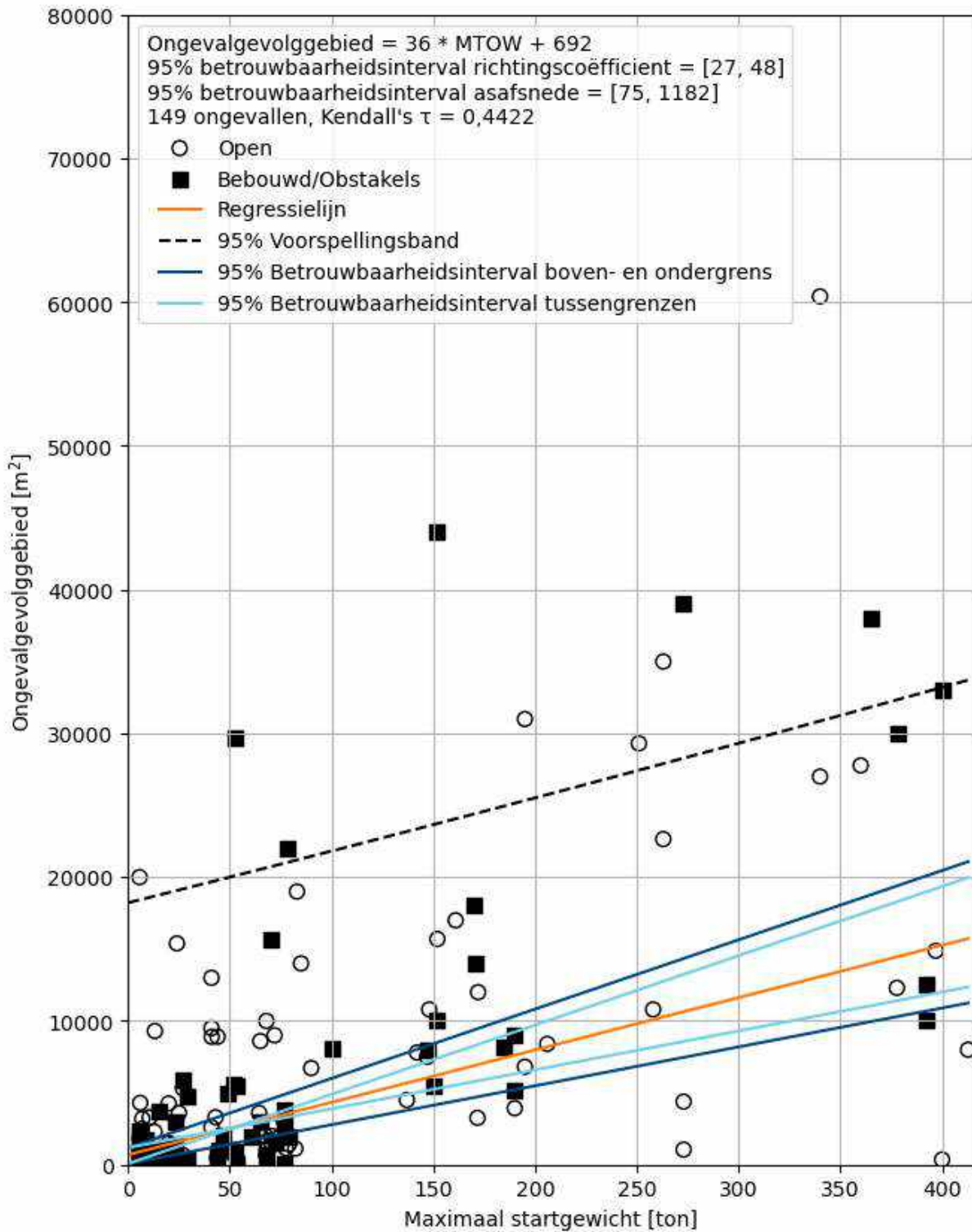
Figuur 5-3, Figuur 5-4 en Figuur 5-5 tonen de datapunten, regressielijn, R^2 waarden etc. voor alle datapunten exclusief de twee afwijkende waarden die in Tabel 4-1 in Sectie 4.1 werden vernoemd.



Figuur 5-3: Grafiek met simpele lineaire regressie en $y = a * x$ (MTOW = maximaal startgewicht)



Figuur 5-4: Grafiek met simpele lineaire regressie en $y = a * x + b$ (MTOW = maximaal startgewicht)



Figuur 5-5: Grafiek met Kendall Theil Sen regressie en $y = a*x + b$ (MTOW = maximaal startgewicht). De tussengrenzen tonen een combinatie van de hoogste constante en laagste richtingscoëfficiënt en omgekeerd

Tabel 5-1 toont het effect van de afwijkende waarden uit Tabel 4-1 op de validiteitscoëfficiënten en de regressielijnen voor de gebruikte methodes.

