



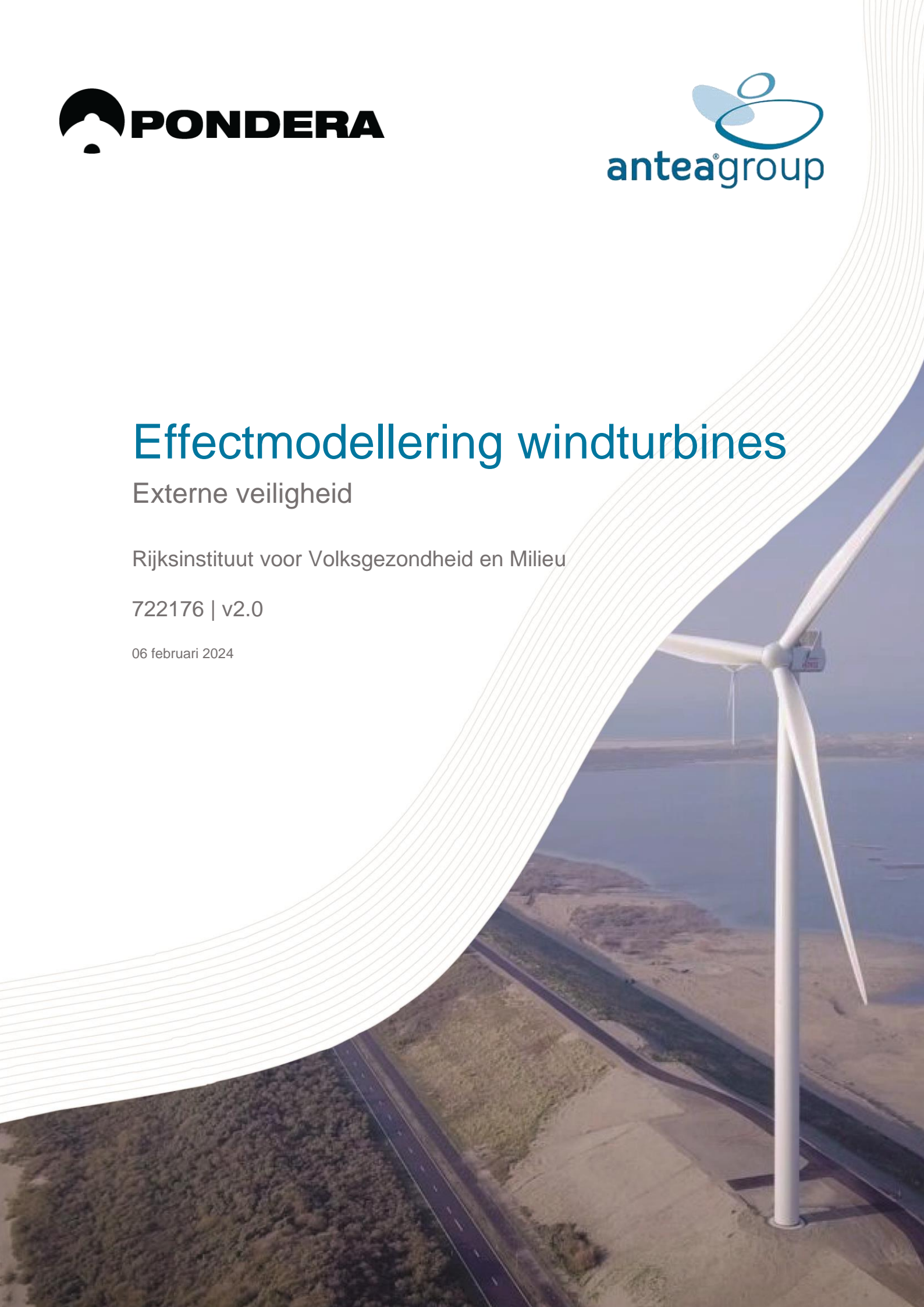
Effectmodellering windturbines

Externe veiligheid

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu

722176 | v2.0

06 februari 2024



Antea Group

Hoofdvestiging Nederland

Tolhuisweg 57
8443 DV Heerenveen
0513 63 45 67
info@anteagroup.nl

Postadres

Postbus 24
8440 AA Heerenveen

Pondera

Hoofdvestiging Nederland

Amsterdamseweg 13
6814 CM Arnhem
088 – pondera (088-7663372)
info@ponderaconsult.com

Postadres

Postbus 919
6800 AX Arnhem

Colofon

Soort document

Effectmodellering windturbines

Projectnaam

Externe veiligheid

Versienummer

v2.0

Datum

06 februari 2024

Project nummer

722176

Opdrachtgever

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu

Auteur

Jeroen Eskens – Antea Group
Bouke Vogelaar - Pondera

Disclaimer

In het onderzoek is gebruik gemaakt van algemeen geaccepteerde uitgangspunten, modellen en informatie die ten tijde van het opstellen van dit rapport ter beschikking stonden. Aanpassingen in de uitgangspunten, modellen of gebruikte gegevens kunnen leiden tot andere uitkomsten. De aard en de nauwkeurigheid van de gebruikte gegevens voor het onderzoek bepalen in belangrijke mate de nauwkeurigheid en de onzekerheden van de berekende uitkomsten. De Antea / Pondera combinatie (AP) is niet aansprakelijk voor gederfde inkomsten of schade die wordt geleden door opdrachtgever(s) en/of derden uit conclusies die gebaseerd zijn op gegevens die niet van de AP afkomstig zijn. Deze rapportage is opgesteld met de intentie dat deze alleen gebruikt wordt door de opdrachtgever en slechts voor het doel waarvoor de rapportage is opgesteld. Er mag geen beroep worden gedaan op de informatie uit deze rapportage voor andere doeleinden zonder schriftelijke toestemming van de AP. De AP is niet verantwoordelijk voor de consequenties die kunnen voortvloeien uit het oneigenlijk gebruik van de rapportage. De verantwoordelijkheid voor het gebruik van (de analyse, resultaten en bevindingen in) de rapportage blijft bij de opdrachtgever. De Rechtsverhouding opdrachtgevers – architect, ingenieur en adviseur conform DNR 2011 is te allen tijde van toepassing. De partijen van de AP werken met een kwaliteitsmanagementsysteem dat door EIK gecertificeerd is volgens de ISO 9001:2015 norm.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doelstelling	2
1.3	Onderzoeksopzet en methodiek	2
1.4	Leeswijzer	3
1.5	Lijst van parameters, definities en afkortingen	4
2	Beoordelingsmethodiek	6
2.1	Ontvankelijkheid	6
2.2	Validiteit	6
2.3	Betrouwbaarheid	6
2.4	Toepasbaarheid	6
3	Literatuurstudie rekenmethodieken	7
3.1	Inleiding	7
3.2	Rekenmethodieken en normstellingen buitenland	7
3.3	Literatuur	8
3.4	Reactie klankbordgroep	12
4	Omschrijving Faalscenario's	13
4.1	Oorzaken en gevolgen	13
4.2	Mastfalen	13
4.3	Gondelfalen	14
4.4	Bladworp	15
4.5	Vallende onderdelen en ijs	15
4.6	Gevolgen actualisatie faalfrequenties 2022	18
5	Beoordeling parameters	21
5.1	Kritiek oppervlakte rotorblad	21
5.2	Nominaal toerental	23
5.3	Zwaartepuntbepalingen onderdelen windturbine	27
5.4	Dimensies onderdelen windturbine	29
6	Inventarisatie rekenmethodieken	32
6.1	Mastfalen	32
6.2	Gondelfalen	34
6.3	Bladworp	39
7	Beoordeling rekenmethodieken	47
7.1	Beoordeling mastfalen	47
7.2	Beoordeling gondelfalen	49
7.3	Beoordeling bladworp	52
8	Onderzoek trefkansbepalingen	59
8.1	Inleiding	59

8.2	Trefkansanalyse versus impactanalyse _____	59
8.3	Bepaling trefzones bij bladworp rondom objecten / infrastructuren _____	59
8.4	Aanpassingen aan rekenmethodieken - Gevolgberekening / Gevolgschade _____	62
8.5	Beoordeling methodieken trefkansbepaling _____	62
8.6	Verschillende type objecten en infrastructuren _____	80
8.7	Bepaling treflocatie zwaartepunt onderdelen (impact) _____	83
9	Advisering vuistregels _____	84
9.1	Inleiding _____	84
9.2	Maximale effectafstanden _____	84
9.3	PR10-5 contouren _____	85
9.4	PR10-6 contouren _____	86
9.5	Effectafstand ten aanzien van risicovolle installaties, infrastructuren en andere objecten _____	87
10	Adviezen en conclusies _____	88
10.1	Rekenmethodieken _____	88
10.2	Advies vervolgonderzoek _____	89

1 Inleiding

Dit rapport omschrijft de uitkomsten van een analyse van de huidige berekeningsmethodieken die gebruikt worden om inzicht te verlenen in de externe veiligheidsrisico's die ontstaan als gevolg van de aanwezigheid van een windturbine. Deze berekeningsmethodieken staan omschreven in de Handleiding risicobeoordeling windturbines versie oktober 2020 die opgeslagen is als Module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid. Dit rekenvoorschrift samen met de Handreiking risicozonering windturbines van Rijkswaterstaat Water, Verkeer & Leefomgeving van 20 mei 2020 (versie 1.1) en de Toelichting Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid Module IV – Windturbines vormen gezamenlijk een set van formules, regels en omschrijvingen van hoe de risico's voor de omgeving kwantitatief en kwalitatief inzichtelijk kunnen worden gemaakt.

Dit rapport analyseert de gebruikte rekenmethoden, omschrijft of er andere rekenmethoden beschikbaar zijn, beoordeeld de verschillende mogelijkheden voor rekenmethoden en adviseert over mogelijke aanpassingen.

1.1 Aanleiding

Er vinden veel ontwikkelingen plaats om steeds meer energie op te gaan wekken met windturbines. Ook de technologische ontwikkeling van de windturbines blijft doorgaan. Bijvoorbeeld de afmetingen van de windturbines nemen nog steeds toe. Deze ontwikkelingen kunnen van invloed zijn op het faalgedrag van windturbines en daarmee op de relevante scenario's en bijbehorende faalfrequenties. Het risico dat daarbij bestaat, is dat de nu afgeleide faalfrequenties relatief snel niet meer aansluiten bij de beschrijving van de meerderheid van de windturbinepopulatie. Op 12 mei 2022 is een rapport gepubliceerd door het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu genaamd 'Actualisatie faalfrequenties windturbines'. De kans op een ongeluk met een windturbine was voor het laatst onderzocht in 2012. Het RIVM heeft daarom de cijfers geactualiseerd. Onderzocht is wat er kan gebeuren en hoe vaak dat gebeurt. De reden voor de update is dat windturbines de laatste jaren technisch verder zijn ontwikkeld. Ze zijn bijvoorbeeld groter geworden. Ook zullen vanwege de overgang naar duurzame energie meer windturbines worden geplaatst. Uit het onderzoek blijkt dat de kans op een ongeluk klein is: op de ongeveer 2000 windturbines in Nederland op land wordt ongeveer één ongeluk per jaar verwacht.

In dit onderzoek is tevens onderzocht of in de gebruikte database aanleiding is om een andere onderverdeling te maken van de faalscenario's waar tot nu toe in Nederland vanuit is gegaan voor het uitvoeren van risicoberekeningen. Op basis van de Caithness database zijn faalfrequenties voor vijf verschillende scenario's afgeleid: bladafwerp, bladafwerp in delen, mastbreuk, rotorafwerp en gondelafwerp. Voor het vallen of werpen van ijs als zesde faalscenario kon geen faalfrequentie worden bepaald. In de huidige rekenmethodieken is geen faalscenario opgenomen dat rekening houdt met bladafwerp in delen of met de opsplitsing van het gondel faalscenario in twee aparte scenario's van rotorafwerp en gondelafwerp. Om de nieuwe faalfrequenties te kunnen gebruiken dient daarom onderzocht te worden hoe de verschillende faalscenario's berekend kunnen worden.

Een tweede aanleiding is dat de bepaalde rekenmethodieken voor de verschillende te gebruiken faalscenario's in principe afkomstig zijn uit bestaande berekeningsvoorstellen die gecombineerd zijn tot een handboek in 2005. Sinds de combinatie van de rekenregels in 2005 zijn de windturbines voortdurend groter geworden wat zorgt voor een aanleiding tot een evaluatie van de totale effecten die kunnen

optreden¹. Niet alleen het formaat van de windturbines is significant gewijzigd maar ook de gebruikte technieken in de windturbines zijn veranderd door de doorontwikkeling van technologieën. Zo zijn moderne grote windturbines in vrijwel alle gevallen voorzien van uitgebreidere regelsystemen zoals individueel pitchende rotorbladen, in tegenstelling tot het gros van de bestaande windturbines in 2005. Door het groter worden van de windturbines wordt een faalincident ook kostbaarder waardoor er ook een economische argumentatie is ontstaan voor het beperken van de kans op faalincidenten van windturbines. Zo worden er per windturbine meer veiligheidssystemen geïnstalleerd en is er per windturbine meer aandacht voor back-up voorzieningen van veiligheidssystemen.

1.2 Doelstelling

Een evaluatie van de verschillende beschikbare rekenmethodieken die omschrijven hoe windturbines kunnen falen en welke risico's dit oplevert voor de omgeving. Tevens dient dit onderzoek om bouwstenen aan te dragen voor de ontwikkeling van een nieuw rekenmodel wat toegepast kan worden op de huidige windturbineformaten.

1.3 Onderzoekopzet en methodiek

Het uit te voeren onderzoek start met een inventarisatie van beschikbare rekenmethodieken om erachter te komen welke rekenmodellen momenteel beschikbaar zijn om de risico's voor de omgeving in kaart te kunnen brengen. Hierbij worden de bestaande rekenmethodieken zoals die zijn omschreven in module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid gezien als referentiesituatie. Daarnaast worden additionele rekenmodellen meegenomen die worden geïdentificeerd in het literatuuronderzoek of worden aangedragen door de klankbordgroep. De geschiktheid van deze modellen wordt onderworpen aan een eerste analyse om te controleren of er voldoende informatie beschikbaar is om het model te reproduceren.

De beschikbare rekenmethodieken worden beoordeeld aan de hand van een eerste toetsing aan de criteria ontvankelijkheid, validiteit, betrouwbaarheid en toepasbaarheid. Dit om te bepalen voor welke rekenmodellen het geschikt is om de mogelijkheden van optimalisaties en aanpassingen passend bij de nieuwe faalfrequentie scenario's te onderzoeken.

De gevonden rekenmodellen in de literatuur en de bestaande rekenmodellen zullen niet volledig aansluiten bij de omschreven faalscenario's uit het faalfrequentie onderzoek uit 2022. In de volgende stap van dit rapport worden aanpassingen voorgesteld die leiden tot een betere score op de criteria ontvankelijkheid, validiteit, betrouwbaarheid en toepasbaarheid van de individuele rekenmodellen. Indien een optimalisatie of aanpassing niet leidt tot een betere score (bijvoorbeeld als de rekenmethodiek te complex wordt) dan wordt advies gegeven over een geschikt alternatief. Hierbij is het van belang om de uitgangspunten en keuze voor een rekenmodel goed te omschrijven zodat er in de toekomst geen discussies ontstaan over de toepasbaarheid en geschiktheid van niet-toegepaste rekenmodellen. Dit onderzoek geeft advies over de beoordeling van toe te passen rekenmethodieken maar maakt niet de keuze voor het opnemen van specifieke rekenmodellen in de rekenregels.