Tabel 5-1: Effect van afwijkende waardes op R^2 en de regressielijn voor elke gebruikte regressiemethode

Regressiemethode	Validiteitscoëfficiënt		Regressielijn	
	Exclusief afwijkende waardes	Inclusief afwijkende waardes	Exclusief afwijkende waardes	Inclusief afwijkende waardes
SLR, $y = a * x$	0,5733	0,2161	$y = 65 * x$	$y = 71 * x$
SLR, $y = a * x + b$	0,3825	0,0813	$y = 58 * x + 1621$	$y = 52 * x + 4025$
KTS, $y = a * x + b$	0,4422	0,4299	$y = 36 * x + 692$	$y = 36 * x + 775$

De SLR-methodes zijn gevoelig voor afwijkende waardes, waarbij slechts twee afwijkende waardes al een grote invloed hebben op zowel de R^2 -waardes als de regressielijnen. In tegenstelling tot de KTS-methode, die veel minder gevoelig is voor afwijkende waardes. Dit illustreert dat de KTS-methode robuuster en minder gevoelig is voor afwijkende waardes, met zelfs de hoogste R^2 -waarde van alle methodes wanneer de afwijkende waardes aan de dataset worden toegevoegd. Aangezien SLR uitgaat van normaal verdeelde data, terwijl KTS dit niet doet, is KTS in dit geval ook wiskundig gezien 'correcter' om toe te passen, gezien noch de ongevalgevolggebieden noch het maximaal startgewicht normaal verdeeld zijn. Tabel 5-2 toont hoe het ongevalgevolgebied verschilt per regressiemethode en hoe deze verschillen tegenover het oorspronkelijke model voor twee veel voorkomende vliegtuigtypes, de Airbus A320(NEO) en de Boeing 787-9.

Tabel 5-2: Grootte ongevalgevolgebied voor de geactualiseerde regressiemethodes ten opzichte van het oorspronkelijke model

Type	Maximaal startgewicht [ton]	Oorspronkelijk $83\text{m}^2/\text{ton}$ [ton]	Geactualiseerd #1 $65\text{m}^2/\text{ton}$ [m^2] (SLR)	Geactualiseerd #2 $58\text{m}^2/\text{ton} + 1621\text{m}^2$ [m^2] (SLR)	Geactualiseerd #3 $36\text{m}^2/\text{ton} + 692\text{m}^2$ [m^2] (KTS)
A320NEO	79	6.557	5.135	6.203	3.536
B787-9	253	20.999	16.445	15.251	9.800

De geactualiseerde regressiemethode #1 zorgt voor een afname in grootte van ongeveer 20% ten opzichte van de oorspronkelijke methode, terwijl methode #3 zorgt voor bijna een halvering in grootte. Ondanks dat regressiemethode #3 wiskundig gezien de correcte methode is moet echter ook rekening gehouden worden met andere factoren die de grootte van het ongevalgevolgebied kunnen beïnvloeden, zoals de impacthoek en -snelheid. Deze kunnen sterk variëren per ongeval en zorgen voor een grote spreiding in de ongevalgevolggebieden wat niet goed gerepresenteerd wordt door de grootte van het vliegtuig. De KTS-regressie kan daarom een onderschatting geven van het ongevalgevolgebied als functie van het vliegtuiggewicht. Om deze reden is er gekozen voor een conservatievere benadering van het ongevalgevolgebied zoals gegeven door de volgende relatie in lijn met de oorspronkelijke modellering maar met de geactualiseerde oppervlakte per ton gewicht:

$$\text{Ongevalgevolgebied } [m^2] = 65 [m^2/\text{ton}] * \text{maximaal startgewicht } [ton]$$

Het is niet mogelijk om in de huidige opzet van het EV-model de invloed van andere factoren zoals de impacthoek en -snelheid mee te nemen. Dit zou een compleet andere modellering vereisen in de vorm van Monte-Carlo simulaties. Dit maakt de EV-berekeningen ook niet noodzakelijk nauwkeuriger.