Naast de rekenmethodieken die de effecten op de omgeving omschrijven wordt er ook aandacht besteed aan de verschillende trefkansberekeningen die benodigd zijn om de gevolgen op specifieke objecten en buisleidingen te inventariseren. Deze trefkansen worden momenteel per type object anders berekend (ondergronds, bovengronds, vlak terrein, hoog object, waterkering et cetera). Hierdoor ontstaat een

¹ <https://www.rvo.nl/onderwerpen/windenergie-op-land/ontwikkelingen>

hogere mate van complexiteit omdat termen verschillend worden gebruikt en rekenmethoden verschillend zijn terwijl hetzelfde effect wordt omschreven. In de huidige praktijk wordt module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid gezien als een richtlijn omdat de omschreven methodieken veelal niet direct toepasbaar zijn op specifieke situaties. Voor dit onderzoek worden de huidige methodieken tegen het licht gehouden en wordt advies gegeven waar methodieken kunnen worden samengevoegd tot één systeem en bij welke objecten maatwerk benodigd is. Dit zal helderheid geven in welke situaties de toepassing van een nieuwe rekenmethodiek geschikt zal zijn.

1.3.1 Klankbordgroep

Om de kwaliteit van dit onderzoek te verbeteren is een klankbordgroep georganiseerd waarin experts op het gebied van de externe veiligheid van windturbines zijn gevraagd om deel van uit te maken. De gevraagde experts hebben ervaring met het uitvoeren van externe veiligheidsberekeningen van windturbines of het beoordelen van externe veiligheidsrapporten over windturbines. De klankbordgroep fungeert als een adviesraad voor het onderzoeksteam en biedt een externe blik op het onderzoek. Het doel van de klankbordgroep is om met nieuwe inzichten en adviezen verbeteringen van het onderzoek te bewerkstelligen. De klankbordgroep draagt daarmee bij aan de relevantie en haalbaarheid van de onderzoeksresultaten. De klankbordgroep wordt op enkele vaste momenten tijdens het onderzoek geraadpleegd. Ten tijden van de literatuurstudie om extra rekenmodellen te kunnen achterhalen, ten tijden van de evaluatie om de toegepaste scores te evalueren en ten tijden van de optimalisering om de voorgestelde verbeteringen te toetsen op geschiktheid. De klankbordgroep wordt ook geraadpleegd over de complexere discussiepunten om zo het speelveld van de discussie beter inzichtelijk te krijgen. De klankbordgroep heeft een adviserende rol.

1.4 Leeswijzer

Dit rapport start met het vaststellen van de beoordelingsmethodiek in hoofdstuk 2 en omschrijving van een korte literatuurstudie in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 en 5 volgen een omschrijving van de gevonden faalscenario's en een evaluatie van de meest relevante parameters die gebruikt worden in de verschillende rekenmethodieken. Uit dit hoofdstuk volgen reeds enkele adviezen voor het gebruik van specifieke parameters. In hoofdstuk 6 worden de verschillende gevonden rekenmethodieken omschreven waarna in hoofdstuk 7 de beoordeling van de verschillende rekenmethodieken uitgevoerd wordt. Ten slotte wordt in hoofdstuk 8 ook een evaluatie uitgevoerd van de verschillende vormen van trefkansbepalingen. Afgesloten wordt met een advies voor eventuele bepaling van vuistregels in hoofdstuk 9 en de algemene adviezen en conclusies in hoofdstuk 10.

1.5 Lijst van parameters, definities en afkortingen

In deze rapportage worden verschillende grootheden en eenheden benoemd. In onderstaande lijst zijn deze gedefinieerd voor gebruik in deze rapportage.

Parameter	Definitie	Eenheid / Grootheid
HRW	Het volledige handboek voor de bepaling van de risico's van windturbines. Bestaande uit de Handleiding risicobeoordeling windturbines (Module IV Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid) en de toelichting hierop en de Handreiking risicozonering windturbines.	-
Trefkans	De numerieke kans dat een object, infrastructuur of oppervlakte geraakt wordt.	-
Tiphoogte	De afstand van het bovenste punt van de windturbine tot aan de voet van de maststoren. In veel gevallen conservatief bepaald door uit te gaan van ashoogte (ipv masthoogte) + $\frac{1}{2}$ x rotordiameter waarbij de fundatiehoogte dus conservatief wordt meegerekend.	meter
Ashoogte (H)	De hoogte van het centrum van de rotor (as) ten opzichte van de hoogte van de grond	meter
Rotordiameter (D)	De diameter van de cirkel die de rotor beslaat	meter
Rotorstraal ($\frac{1}{2}$ x D)	De straal van de cirkel die de rotor beslaat	meter
Bladlengte	De lengte van een rotorblad, vaak generiek bepaald op 0,5x rotordiameter.	meter
Masthoogte	De hoogte van de onderkant van de maststoren tot aan de bovenkant van de maststoren	meter
Risico (risk)	De kans dat een specifieke schade kan optreden	-
Gevaar (hazard)	Iets wat potentieel schade kan veroorzaken	-
Plaatsgebonden risico (PR)	De kans dat een onbeschermd persoon die gedurende een heel jaar aanwezig is op exact dezelfde locatie overlijdt	per m ²
Risicocontour	Zone waarbinnen een bepaald niveau van risico aanwezig is.	-
10-6	Waarde met een kans van 1 op de 1.000.000	# per jaar
10-5	Waarde met een kans van 1 op de 100.000	# per jaar
IJsworp	Het werpen van ijs vanaf een draaiend rotorblad	-
IJsval	Het naar beneden vallen van ijs vanaf een stilstaand rotorblad	-
Gondel	De behuizing bovenop de mast van een windturbine. Ook wel nacelle genoemd.	-
Hub	Het centrale meedraaiende deel in het midden van de rotorbladen waarmee de rotorbladen verbonden zijn aan de gondel.	-
Falen	Het kapot gaan van de windturbine wat zorgt voor een kans op schade aan de fysieke omgeving.	-
Externe veiligheid analyse	De beoordeling van de risico's voor de omgeving als gevolg van het falen van een windturbine. Interne veiligheid omschrijft de risico's voor de windturbine zelf zoals brand, blikseminslag en arbeidsveiligheid. Als gevolg van een probleem bij de interne veiligheid kan ook een extern veiligheidsrisico ontstaan maar het is pas een extern veiligheidsrisico als de omgeving een nadelig effect kan ervaren.	-
Solidity (s)	De hoeveelheid solide materiaal. De verhouding tussen het oppervlakte van de rotorbladen en het totale oppervlak van de cirkel die de rotor maakt.	-
Kritiek bladoppervlak (Ac)	Omrekeningen van het bladoppervlak naar de kans op het raken van een persoon door het bladoppervlak indien het zwaartepunt van een rotorblad naast een persoon landt.	m ²

Bladoppervlak (Ab)	Het maximale bladoppervlak door de maximale doorsnede te nemen van elk bladdeel (optelling van de maximale koorde (breedte) van bladdelen)	m ²
Nominaal toerental (Ω of Ω_{nom})	Het toerental van een windturbine op het moment van nominaal vermogen. Bij moderne windturbines met pitchende rotorbladen kan dit een bereik zijn in plaats van één waarde. Een herdefiniëring van deze parameter wordt in deze rapportage aanbevolen.	Rotaties per minuut
Nominaal vermogen (P_{nom})	Het door de fabrikant aangeven vermogen van een windturbine. Ookwel: het maximaal vermogen zoals opgegeven.	Megawatt
Zwaartepunt (rotorblad) (Z_p)	De locatie van het zwaartepunt van een windturbineonderdeel. En specifiek voor het rotorblad de afstand van het zwaartepunt van het rotorblad tijdens operatie tot aan het ascentrum van de rotor.	Meter
Mastbreedte (d_{mast})	Maximale breedte van de mastoren	Meter
Afstand (r) r	Afstand vanaf locatie tot aan hart van de windturbine	meter
Kans (P)	De kans van optreden	# per jaar
Faalfrequentie (FF)	De kans van optreden van een specifiek faalscenario	# per jaar
Maximale dimensie van de gondel ($L_{max,gondel}$)	Het maximum van de breedte, hoogte en lengte van de gondel (inclusief hublengte)	Meter
Direct treffen	Het direct treffen van een object door het zwaartepunt van een windturbineonderdeel	-
Indirect treffen	Het zwaartepunt van een windturbineonderdeel land naast het object maar een meevallend deel van het object raakt alsnog het object zelf.	-
Impact	Het direct treffen van een object door het zwaartepunt van een windturbineonderdeel. Bij een impact speelt ook de kracht / energie van de botsing een rol. Zie ook trefkans waarbij de kracht / energie geen rol speelt.	-
Trefzone	Extra zone rondom een object waarbij er sprake kan zijn van het treffen van het object.	-
Schaduwhoogte	Extra zone achter een object gelijk aan de hoogte van het object waarbij er sprake kan zijn van het treffen van het object	-
Trefkans bladworp per vierkante meter (P_{zwpt})	Trefkans dat een vierkante meter wordt geraakt door het zwaartepunt van een rotorblad	per m ² per jaar

2 Beoordelingsmethodiek

De set met beoordelingscriteria zorgt dat (de acceptatie of aanpassingen van) rekenmethodieken consistent worden beoordeeld op ontvankelijkheid, validiteit, betrouwbaarheid en toepasbaarheid. Deze methodiek is eerder toegepast bij o.a. de 'review indicatoren groepsrisico transport (2021) van P.A.M. Uijt de Haag en de Rekenmethodiek transport waterstof in (aardgas)transportleidingen. De criteria zijn in de paragrafen hieronder benoemd.

2.1 Ontvankelijkheid

De beoordeling van de ontvankelijkheid richt zich op de vraag of een gevonden of opgestelde methode zodanig eenduidig en volledig is dat deze toepasbaar is. Dit betekent dat de methode moet zijn vertaald naar een rekenalgoritme (formule) en dat duidelijk is welke data als input moet worden gebruikt. De stappen die moeten worden genomen om tot een uitkomst te kunnen komen dienen uitvoerbaar te zijn.

2.2 Validiteit

De beoordeling van de validiteit richt zich op de vraag of de gevonden of opgestelde methode een inhoudelijke verbetering is van de rekenmethodiek. Dit betekent dat de methode onder andere aan moet sluiten bij de actuele, representatieve wetenschappelijke inzichten. Tevens mogen de methoden geen schijnnaauwkeurigheid introduceren: wat in werkelijkheid onzeker is, moet als zodanig ook aangegeven worden.

2.3 Betrouwbaarheid

De beoordeling van de betrouwbaarheid richt zich op de vraag of de gevonden of opgestelde methode herleidbaar, reproduceerbaar en conservatief is;

- Herleidbaar is hierbij of de gevonden en eventueel opgestelde methoden voldoen aan de FAIR-principes, wat betekent dat de (onderzoeks)data en de onderbouwing van de gevonden en eventueel opgestelde methoden beschikbaar, toegankelijk (openbaar), uitwisselbaar (algemeen toegankelijk format) en herbruikbaar (op meerdere instrumenten toepasbaar) zijn;
- Reproduceerbaar is hierbij dat vergelijkbare resultaten behaald worden bij analyse van de data via dezelfde methode én dat vergelijkbare situaties op vergelijkbare wijze benaderd worden;
- Conservatief is hierbij dat in geval van onzekerheid en bij een generieke aanpak is gekozen voor een veilige benadering.

2.4 Toepasbaarheid

De beoordeling van de toepasbaarheid richt zich op de vraag of de toepassing van de gevonden of opgestelde methode zodanig passend, relevant, toekomstbestendig en uitlegbaar is, dat de methode kan worden geïmplementeerd als onderdeel van de meest actuele versie van de rekenmethodiek.

3 Literatuurstudie rekenmethodieken

3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk presenteert niet alleen de resultaten van een literatuurstudie naar de huidige beschikbare rekenmethodieken, maar werpt ook een historische blik op hoe onderzoek en methodologieën zich in de loop van de geschiedenis hebben ontwikkeld.

De vroege jaren van windenergieonderzoek waren voornamelijk gericht op technische optimalisatie en economische haalbaarheid, met slechts een beperkte aandacht voor veiligheidsaspecten. Wereldwijd zijn in de begin jaren slechts enkele studies gedaan naar de kwantitatieve risico's en gevolgen voor de externe veiligheid rondom een windturbine. Naarmate het aantal geïnstalleerde windturbines toenam en ze dichter bij bewoonde gebieden werden geplaatst, ontstond er echter een grotere behoefte aan een grondige analyse van externe veiligheidsrisico's. Vooral in een dichtbevolkt land als Nederland heeft de komst van een grotere hoeveelheid windturbines gezorgd voor groeiende belangstelling voor methoden om deze risico's te kwantificeren, te beoordelen en te beheersen. De handleiding risicobeoordeling windturbines in Nederland is voortgekomen uit een groep onderzoeken die effecten op objecten of infrastructuren trachtten te omschrijven.

In de loop van de jaren zijn ook vanuit internationale normen en richtlijnen, zoals die van de International Electrotechnical Commission (IEC) en andere nationale regelgevende instanties in het buitenland, leidende referentiepunten voor de veiligheidsbeoordeling van windturbines gekomen. Deze normen en voorschriften hebben bijgedragen aan de verdere ontwikkeling van rekenmethodieken en modellen.

De recente vooruitgang in technologieën, zoals geavanceerde computersimulaties, geospatiale analyse en gebruik van big data, biedt ook voor de toekomst mogelijkheden om met een hogere precisie en nauwkeurigheid de risicoberekeningen verder te verbeteren. Tegelijkertijd is het van belang om de rekenmethodieken zodanig in te steken dat ze geschikt zijn voor het doel, geen schijnnaauwkeurigheid introduceren en voor allen toepasbaar en bruikbaar blijven. Niet alle berekeningsmethoden die worden gevonden en worden omschreven in de literatuur zijn daarmee even toepasbaar als rekenmethodiek voor opname in module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid.

3.2 Rekenmethodieken en normstellingen buitenland

Internationaal zijn er geen tot weinig landspecifieke rekenregels ontwikkeld. De rekenregels die in Nederland sinds 2005 zijn vastgelegd in het Handboek risicozonering windturbines vormt het meest complete overzicht van een kwantitatieve risicobenadering. In Vlaanderen (België) is tevens een handboek opgesteld met rekenregels die gebaseerd zijn op een groot deel van de inhoud van het Nederlandse handboek. Internationaal gezien zijn er wel landen met specifieke afstanden die aangehouden moeten worden tot gevoelige objecten of infrastructuren. Zo heeft Denemarken afstandseisen van bijvoorbeeld 4 maal de tiphoogte tot woningen, en 1,7x maal de tiphoogte tot spoorwegen en nationale autowegen. In Amerika is er wisselende regelgeving per staat en soms lokaler per district opgesteld. De te hanteren veiligheidsafstanden zijn vaak een veelvoud van de tiphoogte van een windturbine.

Sinds 2022 is een IEC-werkgroep actief een technische specificatie aan het opstellen wat gezien kan worden als een internationaal handboek om de risico's voor het publiek inzichtelijk te kunnen maken. In de technische specificatie wordt omschreven welke risico's kunnen optreden en worden algemenere adviezen

gegeven over hoe de risico's voor de omgeving inzichtelijk kunnen worden gemaakt. Verwacht wordt dat de IEC 61400-31 Technische specificatie in de loop van 2024 wordt vastgelegd door het IEC. Waar mogelijk wordt in dit onderzoek de aanpak die omschreven wordt in het IEC opgenomen als algemene advisering over de te hanteren rekenmethodieken.

3.3 Literatuur

Tijdens het literatuuronderzoek zijn 16 onderzoeken gevonden met een directe relatie tot rekenmethodieken, met betrekking tot de externe veiligheid van windturbines, die onderzocht worden in deze studie. Per gevonden studie wordt een korte omschrijving gegeven van de herkomst, de inhoud en de toepasbaarheid voor dit onderzoek.

Macqueen et al. (1983)

Ouder onderzoek met een eerste omschrijving van het rekenmodel gebruikt door Sarlak (2015 en 2016) voor bladworp gebaseerd op de faalscenario's opgetreden bij de MOD-2 windturbines door Boeing in Amerika uit 1981. Specifieke aandacht wordt besteedt aan de maximale overtoeren condities die kunnen optreden bij een niet-bladpitchende windturbine en aan condities van het rotorblad tijdens de vlucht.