5.2 Letaliteit

De nieuwe verzamelde datapunten werden gecombineerd met de datapunten van het originele onderzoek om een nieuwe schatting van de letaliteit te maken. Hierdoor zijn 70 datapunten gevonden met in totaal 468 dodelijke slachtoffers en 1710 aanwezigen, met de volgende verdeling van het aantal slachtoffers en aanwezigen (Tabel 5-3):

Tabel 5-3: Verdeling van het aantal slachtoffers en aanwezigen

Dataset	Terrein			
	Open		Bebouwd/met obstakels	
	Slachtoffers	Aanwezigen	Slachtoffers	Aanwezigen
Oorspronkelijk	4	21	133	477
Nieuw	59	200	272	1012
Totaal	63	221	405	1489

Een apart cijfer voor de letaliteit in open en bebouwd/met obstakels gebied wordt niet gegeven, omdat dit een vertekend beeld zou kunnen geven van de letaliteit in open gebieden. Ten eerste is het aantal datapunten waarbij slachtoffers en/of gewonden zijn gevallen in open gebieden relatief laag met 15 van de 70 ongevallen. Ten tweede zijn de meeste van deze 15 datapunten een ongeval waarbij een vliegtuig op een weg terecht is gekomen. Zoals eerder aangegeven is hier enkel gekeken naar hoeveel voertuigen hier beschadigd zijn geraakt en op basis daarvan is een schatting gemaakt van het aantal aanwezigen in het crash-gebied. In de realiteit zullen er meer aanwezigen zijn geweest maar het is niet mogelijk om daar een schatting van te maken door de dynamische omgeving. Een lagere schatting van de aanwezigen zorgt dan voor een hogere letaliteit.

Een verband tussen letaliteit en ongevalgevolggebied kon niet worden gevonden. Dit komt omdat een groter ongevalgevolggebied het aantal slachtoffers kan doen toenemen, wat de letaliteit omhoog haalt, maar tegelijk ook zorgt voor meer aanwezigen wat de letaliteit dan weer naar beneden haalt. Voor 48 datapunten (in open terrein en bebouwd terrein/terrein met obstakels) kon zowel het ongevalgevolggebied als het aantal slachtoffers gevonden worden. Hieruit is gebleken dat er 1,17 dodelijke slachtoffers zijn gevallen per 1.000 m² (een cirkel met een straal van 17,8 m) ongevalgevolggebied.

Er zijn nu twee voor de hand liggende manieren om de letaliteit te bepalen. Men kan:

1. de som van dodelijke slachtoffers onder derden van alle ongevallen delen door de som van de geschatte bevolking in de gevolggebieden; of
2. de (wiskundige) gemiddelde waarde van de letaliteitratio's berekenen.

Overeenstemmend met het originele onderzoek is de letaliteit berekend op de eerste manier. Dit geeft een letaliteit van 0,274 of 27% met een 95%-betrouwbaarheidsinterval van 0,253 tot 0,296.

De bovengrens van de letaliteit is ook bepaald door er vanuit te gaan dat het aantal mensen in het gebied van de vliegtuigcrash gelijk is aan het aantal dodelijke slachtoffers plus het aantal gewonden. Dit geeft een bovengrens van 0,536 of 54%, met een 95%-betrouwbaarheidsinterval van 0,510 tot 0,557, en is berekend door het combineren van de nieuw verzamelde datapunten en datapunten uit het originele onderzoek. Deze benadering voor letaliteit levert een zeer conservatieve waarde op want in realiteit waren er waarschijnlijk meer mensen aanwezig in het vliegtuigcrash-gebied die niet gewond zijn geraakt door de crash.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

De ongevalgevolgen van het externe-veiligheidsmodel voor luchthavens, welke ongevalgevolggebied en letaliteit behelzen, zijn geactualiseerd voor zware vaste-vleugelvliegtuigen (vliegtuigen met een maximaal startgewicht van minstens 5.670 kg). De actualisatie vond plaats middels een verzameling en analyse van geselecteerde luchtvaartongevallen wereldwijd.

Het ongevalgevolggebied werd met een verzameling van 149 datapunten bepaald. Met behulp van statistische analyses (regressietesten) is een nieuwe relatie gevonden tussen het maximaal startgewicht van een vliegtuig en het ongevalgevolggebied, namelijk:

$$\text{Ongevalgevolggebied [m}^2\text{]} = 65 [\text{m}^2/\text{ton}] * \text{maximaal startgewicht [ton]}$$

De nieuwe relatie levert ten opzichte van het oorspronkelijke model een kleiner ongevalgevolggebied op (65m²/ton * maximaal startgewicht versus 83m²/ton*maximaal startgewicht).