Sorensen et al. (1984)

Onderzoek naar de risico's voor schade aan mensen als gevolg van bladworp of bladval. Een ballistisch model is gebruikt inclusief luchtkrachten inclusief een sensitiviteitsanalyse. Uitgangspunt van uniform gevormde rotorbladen (vliegtuigvleugel) waaruit enkele conclusies worden getrokken over de invloed van bepaalde aspecten van de berekening. Relevant voor de voorliggende onderzoeken zijn de bevindingen over de invloed van verschillende aspecten die wel of niet meegenomen worden in de berekening. De vorm van het rotorblad veroorzaakte een maximale afwijking van 7% en de invloed van niet-stabiele luchtstromen (tumbling) een maximale afwijking van 12%. Autorotatie van een rotorblad tijdens de worp zorgde enkel voor een afname van de berekende werpafstanden. Uit het onderzoek blijkt dat de eigenschappen die invloed hebben op de condities op het moment van loslaten van een rotorblad het meeste invloed hebben op de uitkomst. Dus de invloed van het zwaartepunt van het rotorblad, de pitch angle en de rotorsnelheid hebben een sterk grotere invloed op de uitkomsten dan de luchtkrachten die optreden tijdens de vlucht.

Turner (1987)

Een Monte Carlo simulatie voor de berekening van bladworp. Hierbij worden dus op basis van een variabiliteit in invoergegevens een veelvoud aan berekeningen uitgevoerd waarbij een analyse uitgevoerd kan worden over de resultaten. Het onderzoek omschrijft de vorm van het kogelbaanmodel zoals dat in de huidige module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid wordt gebruikt. Het onderzoek geeft de verklaring weer voor de piekvorm die optreedt bij het grafisch weergegeven van het bladworp rekenmodel als gevolg van het gebruik van één rotorsnelheid, een rekenmodel zonder lift en drag effecten en de distributie van een sinusvorm van de rotatie van een rotorblad. Vervolgens worden de volgende variabelen toegevoegd in de Monte Carlo analyse: "Windrichting, Windsnelheid, breekpunt langs het rotorblad, rotatiepositie op moment van breken, draaisnelheid rotorblad". De kansverdeling behorende bij bepaalde variabelen is meegenomen in de analyse.

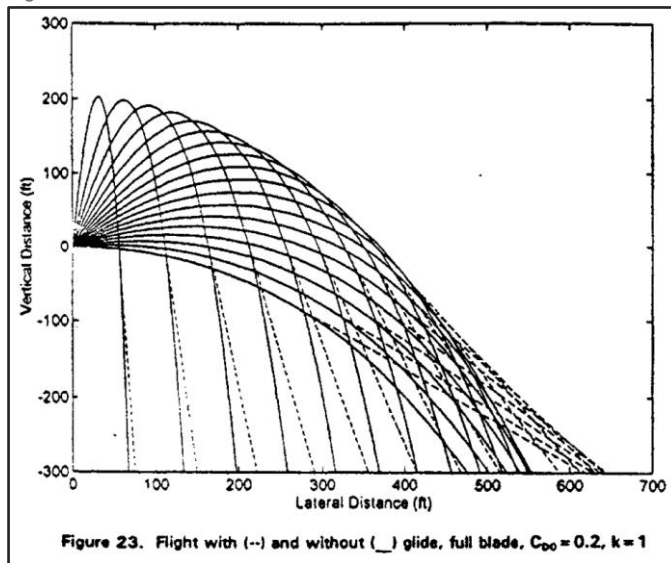
Figuur 3.1 WT uit 1981



Eggers et al. (2001)

Omschrijving van een rekenmodel voor bladworp met aandacht voor de mogelijkheid van extra werpafstanden als gevolg van zweefvluchten van het rotorblad. Dit heeft voornamelijk invloed op de werpafstand in de richting van meewind (dus haaks op de rotatiehoek). Deze verplaatsing langs de windrichting is het grootste bij een recht omhoog geworpen rotorblad. Bij dit scenario is de haakse werpafstand echter minimaal waarmee de totale invloed van rekening houden met zweefvluchten op het maximum risico in de omgeving beperkt is.

Figuur 3.2 Vlucht rotorblad met en zonder 'zweven'



Seifert et al. (2003)

Een overzicht van modellering en enkele praktijkresultaten van ijsworp en ijsval situaties. Enkele generieke formules voor bepaling van de maximaal mogelijke afstand. Berekening van risico vindt plaats door een kogelbaanmodel berekening inclusief windsnelheden.

Larwood (2005)

Onderzoek naar bladworp effecten en gebruik van standaardafstanden. Maakt gebruik van een versimpelde versie van het 6 degrees of freedom (6-DOF) rekenmodel voor bladworp gebaseerd enkel op de geometrische eigenschappen van het model zonder toevoeging van luchtkrachten, windsnelheidsverdelingen of andere eigenschappen.

Madsen et al. (2005)

Praktijksimulatie van bladworp en vergelijking met computer simulaties en praktijkvoorbeelden. Enkele relevante conclusies worden getrokken uit de resultaten. Ten eerste is de invloed van dynamische stabiliteit op de werpafstand tijdens de vlucht minimaal (enkel parallel op de windrichting enige invloed). Ten tweede blijken de berekende modelmatige uitkomsten circa 30% tot 40% groter te zijn dan de uitkomsten uit de praktijksimulaties.

Slegers et al. (2009)

Analyseert de trefkansen van een hoogspanningslijn gebaseerd op bladworp en gebruikt hiervoor een 6-DOF rekenmodel voor bladworp en partiële delen bladworp inclusief aerodynamische krachten uitgevoerd

met een Monte Carlo simulatie. Geeft onder andere inzicht in het verschil in optredend risico voor een lijnobject in het verschil in effecten tussen gehele bladworp en partiële bladworpeffecten.

Rogers et al. (2011)

Analyse van het nut van het gebruik van setback distances (standaardafstanden) in vergelijking met een dynamisch rekenmodel voor bladworp. Gebruikt een 6 degrees of freedom (6-DOF) rekenmodel met Monte Carlo simulaties om een statistische distributie van bladfragmenten te bepalen. Inclusief bladdelen van 20, 40, 60, 80 en 100% bladworp. Het onderzoek omschrijft een deel van de problematiek rond de keuze voor een standaardafstand als het gaat om beperking van het risico tegen bladworp. Adviseert een toe te passen veiligheidsafstand gebaseerd op de kans om geraakt te worden door bladworp van een bepaald formaat rotorbladdeel. Hiermee wordt ondanks dat er een kans is op worp van kleinere bladdelen op grotere afstand een bepaalde grens getrokken.

Moura Carneiro et al. (2012)

Een algemeen overzicht over het aantal dodelijke slachtoffers bij windturbines. Zowel interne als externe veiligheidsaspecten zijn beschouwd. Ter indicatie is een Groepsrisico F/N Curve gebruikt om de maatschappelijke risico's weer te geven. Voor de uitvoering van dit onderzoek geen verdere relevante informatie.

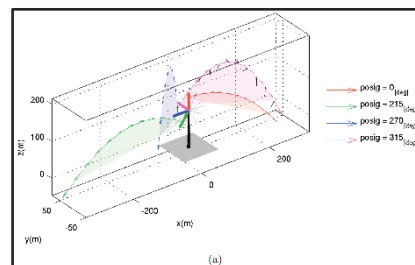
Carbone & Afferante (2013)

Een analyse van het faalscenario bladworp en gebruik van een rekenmodel gebaseerd op een 6 degrees of freedom (6-DOF) rekenmodel oplosbaar in een rekenmodel door de inputgegevens over de windsnelheidsverdeling en windrichtingsverdeling van de specifieke locatie in te voeren als te berekenen waarde (in tegenstelling tot Monte Carlo Analyse waarbij dit vaak als de variabelen wordt gedefinieerd).

Sarlak & Sorensen (2015)

Omschrijft een rekenmodel voor het faalscenario bladworp door gebruik te maken van een kogelbaanmodel met aerodynamische luchtkrachten tijdens de vlucht van het rotorblad. Het rekenmodel houdt rekening met de mogelijkheid van het breken van het rotorblad op n verschillende locaties over de lengte van een rekenblad en heeft daardoor ook mogelijkheden om de gevolgen van partiële bladbreuken te omschrijven. Het rekenmodel wordt opgelost door toepassing van de methode van een fourth order Runge-Kutta-Nystrom of een third order Adams-Bashforth.

Figuur 3.3 Voorbeeld bladworpberekening



Sarlak & Sorensen (2016)

Is een uitbreiding van het onderzoek uit 2015 waarbij extra berekeningen zijn toegevoegd om rekening te houden met verschillende luchtlagen (windprofiel) tijdens de vlucht. Er is een doorkijk gegeven van theoretisch grotere windturbines (5, 10 en 20 MW) dan het geanalyseerde standaardformaat van 2,3 MW. Ook is een analyse van de potentie voor ijsafworp meegenomen in de berekening.

Palmer (2018)

Een kritische review en perceptie op de veiligheidsmentaliteit van windenergie. Omvat een groot aantal voorbeelden van faalscenario's en specifieke discussiepunten over de gebruikte rekenmodellen en gehanteerde uitgangspunten van het doen van een risicoberekening.

Brouwer et al. (2018)

Onderzoek naar de oorzaken van risico's voor de externe veiligheid rondom windturbines. Uitgebreide analyse van faalscenario's via het opstellen en analyseren van een foutenboomanalyse (Fault Tree Analysis). Geeft additionele informatie over de kans van optreden van specifieke faalscenario's en hun relevantie in het licht van het groter worden van windturbines. Er wordt aandacht gegeven aan het werpen van partiële rotorbladen in vergelijking met gehele rotorbladen en aan de gevolgen van rotorval met of zonder de nacelle (gondel).

Figuur 3.4 Fault tree analysis uit studie

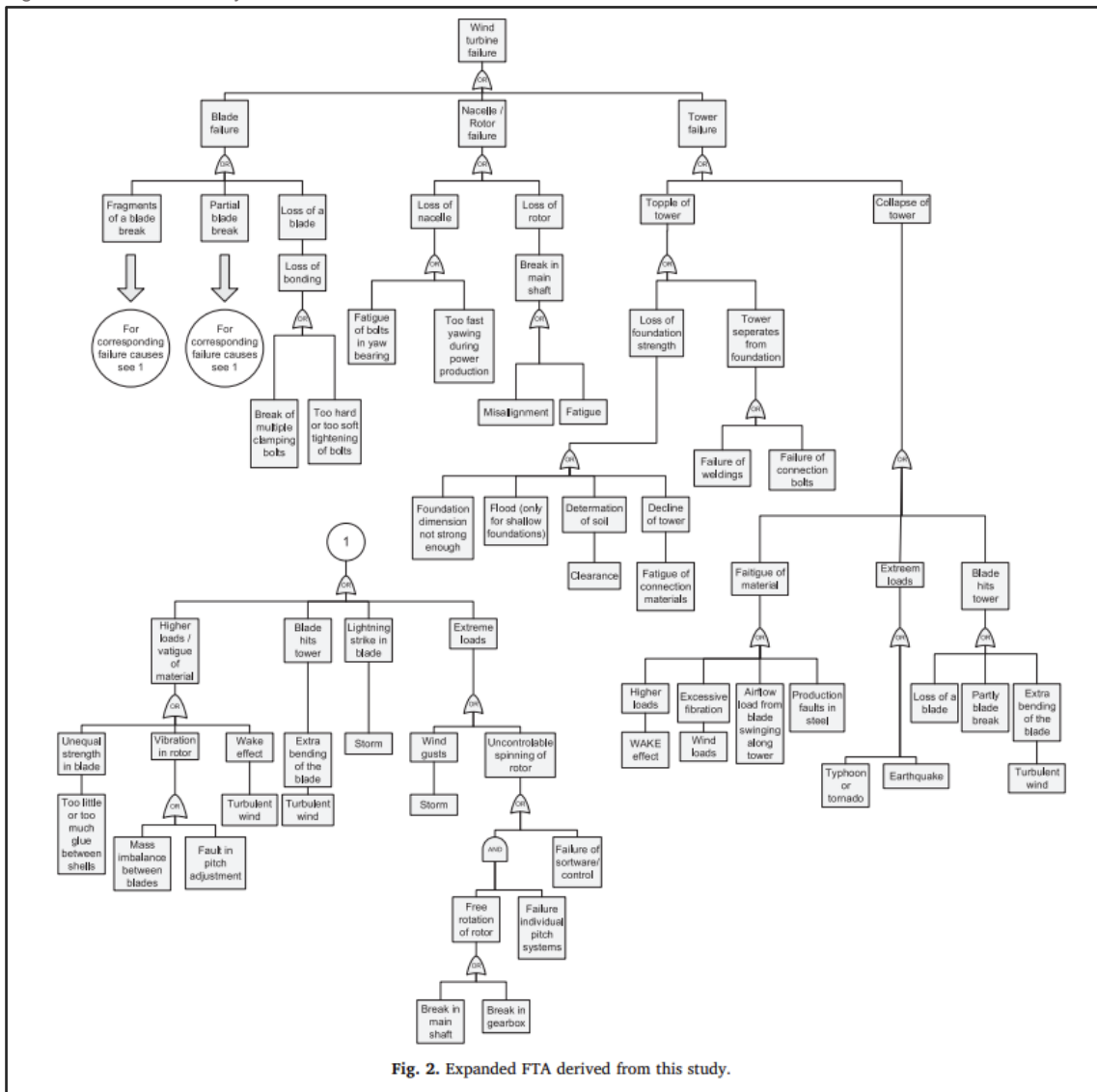


Fig. 2. Expanded FTA derived from this study.

Van belang voor dit onderzoek is dat een gekozen faalscenario meerdere verschillende situaties van falen kan omvatten. Het bovenliggende faalscenario dient dan als representatieve weergave van onderliggende kleine faalscenario's die niet elk individueel beschouwd hoeven te worden om het effect op de omgeving inzichtelijk te maken. Zo zal er verschil zijn in effecten tussen het vallen van een rotorblad als gevolg van een brand en het vallen van een rotorblad als gevolg van een structureel falen van een onderdeel. Het kan

een bewuste keuze zijn om de rekenmodellering te baseren op een specifiek 'level of detail' waarbij de effecten op de omgeving inzichtelijk worden maar waarbij niet elke situatie tot uiting hoeft te komen in de rekenmethodiek.

Rastayesh et al. (2019)

Onderzoekt de evaluatie van de economische waarde en gevolgen van de installatie van een verwarmingssysteem in relatie tot het aantal potentiële verkeersslachtoffers als gevolg van ijsworp en ijssval. Voor de bepaling van trefrisico's van verkeerspassanten wordt uitgegaan van ijsworp en treffen van windturbineonderdelen met een uniforme verdeling over windrichtingen en afstand. Er wordt daarmee geen berekening gedaan van de werpafstanden van ijs en/of rotorbladen.

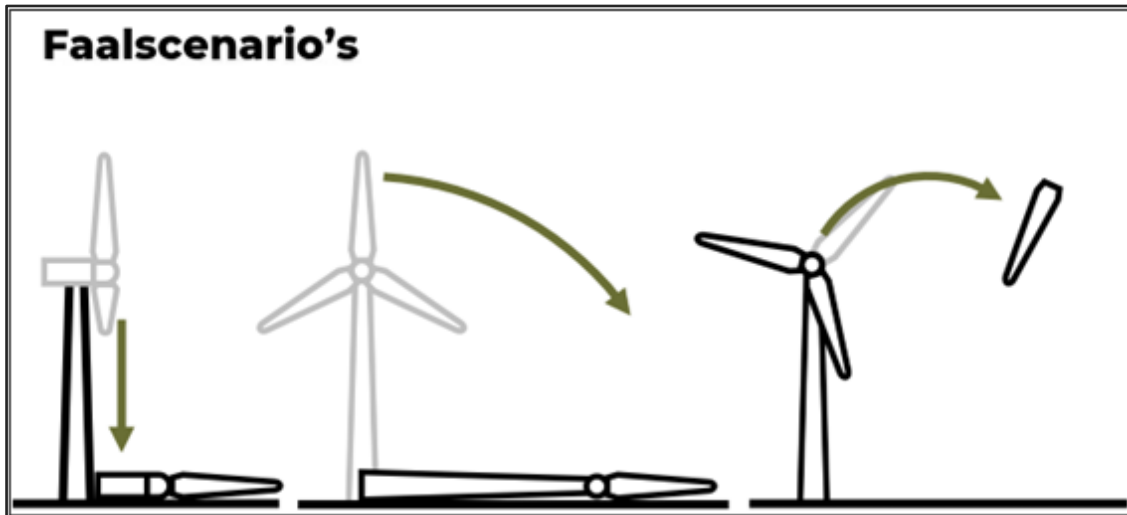
3.4 Reactie klankbordgroep

De verschillende gevonden rekenmodellen zijn gepresenteerd aan de klankbordgroep. Er zijn door de experts in de klankbordgroep geen additionele rekenmodellen aangegeven (buiten de rekenmodellen in de huidige module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid).

4 Omschrijving Faalscenario's

In het kort zijn in onderstaande Figuur 4.1 de verschillende faalscenario's (los van ijsval / ijsworp) die een significant risico voor de omgeving veroorzaken grafisch weergegeven.

Figuur 4.1 Weergave faalscenario's zij aanzicht



4.1 Oorzaken en gevolgen

Een faalscenario omschrijft de scenario's die weergeven welke gevolgen kunnen optreden. Het optreden van een faalincident kan meerdere oorzaken hebben. Hoewel de oorzaken van belang zijn om erachter te komen hoe faalincidenten ontstaan en hoe deze voorkomen kunnen worden door de interne veiligheid van windturbines te verbeteren zijn de oorzaken niet direct van belang voor de bepaling van de externe effecten. Het maakt voor de bepaling van de externe risico's niet uit waarom een windturbine faalt maar wel hoe de windturbine faalt en wat voor gevolgen (risico's) dat voor de omgeving oplevert.

Een aantal bekende oorzaken die kunnen leiden tot het falen van een windturbine zijn: brand in de windturbine, blikseminslag, mechanische defecten aan componenten, optredende krachten op de constructie boven de ontwerpeisen, installatiefouten, achterstallig onderhoud aan kritische onderdelen en/of falen door slijtage of ouderdom. In deze rapportage wordt gekeken wat de gevolgen zijn van het falen van de windturbine en/of er op basis daarvan gevolgen optreden voor de omgeving. De gevolgen worden omschreven door verschillende faalscenario's te omschrijven. De oorzaak waarom een faalscenario optreedt is geen onderdeel van deze analyse. Wel kunnen verschillende oorzaken leiden tot verschillende faalscenario's.

4.2 Mastfalen

Het faalscenario mastfalen omschrijft alle situaties waarbij er schade aan het fundament of de masttoeren ontstaat waardoor de windturbine in zijn geheel of gedeeltelijk omvalt. Samengevat zijn er twee verschillende scenario's die dit veroorzaken. Falen van het fundament zelf of de aanhechting tussen het fundament en de masttoeren of het knikken / falen van de masttoeren zelf. Bij stalen conische masttoeren betreft dit vaak een 'knik' situatie terwijl bij modulair stalen masten (individuele elementen) of betonnen

masten eerder van instorting sprake is. Schade aan de mast kan ontstaan door het falen van de eigen constructie of doordat een onstabiel rotorblad de mast beschadigd of raakt met hoge kracht.

Figuur 4.2 Voorbeelden mastfalen rechts: masttoren falen en links fundatie falen



NB. In Nederland wordt geen gebruik gemaakt van ondiepe fundaties zoals op de linkerfoto zichtbaar is.

In alle gevallen valt een onderdeel van de windturbine tot maximaal een tiphoogteafstand waarbij de afstand van de vallende onderdelen kan afnemen indien sprake is van een resterend rechtopstaand torendeel.

4.3 Gondelfalen

Bij gondelfalen gaat het om het naar beneden vallen van de hub inclusief rotorbladen en/of de gehele gondel met de hub en rotorbladen vanaf de bovenkant van de masttoren. De masttoren zelf blijft dus rechtop staan. Het faalscenario omschrijft een situatie waarbij grote onderdelen van de windturbine recht naar beneden vallen. De kans dat enkel het draaiende element (de hub) naar beneden valt is aanzienlijk groter dan de kans dat de gehele gondel naar beneden valt terwijl de masttoren wel intact blijft.

Omdat de masttoren intact blijft gaat het hier enkel om onderdelen die direct naar beneden vallen vanaf de positie waar ze zich bevinden. De onderdelen vallen daarmee maximaal tot op een afstand gelijk aan hun eigen maximale dimensie (tuimelen). Indien de onderdelen verder vallen is er sprake van het faalscenario mastfalen of bladworp bij nominaal toerental in de plaats van het faalscenario gondelfalen.

Figuur 4.3 Weergave van gondelfaalscenario



4.4 Bladworp

Bij het faalscenario bladworp gaat het om het werpen van een rotorblad of een deel van een rotorblad tijdens rotatie van de rotorbladen. Situaties waarbij tijdens stilstand een rotorblad naar beneden komt zijn beter passend onder het onderdeel gondelfalen om de effecten mee te omschrijven. Voor bladworp zijn de specifieke eigenschappen van de windturbine waaronder het rotortoerental, de oriëntatie van de windturbine ten opzichte van de heersende windrichting, het zwaartepunt van het rotorblad en de ashoogte van groot belang voor de bepaling van de afstand tot waar een rotorblad of een deel van een rotorblad geworpen kan worden. Het formaat of de dimensie van het rotordeel of rotorblad wat wordt geworpen heeft ook grote invloed op het risico wat hieruit ontstaat. Bij het vallen van de gondel zal er bijvoorbeeld altijd een object van ongeveer hetzelfde formaat en gewicht op de grond vallen terwijl bij bladworp er zowel een geheel rotorblad als een deel van een rotorblad van bijvoorbeeld 1 meter lengte geworpen kan worden. De gevolgen van het werpen van een geheel rotorblad of een partieel deel van een rotorblad zijn sterk verschillend in zowel impact op de omgeving als maximale effectafstand.

Figuur 4.4 Voorbeelden faalincidenten bladworp



4.5 Vallende onderdelen en ijs

4.5.1 IJsvorming

Bij weersomstandigheden waarbij lage temperaturen voorkomen in combinatie met een hoge luchtvochtigheid kan er ijsvorming plaatsvinden op windturbines. IJsvorming op een windturbine kan op 3 verschillende manieren ontstaan.

Rijp

Rijp kan op een windturbine ontstaan bij een hoge luchtvochtigheid in combinatie met temperaturen onder of rond nul. Als een turbine niet draait, is het risico van rijpvorming niet anders dan bij elke andere constructie. Wanneer de turbine draait, versnelt het proces van rijping. Door de roterende beweging van de bladen wordt de rijp samengedrukt en ontstaan er ijsfragmenten aan de turbinebladen. Bovendien kunnen de ijsblokken worden weggeslingerd.

Sneeuw

Sneeuw kan op de turbine blijven kleven (bladen, mast, gondel). Sneeuw is licht en wanneer deze valt zal dit geen risico zijn voor mensen op de grond. Wel bestaat er het risico dat natte/smeltende sneeuw opvriest tot ijspegels of ijsblokken die een gevaar kunnen vormen voor mensen op de grond.

IJzel

Een laag ijzel op de windturbine kan een risico vormen voor mensen op de grond wanneer deze afsmelt.

Volgens de Nederlandse windenergie associatie komen gemiddeld in Nederland tussen de twee tot zeven dagen per jaar omstandigheden voor waarbij ijsafzetting op windturbines kan optreden². De vorming van ijsafzetting aan de windturbineonderdelen wordt beïnvloed door de omgevingstemperatuur, de temperatuur van de windturbine zelf, de luchtvochtigheid, de windkracht en de windrichting. De vorming van ijs kan een gevaar vormen voor de nabije omgeving van de windturbine als gevolg van het naar beneden vallen van ijsbrokken.

Er zijn twee soorten gevolgen te onderscheiden die zich kunnen voordoen bij ijsafzetting op de rotorbladen, namelijk het werpen van ijsfragmenten bij een windturbine in bedrijf en het vallen of afglijden van ijsfragmenten van een windturbine buiten bedrijf.

Bij een windturbine in bedrijf kunnen ijsfragmenten bij ijsafzetting van de rotorbladen worden geworpen. De fragmenten kunnen op relatief grote afstanden worden geworpen. Het risico dat deze geworpen ijsfragmenten veroorzaken op de omgeving is afhankelijk van onder andere de grootte en massa van het fragment, het toerental van de rotor en het moment waarop ijs wordt geworpen (moment waarop ijs loslaat van de bladen). Windturbines moeten uit bedrijf worden genomen bij ijsafzetting om het werpen van ijs te voorkomen indien dit een gevaar oplevert voor de omgeving³. De windturbines worden hierbij terug geregeld tot een toerental van minder dan 1 rpm waarbij ijs niet meer van de rotorbladen kan worden geworpen.

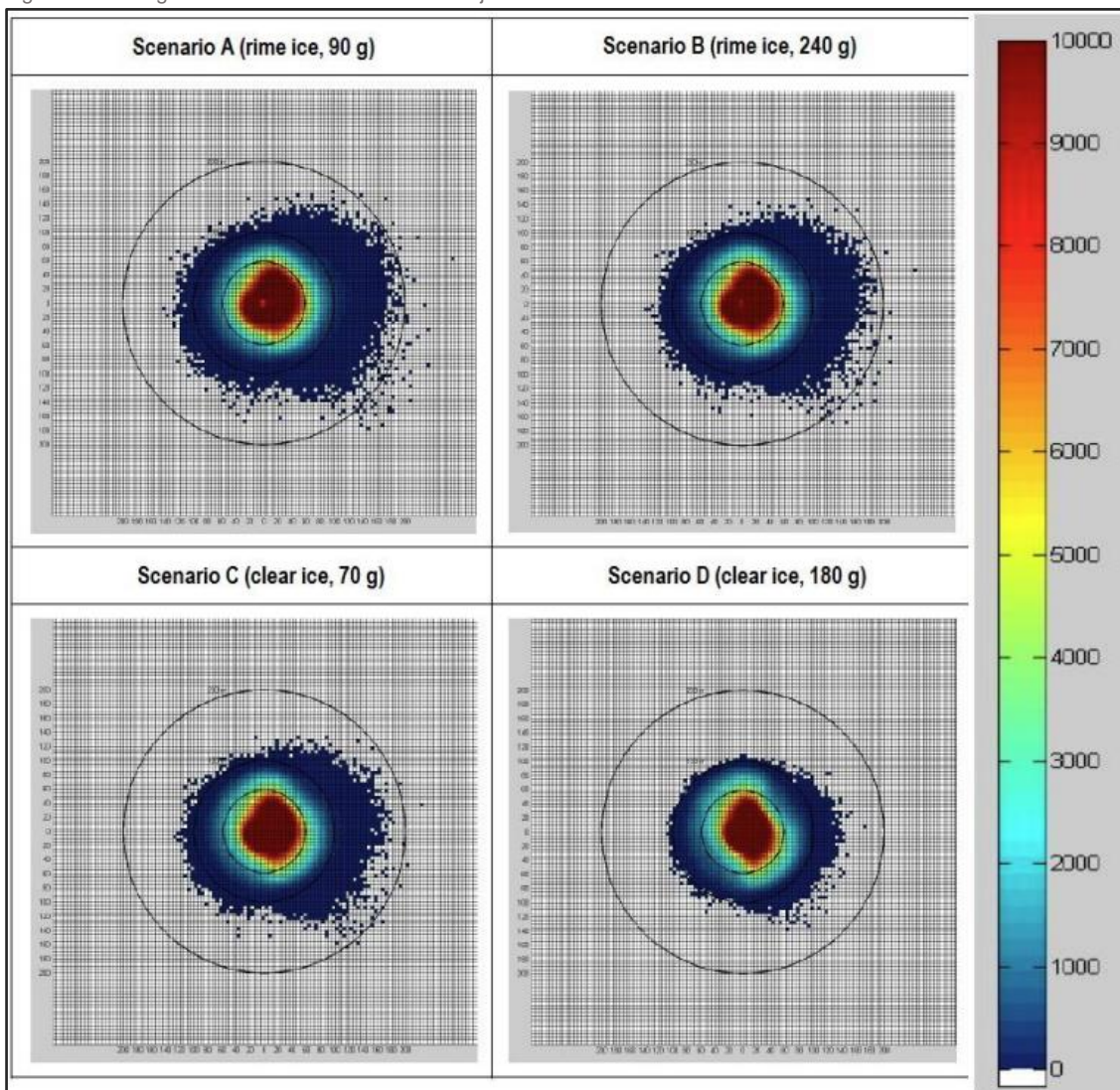
Bij een windturbine uit bedrijf kan ijs van de gondel en rotorbladen naar beneden vallen, net zoals dit zou kunnen bij andere bouwwerken zoals torens en hoogspanningsmasten. Voor windturbines is de positie van de gondel en het rotorvlak bij het stilzetten van de turbine bij ijsafzetting van belang. Er kan een dusdanige positie worden gekozen dat er geen of zo min mogelijk openbare wegen, gebouwen, infrastructuur, etc. onder de rotorbladen aanwezig zijn. Een Ice Prevention System (IPS) neemt actief de windturbine uit bedrijf. Daarmee wordt het risico van vallend ijs op de omgeving geminimaliseerd. Volgens een IPS-operator met 8 jaar ervaring met 62 windparken in de Benelux wordt gemiddeld per windturbine in de praktijk eens in de drie jaar gevaarlijk ijs gedetecteerd als gevolg van ijzel en sneeuw.

Het grootste deel van het vallende ijs zal vallen binnen de zone waar de windturbine overheen kan draaien. In de heersende windrichting kunnen de vallende ijsbrokken nog door de wind een korte afstand verwaaid worden. Ijsval simulaties door TUV Sud die rekening houden met de windsnelheid en windrichting laten zien dat de kans van vallen van een ijsbrok binnen een zone van circa een halve rotordiameter + een verwaai afstand meer dan 10 maal zo groot is als buiten de afstand van een halve rotordiameter + een verwaai afstand. Een verwaai afstand kan enkele meters tot een tiental meter groot zijn.

² Data afkomstig uit B. Tammelin et al., "Wind Energy Production in Cold climates (WECO)," FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE, JOR3-CT95-0014, 1998. (<https://pdfs.semanticscholar.org/203e/01c012a2d8366a76a20809326f78ccb7a674.pdf>).

³ volgt uit artikel 3.14 Activiteitenbesluit Milieubeheer of in het concept voor de Omgevingswet in artikel 4.428 van het Besluit activiteiten leefomgeving.

Figuur 4.5 Weergave simulatie trefkansvallend ijs



Bron: Assessment of ice throw and ice fall risks nearby wind energy installations, M. Kaposvari, TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Poster from Winterwind International Wind energy conference 2015.