De letaliteit werd met een verzameling van 70 datapunten vastgesteld. De geactualiseerde waarde voor letaliteit is:

$$\text{Letaliteit} = 0,274$$

De nieuwe waarde is ten opzichte van die van het oorspronkelijke model nagenoeg gelijk (0,274 versus 0,278).

6.2 Aanbevelingen

Er wordt voorgesteld om op termijn de geactualiseerde parameters voor ongevalgevolgen van zware vaste-vleugelvliegtuigen te introduceren voor gebruik in de berekening van externe veiligheidsrisico's van Schiphol en overige burgerluchthavens. Voor luchthaven Schiphol betekent dit dat de nieuwe modelparameters moeten opgenomen worden in het nieuw op te stellen rekenvoorschrift. Voor overige burgerluchthavens betekent dit dat in het voorschrift (bijlage 2, als bedoeld in artikel 5, van de Regeling burgerluchthavens) het lineaire verband tussen MTOW en ongevalgevolggebied in Tabel 5 en de letaliteit in Tabel 6, aangepast moeten worden voor de zakenjet (Business jet), vrachtvliegtuigen (Cargo, generatie 1, 2 en 3) en passagiersvliegtuigen (Passenger, generatie 1, 2 en 3).

De nieuwe modelparameters mogen alleen met de toestemming van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat toegepast worden in de officiële externe-veiligheidsberekeningen in het kader van m.e.r.-studies, Luchthavenverkeersbesluit (Schiphol), en luchthavenbesluiten burgerluchthavens.

Om inzicht te krijgen in het effect van de nieuwe parameters zou het Ministerie kunnen overwegen enkele proefberekeningen uit te laten voeren voor luchthaven Schiphol, enkele regionale luchthavens en een selectie van kleine velden waar zwaar verkeer voorkomt. Het Ministerie zou naar beleidsbehoefte ook kunnen overwegen de ongevalgevolgen van lichte vliegtuigen op termijn te laten actualiseren aangezien de onderliggende gegevens gedateerd zijn.

7 Referenties

1. Voorschrift en procedure voor de berekening van Externe Veiligheid rond luchthavens, NLR-CR-2004-083, Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium NLR, februari 2004.
2. An enhanced method for the calculation of third party risk around large airports, NLR-CR-2000-147, National Aerospace Laboratory, April 2000.
3. Re-assessment of the regional airport model NLR-CR-2002-178, National Aerospace Laboratory, 2002.
4. Review Nederlandse rekenmethode externe veiligheid luchtvaart, de overdraagbaarheid en wetenschappelijke waarde, RIVM-rapport 2023-0331, RIVM, juli 2023.

Appendix A Dataset Letaliteit

Tabel 7-1: Alle gebruikte datapunten voor het bepalen van de letaliteit

Datum	Locatie	Aantal slachtoffers	Aantal aanwezigen (NLR schatting)
05/01/1969	Londen, VK	2	3
03/03/1972	Albany, New York	1	2
08/12/1972	Chicago, Illinois	2	4
23/07/1973	St Louis, Missouri	0	4
15/12/1973	Miami, Florida	6	17
27/04/1976	St Thomas, De Amerikaanse Maagdeneilanden	0	6
04/06/1976	Agana Naval Air Station, Guam	1	7
23/06/1976	Philadelphia, Pennsylvania	0	1
06/08/1976	Chicago, Illinois	1	12
04/04/1977	New Hope, Georgia	8	16
28/04/1977	Mclean, Virginia	0	8
25/09/1978	San Diego, Californië	7	22
25/05/1979	Chigaco, Illinois	2	8
31/10/1979	Mexico City, Mexico	1	1
13/01/1982	Washington, D.C	4	8
09/07/1982	New Orleans, Louisiana	8	24
26/05/1987	Kenner, Louisiana	0	2
16/08/1987	Detroit, Michigan	2	7
14/12/1988	Luxor, Egypte	1	8
04/10/1992	Amsterdam, Nederland	39	150
26/05/1993	Southampton, VK	0	3
02/07/1994	Charlotte, North Carolina	0	2
14/12/1994	Fresno, Californië	0	21
21/12/1994	Willenhall, VK	0	1
08/10/1996	Turijn, Italië	2	4
06/12/1997	Irkutsk, Rusland	47	147
02/02/1999	Luanda, Angola	13	42
07/03/1999	New Delhi, India	3	10
15/04/1999	Shanghai, China	5	232
31/08/1999	Buenos Aires, Argentinië	2	6
22/06/2000	Wuhan, China	7	7
17/07/2000	Patna, India	5	24
25/07/2000	Parijs, Frankrijk	4	4
12/11/2001	New York City, New York	5	22
03/05/2002	Jalandhar, India	8	25
04/05/2002	Gwammaja Quarters, Nigerië	30	150
05/09/2005	Medan, Indonesië	49	75
06/12/2005	Mehrebad, Iran	12	102