In Nederland is de kans op optreden van de meteorologische condities waaronder significante ijsvorming optreedt aanzienlijk kleiner dan in bergachtige gebieden in Duitsland en/of in noordelijker gelegen gebieden zoals Noorwegen. Voor vallend ijs tijdens stilstand van de windturbine is de zone waarin het gros van de ijsbrokken vallen beperkt tot een afstand van circa een halve rotordiameter + een verwaaiafstand. Om rekening te houden met een beperkte zone van verwaaiend ijs wordt aanbevolen om voor de verwaaiafstand een extra zone van enkele meters tot een tiental meter vanaf de zone van rotoroverdraai (= halve rotordiameter) aan te houden. Binnen deze zone kan kwalitatief onderzoek plaatsvinden of er activiteiten of objecten aanwezigheid kunnen zijn waarbij het vallen van ijs tot risico's voor personen of objecten kan leiden. Enkel als de omgeving gevoelig is voor de effecten van vallend ijs kan nadere analyse benodigd zijn. Enkele voorbeelden kunnen zijn: aanwezigheid grootschalige zonneparken, parkeerterreinen, open lucht terrein voor groepsevenementen of infrastructuur met hoge snelheden. Met

behulp van de analyses en maatregelen uit het ijsprotocol van NWEA⁴ kunnen de risico's voor gevoelige terreinen en activiteiten worden geminimaliseerd.

De grotere afstanden die worden gevonden voor ijsbrokken zijn voornamelijk afkomstig van de extra energie die meegegeven wordt bij het actief draaien van de windturbine. In een grotere omgeving kan dus nog wel een effect optreden als gevolg van geworpen ijs vanaf de ronddraaiende rotorbladen die risico vormen tot een maximale effect-afstand van (rotordiameter + ashoogte) x 1,5 volgens het onderzoek van Seifert et al (2003). Uit meerdere onderzoeken blijkt dat het hanteren van deze afstand een ruime overschatting oplevert van de daadwerkelijke maximale effectafstanden van ijsworp. Het onderzoek van de Uppsala Universiteit van Renström (2015)⁵ geeft een analyse van de betrokken werpafstanden van ijs tijdens verschillende omstandigheden. Hieruit blijkt dat het gros van de geworpen brokstukken beperkt blijft tot een afstand van ongeveer een tiphoogte. Slechts in enkele zeer specifieke situaties met ofwel zeer hoge windsnelheden (>15 m/s) ofwel sferische ijsbrokstukken ofwel brokstukken met grote hoeveelheid kinetische energie wordt een grotere afstand dan een tiphoogteafstand behaald. De kans van optreden van deze omstandigheden, in combinatie met de benodigde weersomstandigheden, is zodanig klein dat daar geen significante risico's van afkomstig zijn. Voor de zone binnen een tiphoogteafstand wordt daarmee aanbevolen om te analyseren of er een reden in de omgeving aanwezig is om de kans op ijsworp te minimaliseren. De kans op ijsworp binnen deze tiphoogteafstand kan voldoende worden geminimaliseerd door een ijsdetectie systeem uit te voeren wat de rotorbladen stilzet bij significante ijsaangroei. Bij toepassing van een dergelijk detectie systeem blijft de ijsvalrisico zone beperkt tot de afstand van een halve rotordiameter + een verwaaiafstand voor vallend ijs⁶.

Gezien de kleine kans van voorkomen van ijsvorming in Nederland en de te nemen mogelijke maatregelen om de risico's in de omgeving te verkleinen wordt aanbevolen om binnen de aangegeven maximale afstanden enkel een kwalitatieve analyse van de risico's uit te voeren. Voor de zone tot aan een tiphoogteafstand kan overwogen worden of uitvoering van een ijsdetectiesysteem benodigd is en voor de zone tot aan een halve rotordiameter + een verwaaiafstand kunnen aanvullende maatregelen zoals bijvoorbeeld omschreven in het ijsprotocol van NWEA geschikt zijn om toe te passen. Voorbeelden van maatregelen zijn waarschuwingsborden, extra monitoring tijdens winterse omstandigheden, afzettingen wegen/terreinen en/of veilige positionering turbinebladen. Kwantitatieve analyse van de effecten van ijsval / ijsworp is enkel benodigd indien de mogelijk uit te voeren maatregelen niet leiden tot een voldoende veilige situatie als gevolg van een zeer bijzondere kwetsbaarheid van de omgeving⁷. Het onderwerp ijsval en ijsworp wordt verder niet rekentechnisch behandeld in deze rapportage.

4.6 Gevolgen actualisatie faalfrequenties 2022

Op 12 mei 2022 is een rapportage van het RIVM gepubliceerd met een actualisatie van het onderzoek naar de faalfrequenties van windturbines. Hieruit blijkt dat er aanleiding is om te onderzoeken of de faalscenario's die worden gebruikt anders ingedeeld moeten worden. Ook heeft er een update van de

⁴ Zoals gepubliceerd als versie 15 op: <https://www.nwea.nl/kb/handleiding-ijsprotocol/>. Datum van raadpleging 25-09-2023

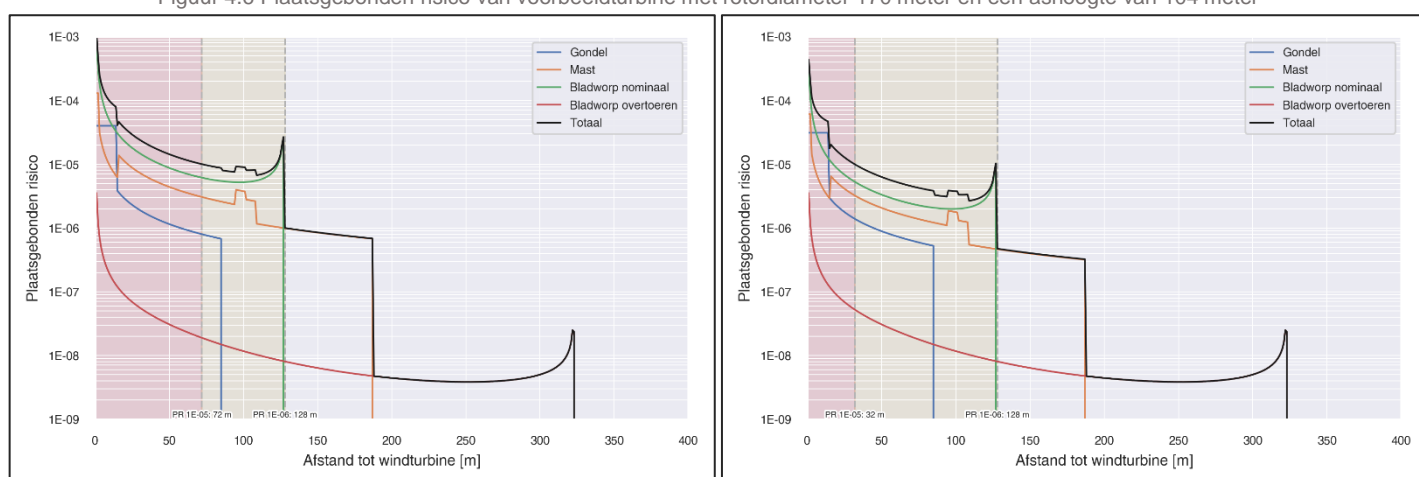
⁵ *Modelling of ice throws from wind turbines*, Joakim Renström, 2015, Uppsala University - Department of Earth Sciences.

⁶ Als verwaaiafstand kan een tiental meters (bijvoorbeeld 11 meter) gebruikt worden als maximale afstand waarmee met het gros van de situaties rekening wordt gehouden.

⁷ Bijvoorbeeld een windturbine op een open lucht evenemententerrein met continue aanwezigheid van personen tijdens winterse omstandigheden waarbij geen veilige rotorposities kunnen worden gerealiseerd in de omgeving. In vrijwel alle andere situaties wordt voldoende veiligheid gegarandeerd door toepassing van de mogelijke maatregelen.

faalfrequenties plaatsgevonden. Hieruit blijkt over het algemeen (zonder de opsplitsing van faalscenario's) dat de faalfrequenties afnemen. Zowel de aanpassing van de faalscenario's als de actualisatie van de faalfrequenties kan invloed hebben op de ligging van de plaatsgebonden risico contouren. Om de verschillende gevolgen van aanpassingen goed inzichtelijk te maken is het noodzakelijk om ook te laten zien wat enkel de actualisatie van de faalfrequentie cijfers zelf voor gevolgen heeft. Om dit te kunnen analyseren is er in eerste instantie van uitgegaan dat de faalscenario's niet worden opgesplitst in sub-faalscenario's die benoemd zijn in de rapportage van de actualisatie faalfrequenties 2022. De sub-faalscenario's zijn samengevoegd tot één hoofdfaalscenario om een directe vergelijking te kunnen doen met de faalscenario's uit module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid. In onderstaande twee grafieken zijn voor éénzelfde voorbeeldwindturbintype met een rotordiameter van 170 meter en een ashoogte van 104 meter de gevolgen doorgerekend als de faalscenario's niet worden aangepast maar de actualisatie van de faalfrequenties wel wordt toegepast.

Figuur 4.6 Plaatsgebonden risico van voorbeeldturbine met rotordiameter 170 meter en een ashoogte van 104 meter



Links: Originele faalfrequenties en Rechts: Actualisatie faalfrequenties 2022

4.6.1 Ligging PR10⁻⁰⁶ contour

Voor deze windturbine is zichtbaar dat het risico van het mastfaalscenario afneemt met 53% maar dat dit bij een windturbine van dit formaat geen invloed heeft op de ligging van de PR10⁻⁰⁶ contour die bij dergelijke grotere windturbines maatgevend wordt bepaald door het faalscenario bladworp bij nominaal toerental. Voor kleinere windturbines⁸ kan het faalscenario mastfalen wel maatgevend zijn waardoor bij toepassing van de geactualiseerde faalfrequenties het faalscenario bladworp bij nominaal toerental wel bepalend wordt voor de ligging van de PR10⁻⁰⁶. Het kantelpunt waarop het maatgevende faalscenario wijzigt varieert naar gelang de eigenschappen van een windturbintype maar ligt over het algemeen rond windturbintypes met een tiphoogte van 160 meter.

4.6.2 Ligging PR10⁻⁰⁵ contour

De ligging van de PR10⁻⁰⁵ contour wordt bepaald door het gecombineerde risico afkomstig van alle vier de faalscenario's. Dit betekent dat dit faalscenario sterk wordt beïnvloed door de afname van de faalfrequenties van alle faalscenario's. Voor de voorbeeldwindturbine betekent dit een afname van de

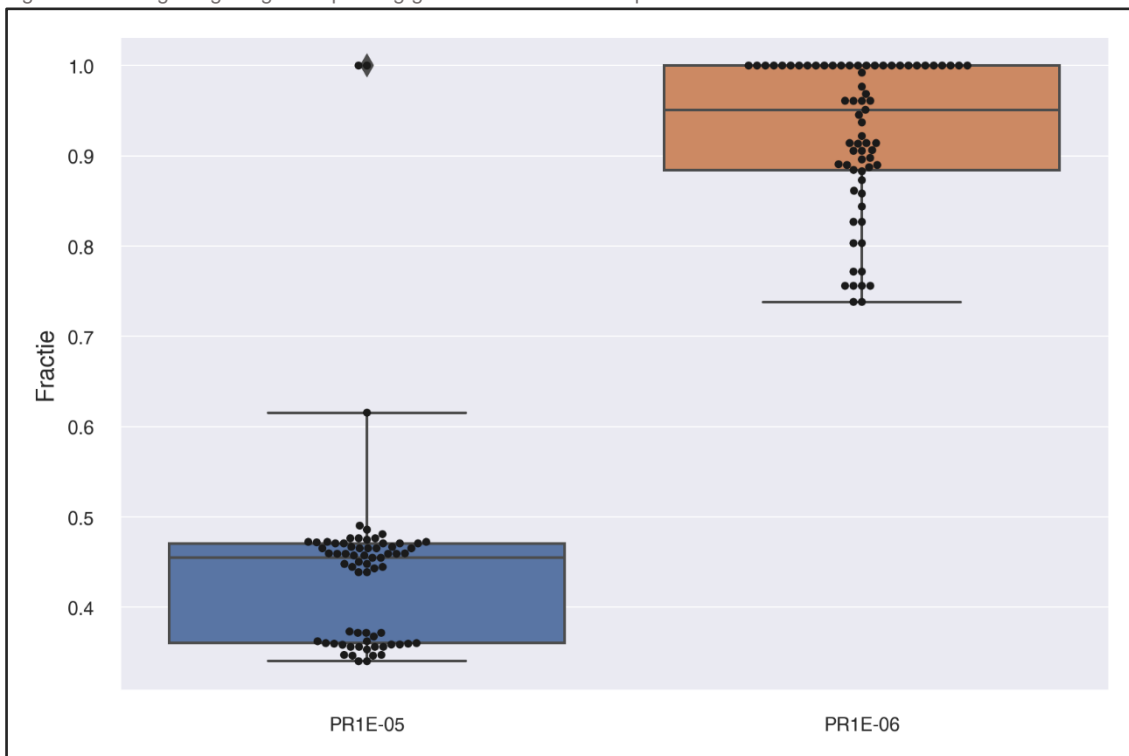
⁸ Over het algemeen geldt dit voor windturbines met een tiphoogte kleiner dan 170 meter.

ligging van de PR10⁻⁰⁵ contour van 72 naar 32 meter. Dit is het gevolg van de afname van de faalfrequenties van het mastfaalscenario van 53%, van het gondelfaalscenario van 22% en van het bladworpsscenario van 62%.

4.6.3 Gevolgen voor alle windturbintypes

Zoals omschreven in bovenstaande paragrafen is het gevolg van het toepassen van de geactualiseerde faalfrequenties niet gelijk voor elk windturbintype en elke ashoogte. In onderstaande grafiek zijn de gevolgen weergegeven voor 69 verschillende configuraties van ashoogten en windturbintypes van windturbines en ashoogten die veel worden toegepast in Nederland. De benodigde inputgegevens zijn afkomstig van data uit de Windpro WTG Catalogue en de Pondera WTG Database (juni 2022). In deze grafiek is zichtbaar dat de ligging van de PR10⁻⁰⁵ contour voor 96% van de windturbintypes afneemt met 40 tot 50%. Voor de PR10⁻⁰⁶ contour is de ligging voor 77% van de windturbines met minder dan 10% afgenomen. Voor de overige windturbines is de afname maximaal 30%. Afname van de PR10⁻⁰⁶ ligging is in alle situaties het gevolg van een verlaagd mastfaalrisico waarbij het faalscenario bladworp bij nominaal toerental maatgevend wordt. In de situaties zonder afname was het faalscenario bladworp bij nominaal toerental reeds maatgevend.

Figuur 4.7 Weergave gevolgen toepassing geactualiseerde faalfrequenties.



NB: Herkomst gegevens februari 2022

4.6.4 Conclusie actualisatie faalfrequenties

Door de actualisatie van de faalfrequenties in eerste instantie toe te passen op de originele berekeningsmethodieken kan in het vervolg van deze rapportage een eerlijke vergelijking worden gemaakt van de gevolgen van het toepassen van andere berekeningsmethodieken voor de verschillende faalscenario's.

5 Beoordeling parameters

De kwaliteit van een rekenmethodiek is sterk afhankelijk van de benodigde inputgegevens. Er dienen verschillende parameters ingevoerd te worden als input in een rekenmodel. Het is van groot belang dat niet alleen de formules van de rekenmethodiek zelf kwalitatief goed zijn maar dat ook de ingevoerde parameters voldoen aan de eerder in hoofdstuk 2 genoemde beoordelingscriteria. In dit hoofdstuk worden de voornaamste inputgegevens geanalyseerd om te onderzoeken wat de kwaliteit is van de algemeen benodigde parameters. Een rekenmodel kan slechter scoren op de beoordelingscriteria indien het gebruik maakt van kwalitatief slechtere parameters. In veel gevallen kan het correct definiëren van een parameter de kwaliteit van een parameter als inputgegeven verbeteren.

5.1 Kritiek oppervlakte rotorblad

Het oppervlak van een rotorblad wordt op meerdere locaties in de huidige rekenmethodiek gebruikt om de risico's voor de omgeving te berekenen. Zo wordt het gebruikt bij de berekening van het plaatsgebonden risico van gondelfalen en mastfalen als het gaat om de trefkans binnen de zone waar de rotor kan vallen (solidity). Ook wordt het gebruikt in de bepaling van de trefkans bij bladworp om te bepalen wat de kans is dat een persoon getroffen wordt indien het zwaartepunt van het rotorblad naast een persoon valt. In module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid wordt daarbij onderscheid gemaakt tussen het kritiek oppervlakte van een rotorblad en de oppervlakte van een rotorblad. Het kritiek oppervlak staat voor het oppervlak wat relevant is bij het treffen van een persoon en kan berekend worden met de formule 2.25a of met een generieke vuistregel formule 2.25b. De formule 2.25b is afkomstig uit de toelichting van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid module IV en beschrijft echter een formule die het gewone bladoppervlak beschouwt. Deze formule lijkt gebaseerd te zijn op zeven datapunten uit 2005. Er zit daarmee een onduidelijkheid in de herkomst van de formules en de gebruikte formules daarbij.

Bij toetsing van 28 oppervlakten van rotorbladen van windturbines verkregen uit de Windpro WTG Catalogue⁹ en datasheets van fabrikanten blijkt dat formule 2.25b een overschatting maakt van het daadwerkelijke oppervlak van een rotorblad. De formule is daarmee niet langer geschikt om voor grotere windturbines een goede inschatting te maken van de oppervlakte.

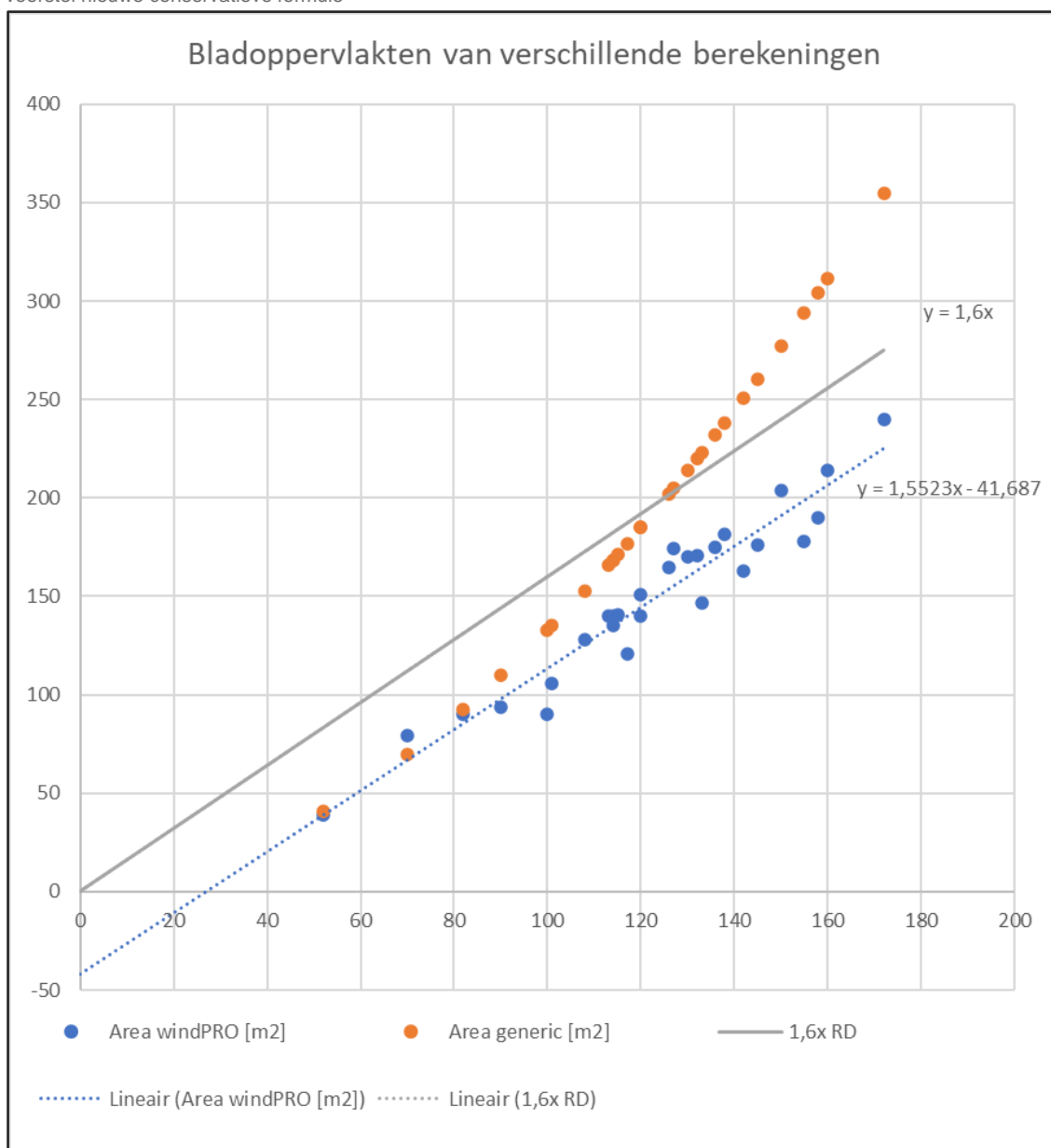
Als het gaat om de bepaling van het kritieke oppervlakte voor de bepaling van de raakkans van een persoon dan kan er beter een formule worden gebruikt die analoog aan formule 2.25a een indicatie geeft van de raakkans van een persoon indien een rotorblad naast de persoon valt. Het gebruik van deze formule voegt echter een complexiteit toe aan het berekenen van het kritiek oppervlakte van een rotorblad.

Gezien de resultaten van de waarde van deze formule kan ook de werkelijke oppervlakte van een rotorblad gebruikt worden als 'kritiek oppervlakte' om trefkansen te bepalen. De benodigde gegevens zijn voor de meeste windturbines goed beschikbaar en zijn indien benodigd ook op te vragen bij de fabrikanten van windturbines¹⁰. Oppervlaktes van rotorbladen voor windturbintypes waarvan de oppervlakte (nog) niet bekend is kunnen bepaald worden met een generieke en conservatieve formule.

⁹ Gegevens verkregen op 12 december 2023 uit de 'visual' data van rotorbladen uit de Windpro WTG Catalogue. Deze gegevens worden ingevuld door fabrikanten van windturbines. Extreme waarden die niet konden worden geverifieerd zijn verwijderd.

¹⁰ NB. Voor de bepaling van de oppervlakten voor gebruik in het faalscenario partieel bladworp kan worden uitgegaan van een driehoek als vorm van een rotorblad. De oppervlakten van het laatste 1/3^e bladdeel is dan 1/9^e van het oppervlakte van een rotorblad en voor 2/3^e bladdeel is het oppervlakte 4/9^e maal het oppervlakte van een rotorblad.

Figuur 5.1 Weergave Trendlijn generieke formule (Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid module IV), datapunten en voorstel nieuwe conservatieve formule



Tabel 5.1 Signaleringen bij parameter: kritisch bladoppervlak

Thema van de signalering	Constatering / toelichting
Invloed op uitkomst berekening	Invloed op 10 ⁻⁵ -contour: beperkt Invloed op 10 ⁻⁶ contour: beperkt Invloed op effectafstand: geen.
Correlatie met andere kenmerken windturbine	Het bladoppervlakte wordt relatief gezien kleiner in verhouding met het totale oppervlakte van de cirkel die de rotor beslaat. Hoe groter de rotordiameter hoe groter het bladoppervlak. Grotere windturbines hebben over het algemeen iets slankere rotorbladen dan kleinere windturbines.

Mogelijke variabiliteit van de parameter in de werkelijkheid	De definitie van de parameter is niet eenduidig vastgelegd. Enerzijds wordt de term 'kritisch bladoppervlak' gebruikt om een afgeleide van het bladoppervlak te definiëren waarbij de trefkans van een persoon wordt geanalyseerd en anderzijds gaat het om het daadwerkelijke bladoppervlak welke bijvoorbeeld wordt gebruikt als parameter in de bepaling van de term soliditeit (solidity) (dichtheid van het rotoroppervlak).
Toegankelijkheid broninformatie	De informatie over het bladoppervlak kan bepaald worden uit het bladprofiel zoals dat door de fabrikanten beschikbaar wordt gesteld via een database als de Windpro WTG Catalogue of via technische rapportages. Het bladoppervlak wordt momenteel vaak ingeschat met een generieke formule.
Uniformiteit in broninformatie	De generieke formule voor de bepaling van het bladoppervlak die momenteel vaak gebruikt wordt (Bijvoorbeeld in de Safe-W software) dateert uit 2005 en is bepaald op slechts zeven datapunten met rotordiameters tot maximaal 90 meter. Deze methodiek blijkt tot een grote overschatting te leiden bij moderne windturbines met grotere dimensies. Er is ook een complexere berekeningsmethodiek beschikbaar in het huidige Handboek op basis van rotordiameters en maximale bladbreedtes welke resulteert in iets lagere waarden. Bepalingen van de specifieke bladoppervlakken zijn aanzienlijk lager dan de huidige generieke formules.
Gesignaleerde praktijktoepassing	In de praktijk wordt veelal de generieke formule gebruikt in de meeste berekeningen. Dit zorgt voor een aanzienlijke overschatting van de trefkansen bij grotere windturbines en kan in enkele gevallen zorgen voor een groot verschil in uitkomsten met betrekking tot de ligging van de PR10-6 contour. Voor enkele specifieke windturbineafmetingen kan het kantelpunt van de 10-6 contour precies worden bereikt als gevolg van mastfalen. In dat geval kan de PR10-6 contour aanzienlijk verkleind worden indien een andere waarde voor het bladoppervlak wordt gebruikt. Het huidige handboek geeft niet specifiek aan hoe het bladoppervlak in de berekeningen dient te worden berekend.

5.2 Nominaal toerental

5.2.1 Eén nominale waarde

De huidige systematiek van de berekening van het kogelbaanmodel zonder luchtkrachten leidt tot risico's zoals weergegeven in de rode grafiek in Figuur 5.2. De waarde voor het ingevulde toerental komt voort uit informatie van leveranciers. Deze parameter heeft een sterke invloed op de uitkomst van de berekening van het faalscenario bladworp. In onderstaande tabel is een omschrijving gegeven van zaken die zijnesignaleerd bij het gebruik van deze parameter.

Tabel 5.2 Signaleringen bij parameter: nominaal toerental

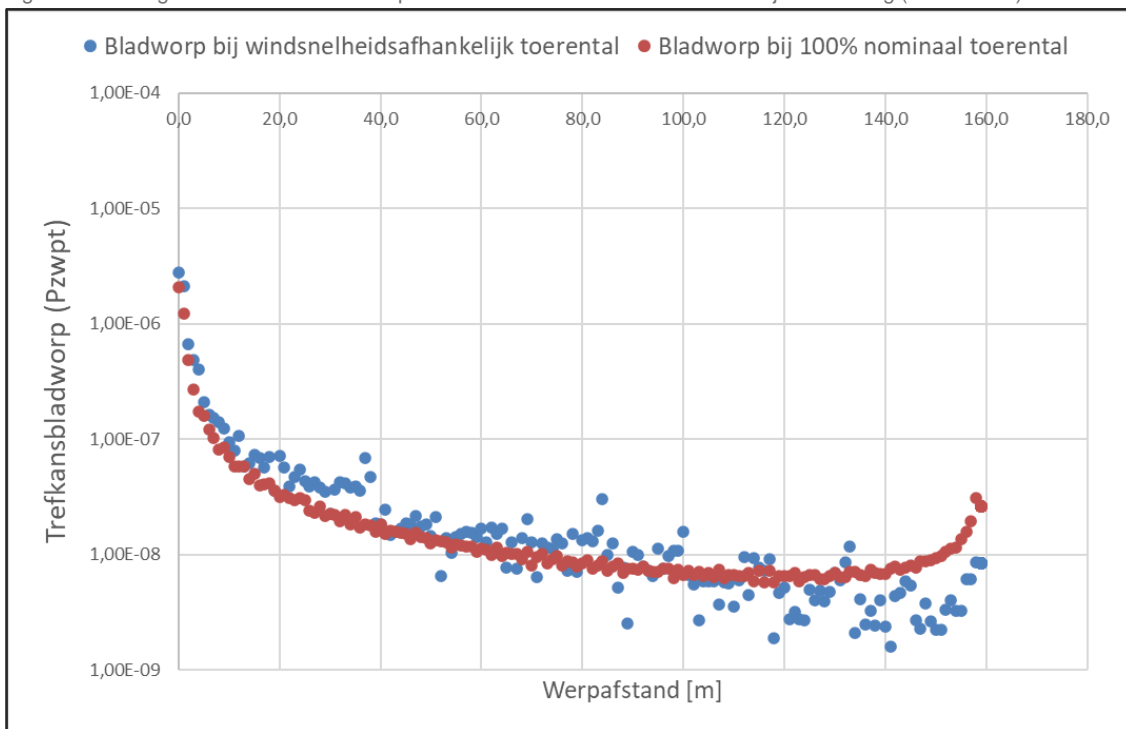
Thema van de signalering	Constatering / toelichting
Invloed op uitkomst berekening	Invloed op 10 ⁻⁵ -contour: zeer beperkt Invloed op 10 ⁻⁶ contour: groot Invloed op werpafstand: groot.
Correlatie met andere kenmerken windturbine	Het toerental is afhankelijk van de geldende windsnelheid en wordt beïnvloed door het pitchen van de windturbinebladen. Door het aanpassen van de pitch wordt het toerental en daarmee de tipsnelheid van een rotorblad beheerst. Hoe groter de rotordiameter, hoe lager het nominale toerental.
Mogelijke variabiliteit van de parameter in de werkelijkheid	Een windturbine stuurt het toerental zodanig dat windsnelheid optimaal wordt omgezet in energie. Op jaarbasis fluctueert de tijdsduur van een toerental binnen een bandbreedte. Het huidige rekenmodel kent niet de mogelijkheid om deze fluctuatie bij de berekening te betrekken, er kan maar met één toerental gerekend worden. De fluctuatie is locatie specifiek, en de data van de gerealiseerde toerentallen per windturbines is voor derden niet toegankelijk. Echter, omdat de windturbine regelt richting het optimale toerental zal de

	windturbine het grootste deel van het jaar draaien op nominaal toerental. Dit is dus de meest representatieve draaisnelheid.
Toegankelijkheid broninformatie toerentallen	Het toerental van nieuwe windturbines moet worden opgevraagd bij de leverancier. De standaard documentatie bevat vaak geen info over het toerental. Informatie over oudere windturbines is vaak niet beschikbaar bij de leverancier en de eigenaar heeft deze info vaak niet of niet snel beschikbaar. Daarnaast is voor het opvragen van leveranciersinformatie bij bestaande windturbines vaak toestemming van de eigenaar van de windturbine benodigd. Dit kan het proces soms ernstig vertragen.
Uniformiteit in broninformatie	De leveranciersinformatie over het nominaal toerental is niet gelijkvormig. Soms wordt één enkele waarde gegeven, soms een bandbreedte. Binnen de bandbreedte moet de rekenaar zelf (in overleg met de leverancier) een waarde kiezen. Informatie en criteria voor die keuze ontbreken.
Gesignaleerde praktijktoepassing nominaal toerental	De toegankelijkheid en aard van de broninformatie zet aan tot het doen van aannames. De juistheid van de keuze is voor derden moeilijk controleerbaar. In de praktijk worden naast waarden binnen de bandbreedte ook waarden onder en ver boven de bandbreedte aangetroffen.