Datum	Locatie	Aantal slachtoffers	Aantal aanwezigen (NLR schatting)
08/12/2005	Chigaco, Illinois	1	10
14/08/2006	Madrid, Colombia	2	2
05/07/2007	Culiacán-Nova, Mexico	7	17
17/07/2007	Congonhas, Brazilië	12	39
04/11/2007	Campo de Marte, Brazilië	6	6
04/11/2008	Mexico City, Mexico	7	47
08/12/2008	San Diego, Californië	4	10
12/02/2009	Clarence Center, New York	1	3
13/04/2010	Monterrey, Mexico	1	1
21/03/2011	Pointe Noire, Republiek Congo	19	40
02/06/2012	Accra, Ghana	10	11
03/06/2012	Iju-Ishaga, Nigerië	6	15
30/11/2012	Brazzaville, Republiek Congo	26	40
25/12/2012	Heho, Myanmar	1	2
23/07/2014	Magong, Taiwan	0	27
30/10/2014	Wichita, Kansas	3	9
30/06/2015	Medan, Indonesië	17	20
16/01/2017	Bishkek, Kyrgyzstan	35	114
21/02/2017	Essendon Fields, Australië	0	5
10/07/2018	Derdepoort, Zuid-Afrika	0	8
29/10/2018	Jakarta, Indonesië	4	18
27/06/2019	Nizhneangarsk, Rusland	0	2
30/07/2019	Rawalpindi, Pakistan	14	21
24/11/2019	Goma, Democratische Republiek Congo	6	11
27/12/2019	Almaty, Kazachstan	0	3
22/05/2020	Model Colony, Pakistan	1	16
22/05/2020	Karachi, Pakistan	3	5
01/07/2021	Patikul, Filipijnen	3	7
17/08/2023	Elmina, Maleisië	2	3
09/02/2024	Naples, Florida	0	1
09/08/2024	Vinhedo, Brazilië	0	2
20/08/2024	Odessa, Texas	0	8
		468	1710



Dedicated to innovation in aerospace

Koninklijke NLR - Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum

Het onderzoekscentrum Koninklijke NLR werkt op objectieve en onafhankelijke wijze met zijn partners aan een betere wereld van morgen. NLR biedt daarbij innovatieve oplossingen en technische expertise en zorgt voor een sterke concurrentiepositie van het bedrijfsleven.

NLR is ruim 100 jaar een kennisorganisatie met de diepgewortelde wil om te blijven vernieuwen en zet zich in voor een duurzame, veilige, efficiënte en effectieve lucht- en ruimtevaart.

De combinatie van diepgaand inzicht in de klantbehoefte, multidisciplinaire expertise en toonaangevende onderzoeksfaciliteiten, maakt snel innoveren mogelijk. NLR vormt in binnen- en buitenland de spilfunctie tussen wetenschap, bedrijfsleven en overheid, en overbrugt de kloof tussen fundamenteel onderzoek en toepassingen in de praktijk. Daarnaast werkt NLR als Groot Technologisch Instituut ruim tien jaar in de TO2-federatie samen aan toegepast onderzoek in Nederland.

Vanuit de hoofdvestigingen in Amsterdam en Marknesse en twee satellietvestigingen, draagt NLR bij aan een veilige en duurzame maatschappij en werkt met partners in vele (defensie)programma's, onder andere aan complexe composieten constructies voor verkeersvliegtuigen en aan doelgericht gebruik van het F-35-jachtvliegtuig. Daarnaast geeft NLR invulling aan Nederlandse en Europese (klimaat)doelstellingen conform de Luchtvaartnota, de European Green Deal, Flightpath 2050 en door deelname aan programma's zoals 'Luchtvaart in Transitie', Clean Aviation, Clean Hydrogen en SESAR.

Voor meer informatie bezoek: www.nlr.nl

Postal address

PO Box 90502
1006 BM Amsterdam, The Netherlands
e) info@nlr.nl i) www.nlr.org

Royal NLR

Anthony Fokkerweg 2
1059 CM Amsterdam, The Netherlands
p) +31 88 511 3113

Voorsterweg 31
8316 PR Marknesse, The Netherlands
p) +31 88 511 4444