5.2.2 Gebaseerd op gemiddelde windsnelheidsverdeling van een jaar

Indien de trefkansverdeling van bladworp niet wordt bepaald aan de hand van één vast toerental (nominaal) wat het hele jaar aanwezig is maar wordt bepaald aan de hand van een toerentalverdeling afhankelijk van de windsnelheid dan kan de verdeling veranderen. Door de toevoeging van momenten met een lagere windsnelheid en daardoor een lager toerental zal de kans op het gooien van kortere afstanden toenemen. In onderstaande grafiek zijn nog steeds pieken van het risico te zien omdat er gewerkt is met discrete waarden van het toerental per discrete windsnelheidswaarde. Hierdoor zijn er een zestal individuele pieken zichtbaar in de blauwe grafiek. Globaal gezien verschuift door het rekening houden met de gemiddelde windsnelheidsverdeling de trefkans van een grotere hoeveelheid nabij het maximum naar meer risico dichterbij de paal. Dit betekent concreet dat door rekening te houden met 1x nominaal toerental die 100% in het jaar aanwezig is er een beperkte onderschatting plaatsvindt van risico's dichtbij de paal en een overschatting van de risico's op de maximale werpafstanden die kunnen optreden.

Figuur 5.2 Weergave verschil PR bladworp tussen één nominaal toerental of een jaarverdeling (Maasvlakte)



Indien het toerental wat gebruikt wordt in de berekeningen wordt gebaseerd op de werkelijke toerental verdeling welke plaatsvindt over een jaar afhankelijk van de aanwezige windsnelheid dan treden er een aantal effecten op. De uit te voeren berekening wordt complexer omdat er een toerentalverdeling dient te worden ingevoerd in de plaats van een enkele waarde. Tevens is er extra informatie benodigd om de verdeling van het toerental te kunnen bepalen. De informatie kan eventueel herleid worden uit de KNMI windsnelheidskaart welke ook gebruikt wordt voor subsidiebepalingen. Deze informatie is goed beschikbaar. Door het gebruik te maken van de windsnelheidsverdeling wordt er echter een extra variabele ingevoerd waardoor de gegevens moeilijker reproduceerbaar worden. Tevens zal er een variatie gaan ontstaan tussen windturbines op windrijke windlocaties zoals aan de kust en windarmere windlocaties zoals meer landinwaarts. Dit betekent dat windturbines met exact dezelfde eigenschappen verschillende risicoafstanden gaan krijgen. Het toepassen van de windsnelheidsverdeling leidt tot minder conservatieve uitkomsten dan het uitgangspunt van 100% het nominaal toerental.

5.2.3 Gebaseerd op maximale waarden (0 – ca. 1,25x variabel toerental)

Het toerental van een windturbine is afhankelijk van de beschikbare windsnelheid. Dit betekent dat de rotatiesnelheid kortstondig kan variëren (tot bijvoorbeeld 1,1x nominaal toerental). Er zit altijd enige vertraging in het registreren van een situatie met een hogere rotatiesnelheid en de uitvoering van de benodigde aanpassing aan bijvoorbeeld de pitchhoek van de rotorbladen of de stand van de rotor in de wind waardoor de rotatiesnelheid weer afneemt tot de waarde van het nominaal toerental. De hogere rotatiesnelheid kan bijvoorbeeld kortstondig optreden tijdens een windvlaag waarbij de wieken tijdelijk een hogere rotatiesnelheid krijgen. Het toerental is daarmee een continu variërend gegeven wat niet volledig vaststaat op één snelheid. De meeste windturbines staan daarmee ook kortstondige verhogingen van het toerental toe ten opzichte van de nominale waarde of de standaardwaarde die bij een bepaalde windsnelheid hoort. Om de veiligheid te waarborgen wordt er per windturbintetype ook een bovengrens

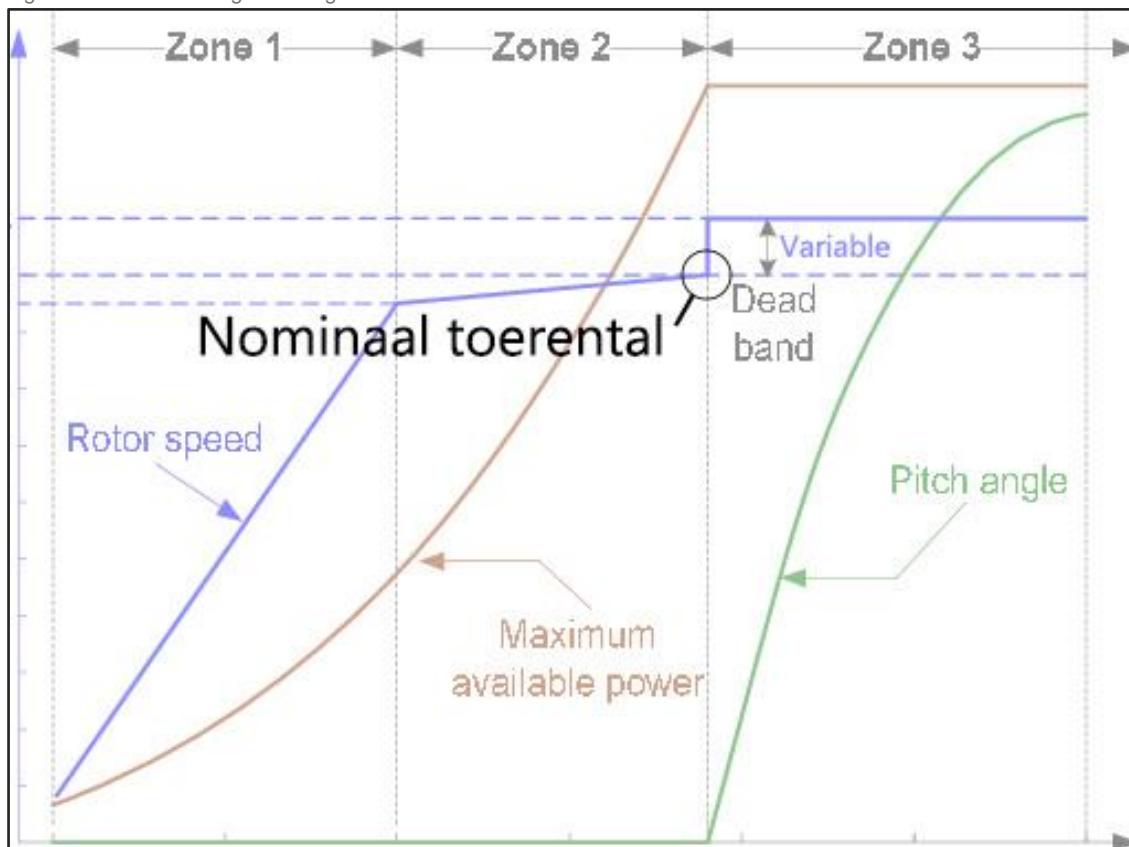
aangegeven bij welke snelheid de verschillende noodsystemen activeren in extreme situaties. De windturbines worden in deze situaties wel volledig tot stilstand gezet (bijv. 1,25x nominaal toerental). De verhoogde toerentallen zijn zeer kortstondig aanwezig en worden vrijwel altijd direct gereguleerd naar nominaal toerental. Voor de berekening van het risico van het faalscenario bladworp is het niet benodigd om rekening houden met de verhoogde variabele toerentallen.

5.2.4 Conclusie nominaal toerental

Geadviseerd wordt om de definitie van de parameter nominaal toerental aan te scherpen. Door te definiëren hoe het nominaal toerental dient te worden bepaald wordt duidelijkheid gegeven over welke waarde deze kan zijn. Het optredende toerental is afhankelijk van de aanwezige windsnelheid maar de gegevens in paragraaf 5.2.2 laten zien dat de uitkomsten van de berekening van de risico's niet zodanig wijzigen dat het aannemen van één toerental een grote overschatting van de risico's inhoudt. Het opnemen van een windsnelheidsafhankelijk toerental zorgt voor een verschuiving van de risico's dichter naar de mastoren toe. Het hanteren van één maximaal toerental is daarmee een conservatieve aanpak die de effecten van dit faalscenario goed omschrijft.

Het nominaal toerental kan in de toekomst worden gedefinieerd als: "Het door de fabrikant opgegeven toerental van de rotor waarop het nominaal vermogen van de windturbine kan worden bereikt". Het nominaal toerental is daarmee beperkt tot één specifieke waarde en kan niet een bereik hebben. Uit conservatieve overwegingen zou gedacht kunnen worden om de maximum waarde te gebruiken in de plaats van de minimale waarde. De maximum waarde is echter moeilijker te bepalen omdat deze variabeel is en staat daarmee vaak niet vast als één waarde. De kans is groot dat er dan een maximum als toerental wordt vastgesteld wat enkel incidenteel kan optreden in een jaar of gelijk staat aan het maximum vanaf wanneer de noodremvoorzieningen activeren. Beiden zijn geen goede weergave van het toerental wat het meest voorkomt in een jaar tijd. Niet alle fabrikanten geven deze waarde met deze definitie standaard weer in hun documentatie.

Figuur 5.3 Visuele weergave voorgestelde definitie van nominaal toerental

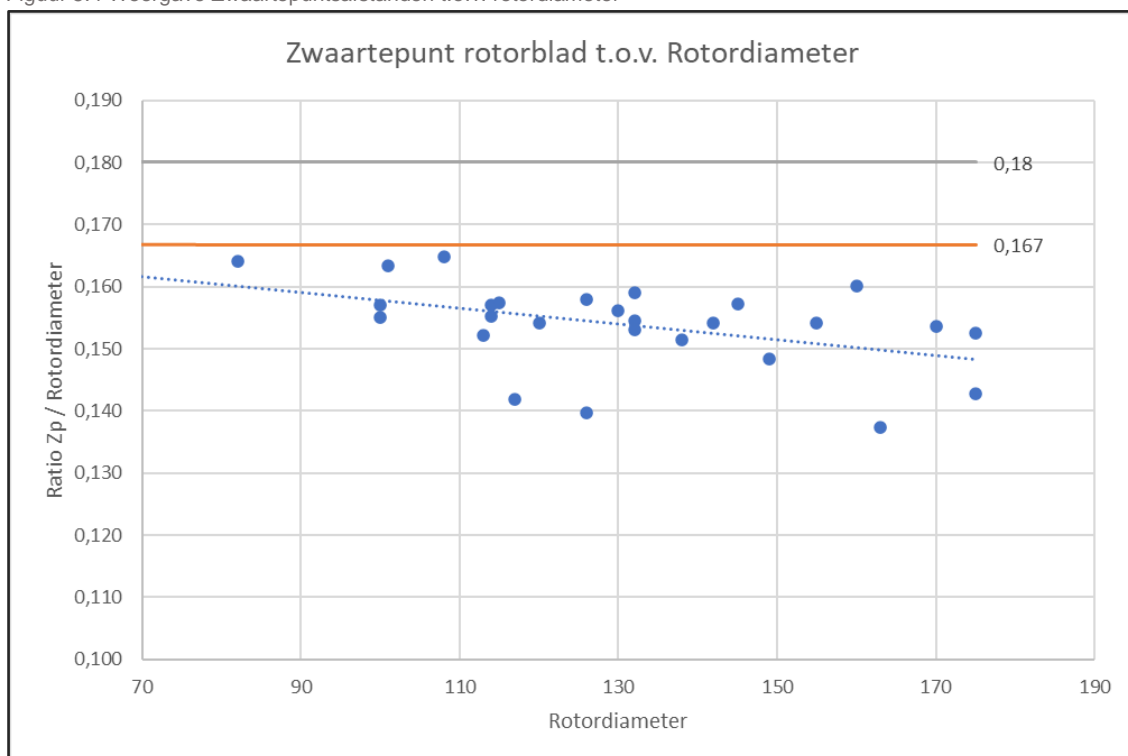


5.3 Zwaartepuntbepalingen onderdelen windturbine

5.3.1 Rotorblad

Bij bladworpberekeningen wordt het treffen van de grond berekend waarbij de berekening enkel inzicht verleent in waar het zwaartepunt van het rotorblad de grond treft. Een zone rondom dit zwaartepunt kan geraakt worden afhankelijk van de oriëntatie waarin het rotorblad de grond treft. Het zwaartepunt van het rotorblad kan bepaald worden aan de hand van aangeleverde gegevens van de fabrikant van de windturbines of kan generiek ingeschat worden met een afstand gelijk aan $1/6^{\circ}$ x de rotordiameter als uitgangspunt voor de ligging van het zwaartepunt van een rechthoekige driehoek. In module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid was een generieke formule gebruikt van $0,18$ x de rotordiameter als bepaling van de zwaartepunt afstand. Op basis van 28 datapunten verkregen uit datasheets van windturbine fabrikanten kan worden geconcludeerd dat een generieke zwaartepuntsafstand van $1/6^{\circ}$ x rotordiameter in de meeste gevallen bij windturbines van grote formaten conservatief genoeg is. Voor kleinere windturbines zijn geen tot weinig gegevens beschikbaar over het zwaartepunt van het rotorblad. Voor zeer kleine windturbines kan een rotorblad eerder rechthoekig van vorm worden waardoor het zwaartepunt zal opschuiven richting $1/4^{\circ}$ x de rotordiameter.

Figuur 5.4 Weergave Zwaartepuntsafstanden t.o.v. rotordiameter



Tabel 5.3 Signaleringen bij parameter: zwaartepuntbepaling rotorblad bij bladworp

Thema van de signalering	Constatering / toelichting
Invloed op uitkomst berekening	Invloed op 10 ⁻⁵ -contour: zeer beperkt Invloed op 10 ⁻⁶ contour: groot Invloed op werpafstand: groot.
Correlatie met andere kenmerken windturbine	Het zwaartepunt van een rotorblad is direct gerelateerd aan de lengte en breedte van een rotorblad. Daarnaast speelt de afstand van het bevestigingspunt aan de hub een rol in de bepaling van de afstand tot aan het ascentrum van de windturbine. Bij kleinere windturbinedimensies worden verhoudingsgewijs grotere zwaartepunt afstanden gevonden dan bij grotere windturbinedimensies.
Mogelijke variabiliteit van de parameter in de werkelijkheid	Het zwaartepunt van een rotorblad ligt vast en is afhankelijk van de dimensies en het gewicht van een rotorblad. Deze afstand wordt niet significant aangetast door erosie van het rotorblad gedurende de levensduur van een windturbine. Er is dus geen variabiliteit tussen de opgegeven waarde en de werkelijkheid.
Toegankelijkheid broninformatie	Bij navraag is deze informatie veelal beschikbaar bij leveranciers van windturbines. De parameter is benodigd om het transport en de hijswerkzaamheden van een rotorblad goed te kunnen uitvoeren. Voor de berekening is echter wel de zwaartepunt afstand tot aan het ascentrum van de windturbine benodigd. Dit is dus de zwaartepunt afstand na installatie en tijdens operatie. Deze kan anders zijn dan de zwaartepunt afstand tijdens transport.
Uniformiteit in broninformatie	De door leveranciers opgegeven zwaartepuntafstand is niet altijd uniform qua afstandsbeoordeling. Op momenten wordt de zwaartepuntafstand tijdens transport gegeven in de plaats van de geïnstalleerde zwaartepunt afstand. Van oudere rotorbladen zijn niet altijd de juiste gegevens nog beschikbaar.
Gesignaleerde praktijktoepassing	In de praktijk worden soms generieke waarden gebruikt gebaseerd op de data afkomstig uit de versie van de Handleiding risicobeoordeling windturbines uit 2005 van 0,18x

rotordiameter. In de huidige praktijk wordt vaker een generieke waarde van $1/6x$ rotordiameter gebruikt (gebaseerd op zwaartepunt afstand van een driehoek) en worden door de fabrikant specifiek opgegeven waarden gebruikt (met of zonder correcties voor de hub-installatie afstand).

5.3.2 Gondelfalen

Bij gondelfalen treft het gondelgewicht inclusief het hubgewicht het middelpunt van de plek waar de gondel de grond raakt. Het zwaartepunt van de rotorbladen treft de grond op een afstand vanaf dit punt gelijk aan de zwaartepuntafstand van een rotorblad.

5.3.3 Hubfalen

Bij hubfalen valt het hubgewicht op het middelpunt van de plek waar de hub de grond raakt. Het zwaartepunt van de rotorbladen treft de grond op een afstand vanaf dit punt gelijk aan de zwaartepuntafstand van een rotorblad.

5.3.4 Mastfalen

Bij mastfalen wordt tot aan de ashoogte de grond getroffen door het gewicht van de maststoren. Uit de analyse van faalincidenten blijkt dat dit gewicht in de praktijk bij een incident vaak over een groter gedeelte van de grond over deze afstand verdeeld lijkt te zijn. Het is daarom aannemelijk om de impact van het gewicht van een mast te verdelen over een lijnelement met een lengte gelijk aan de ashoogte. Vervolgens valt de gondel inclusief het hubgewicht op een maximale afstand gelijk aan de ashoogte waarbij het zwaartepunt nagenoeg op een ashoogte-afstand terecht komt. Uit analyse van faalincidenten blijkt dat op deze plek de grootste kratervorming ofwel impact wordt veroorzaakt. Het zwaartepunt van de rotorbladen treft vervolgens de grond op een afstand vanaf dit punt op ashoogte op een afstand gelijk aan de zwaartepuntafstand van een rotorblad.

5.3.5 Conclusie zwaartepuntbepalingen

Geadviseerd wordt om de generieke bepaling van het zwaartepunt van een rotorblad om te zetten van $0,18 \times$ Rotordiameter tot $1/6 \times$ Rotordiameter om beter overeen te komen met de eigenschappen van moderne rotorbladen van groot formaat. Voor de bepaling van de zwaartepunten van mast, gondel en hub zijn geen wijzigingen benodigd.

5.4 Dimensies onderdelen windturbine

5.4.1 Dimensies maststoren

Bij een windturbinemast denken we veelal aan een rechte cilindervormige mast met een vrijwel gelijke breedte over de verloop van de hoogte. Conische masten komen echter ook veel voor waarbij de onderkant aanzienlijk breder is dan de bovenkant van de maststoren. Ook minder vaak voorkomende masttypen zijn in principe uitvoerbaar zoals een vakwerkmast welke we bij hoogspanningsmasten zien en zelfs de ontwikkeling van grootschalige houten masten. De breedte van de mast heeft echter maar een beperkte invloed op de uitkomsten van een risicoanalyse.

Ook het materiaal en de constructie van de windturbine kan invloed hebben op het faalgedrag van een mast. Zo kan een stalen maststoren naast omvallen ook 'knikken' waarbij de mast ergens halverwege de mast faalt en daardoor niet volledig omvalt. Een betonnen mast zal eerder kunnen instorten, omvallen of

breken en zal het knikgedrag niet vertonen. De masthoogte van de windturbine heeft de grootste invloed op de uitkomsten van een risicoanalyse omdat het een maat geeft tot waar bepaalde onderdelen kunnen terechtkomen.

Tabel 5.4 Signaleringen bij parameter: mast (mast- ofwel hubhoogte)

Thema van de signalering	Constatering / toelichting
Invloed op uitkomst berekening	Invloed op 10-5-contour: zeer beperkt Invloed op 10-6 -contour: groot Invloed op werpafstand: groot.
Correlatie met andere kenmerken windturbine	De masthoogte bepaalt mede de afworp hoogte van bladdelen en is daarmee van invloed op de effectafstand. De horizontale projectie van de mast bepaalt samen met de bladlengte de reikwijdte van het scenario mastfalen.
Mogelijke variabiliteit van de parameter in de werkelijkheid	De fysieke kenmerken van een mast zijn een constante en niet aan verandering onderhevig.
Toegankelijkheid broninformatie	De masthoogte van een windturbine is goed uit documentatie en databestanden van leveranciers te herleiden. Of de mast van staal of beton is, is met enig inzicht eenduidig te herleiden. De gemiddelde mastdiameter is vaak niet eenduidig te herleiden. De invloed van deze parameter op de berekening van het plaatsgebonden risico is echter zeer beperkt.
Uniformiteit in broninformatie	Iedere leverancier heeft zijn eigen wijze van presentatie. De essentiële informatie is echter eenvoudig herleidbaar.
Gesignaleerde praktijktoepassing	<ul style="list-style-type: none"> De informatie over de masteigenschappen leidt niet tot foutieve input bij de berekening. De huidige berekeningsmethodiek is van toepassing voor stalen masten en niet op betonnen masten. Bij gebrek aan een rekenmethode voor betonnen masten wordt echter wel de methode voor stalen masten gebruikt. Wat betreft de constructiesterkte maakt dit geen verschil, zowel staal als beton moet dezelfde ontwerpsterkte hebben. Een specifieke faalkans voor betonnen windturbines is niet vast te stellen. De database met incidenten specificeert niet consequent naar beton/staal zodat het niet mogelijk is om een materiaal afhankelijke faalfrequenties vast te stellen. Geadviseerd wordt om de rekenmethode zowel voor staal als beton te laten gelden.

5.4.2 Dimensies gondel

Gondels zijn er in allerlei vormen en maten zoals eivormig, blokvormig, cilindervormig en allerlei combinaties van vormen. Met het groter worden van de windturbines zijn ook het gondelformaat en het gewicht van de gondel aanzienlijk toegenomen.

Tabel 5.5 Signaleringen bij parameter: omvang gondel

Thema van de signalering	Constatering / toelichting
Invloed op uitkomst berekening	Invloed op 10-5-contour: groot Invloed op 10-6 -contour: invloed: beperkt Invloed op werpafstand: beperkt.
Correlatie met andere kenmerken windturbine	<ul style="list-style-type: none"> Algemeen gesteld is met de toename van de masthoogte, ook de omvang van de gondel toegenomen. Hierdoor leidt de lengtecombinatie mast- gondelhoogte tot een grotere afstand waarbinnen de massa van deze combinatie op de bodem kan inslaan. Als de gondel van de mast valt (en de mast blijft staan), dan wordt het inslaggebied van de gondel beïnvloed door de breedte die de mast direct boven maaiveldniveau heeft. Deze breedte verschilt soms sterk per type windturbine.

Mogelijke variabiliteit van de parameter in de werkelijkheid	De diverse leveranciers hebben veelal een eigen en kenmerkend gondeltype. Door het in het rekenmodel opnemen van de lengte, hoogte, breedte van de gondel, kan de impact van een incident goed ruimtelijk vertaald worden. Er is variatie of de gondellengte wordt gepresenteerd inclusief of exclusief de hub.
Toegankelijkheid broninformatie	De maatvoering van de gondel van de windturbine is goed uit documentatie en databestanden van leveranciers te herleiden
Uniformiteit in broninformatie	Iedere leverancier heeft zijn eigen wijze van presentatie. De essentiële informatie is echter eenvoudig herleidbaar.
Gesignaleerde praktijktoepassing	De informatie over de gondel eigenschappen leidt niet tot foutieve input bij de berekening. In sommige gevallen ontstaat onduidelijkheid of de afmetingen van de hub meegerekend moet worden in de lengte van de gondel. Dit komt voort uit het gegeven dat de lengte van de gondel vaak wel los verkrijgbaar is maar de dimensies van de hub separaat in andere documentatie van de fabrikant staat vermeld.

5.4.3 Dimensies rotordiameter

De parameter die het vaakst wordt gebruikt om het formaat van een windturbine te omschrijven is de rotordiameter. De rotordiameter geeft direct inzicht in het formaat van de cirkel die de rotor beslaat. Dit wordt ook wel het rotoroppervlak genomen.

Tabel 5.6 Signaleringen bij parameter: rotordiameter

Thema van de signalering	Constatering / toelichting
Invloed op uitkomst berekening	Invloed op 10-5-contour: zeer beperkt Invloed op 10-6 -contour: groot Invloed op werpafstand: groot.
Correlatie met andere kenmerken windturbine	De halve rotordiameter geeft samen met de masthoogte de tiphoogte van de windturbine. De tipsnelheid van een windturbineblad wordt bepaald door de lengte van het windturbineblad en het toerental. Om de tipsnelheid te limiteren, wordt via pitchen het toerental van de windturbine gestuurd. Als vuistregel geldt: hoe groter de rotordiameter, des te lager het toerental.
Mogelijke variabiliteit van de parameter in de werkelijkheid	Zie onder: gesignaleerde praktijktoepassing.
Toegankelijkheid broninformatie	De rotordiameter wordt vaak specifiek genoemd bij het type windturbine en is algemeen bekend.
Uniformiteit in broninformatie	Iedere leverancier heeft zijn eigen wijze van presentatie. De essentiële informatie is echter eenvoudig herleidbaar.
Gesignaleerde praktijktoepassing	Een windturbineblad is gemonteerd op de gondelkop. De omvang van een gondelkop varieert per windturbineontwerp. In de praktijk wordt niet consequent omgegaan met de werkelijke lengte van het windturbineblad ten opzichte van de straal van de rotor. De rotordiameter is daardoor niet tweemaal de bladlengte. In sommige gevallen is in de praktijk onduidelijk of in de berekeningen een bladlengte als afstand dient te worden gehanteerd of een halve rotordiameter.

6 Inventarisatie rekenmethodieken

Uit de literatuurstudie en uit de huidige rekenvoorschrift komen verschillende rekenmethodieken waarmee de verschillende faalscenario's kwantitatief inzichtelijk kunnen worden gemaakt. Dit hoofdstuk geeft een omschrijving van de beschikbare rekenmethodieken die potentieel geschikt zijn om toegepast te worden als rekenmethodiek per faalscenario.

6.1 Mastfalen

6.1.1 Methodiek M1 - Geometrische analyse - module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid

Voor de berekening van mastfalen is gebruik gemaakt van de formules in hoofdstuk 3 van Module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid. In de berekening wordt ervan uitgegaan dat de mast in het geheel omvalt. Op verschillende afstanden vanaf de windturbine kunnen er verschillende onderdelen van de windturbine landen en een risico veroorzaken. In de huidige berekeningen van het faalscenario wordt gebruik gemaakt van de parameters van de afmetingen van de gondelbehuizing en van het kritiek oppervlak van een rotorblad om de solidity van het rotoroppervlak te bepalen. In hoofdstuk 5 zijn deze parameters geëvalueerd en zijn enkele wijzigingen voorgesteld. De formules hieronder zijn, daar waar relevant voor het gebruik van de parameters, gewijzigd.

In onderstaande paragrafen wordt per afstand aangegeven hoe het risico bepaald wordt volgens de formules uit module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid.

Halve mastbreedte tot aan ashoogte

De kans dat een vierkante meter wordt geraakt is gelijk aan de breedte van de mast op de te raken afstand gedeeld door de mogelijke valrichtingen. Conservatief kan uitgegaan worden van de maximale mastbreedte over de gehele masttoeren.

Voor $0 < r \leq (H)$

$$P_{p,mast} = FF_{mb} \times \frac{d_{mast}}{2 \times \pi \times r}$$

Met: d_{mast} = breedte van de mast, r = afstand tot hart windturbine, H = ashoogte, FF_{mb} = Faalfrequentie mastfalen

NB. Binnen een halve mastdiameter kan bij falen uitgegaan worden van $100\% * FF_{mb}$ als trefkans

Onderkant gondel tot bovenkant gondel

Op deze valafstand kan een vierkante meter ook geraakt worden door de gondel die op een ashoogte afstand terecht komt.

Voor $(H - \frac{G}{2}) < r \leq (H + \frac{G}{2})$

$$P_{n,mast} = FF_{mb} \times \frac{L_{max,gondel}}{2 \times \pi \times r}$$

Met: G = hoogte van de gondel, $L_{max,gondel}$ = maximale afmeting van de gondel inclusief hub

Van tiplaaagte tot tiphoogte

Op deze valafstand kan een vierkante meter ook geraakt worden door de aanwezigheid van de drie vallende rotorbladen.

Voor $\left(H - \frac{D}{2}\right) < r \leq \left(H + \frac{D}{2}\right)$

$$P_{r,mast} = FF_{mb} \times \frac{D}{2 \times \pi \times r} \times s$$

Met: D = rotordiameter, s = solidity, FF_{mb} = Faalfrequentie mastfalen, r = afstand tot hart windturbine

De formule voor solidity (s) is in module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid op deze locatie niet gedefinieerd. Maar kan berekend worden uit het oppervlakte van de rotorbladen gedeeld door het rotorbladoppervlak.

$$s \text{ (solidity)} = \frac{3 * A_b}{\pi * (0,5 * D)^2}$$

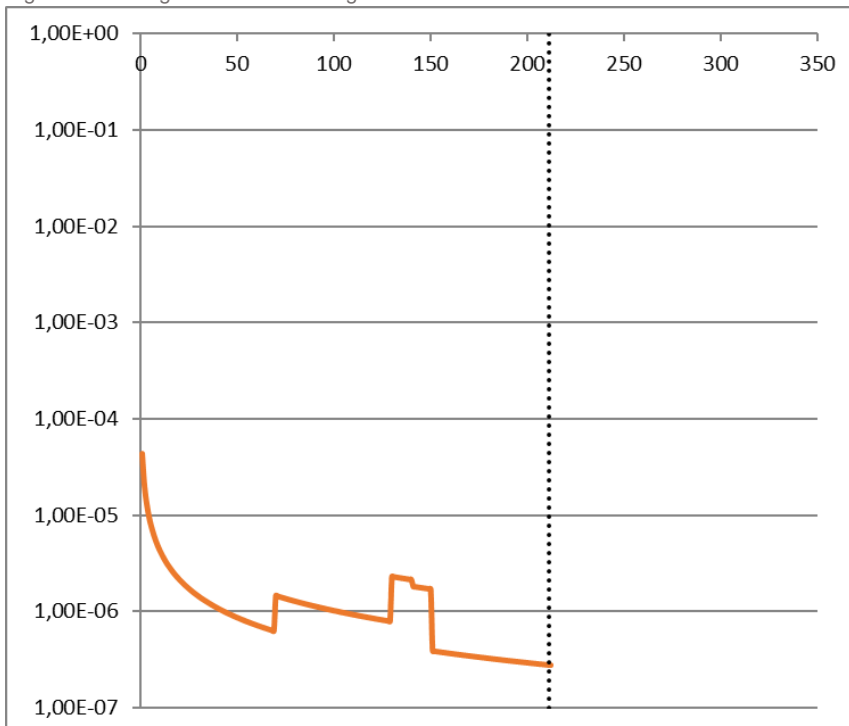
Met: A_b = Oppervlak van een rotorblad, D = rotordiameter

Het oppervlakte van het rotorblad kan in de huidige berekeningsmethodiek op meerdere manieren bepaald worden.

Weergave van scenario mastfalen

Bovenstaande berekeningen resulteert in de volgende plaatsgebonden risico verdeling voor enkel het scenario mastfalen indien P_p , P_n en P_r worden opgeteld en worden bepaald per strekkende meter afstand vanaf de windturbine.

Figuur 6.1 Weergave van berekening mastfaal risico formule module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid



6.1.2 Aanpassing M1-A – Toevoeging valafstand breedte mast of fundament

In de concept regelgeving van het IEC wordt aangegeven dat voor de bepaling van de risico's bij mastfalen er rekening gehouden dient te worden met het omvallen van de windturbine vanaf de voet van het fundament. Dit suggereert dat het fundament kan kantelen waarmee de windturbine een halve fundamentsbreedte verder kan omvallen. De maximale effectafstand bij volledig omvallen wordt dan gelijk aan de tiphoogteafstand + een halve fundamentsbreedte. De rekenmethodiek blijft verder gelijk aan de formules uit paragraaf 6.1.1 maar er wordt aan alle bepaalde afstandszones een halve fundamentsbreedte toegevoegd.

6.2 Gondelfalen

6.2.1 Methodiek G1 - Geometrische analyse - module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid

In module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid staat omschreven hoe het scenario gondelfalen dient te worden berekend. Dit sluit aan bij de beschrijving voor mastfalen in paragraaf 3.1 waarbij nu de valafstand als 0 meter wordt gezien.

0 meter tot maximale gondelbreedte, lengte of hoogte

Voor de eerste meters vanaf het hart van de windturbine tot aan de gondelbreedte, lengte of hoogte wordt uitgegaan van een risico van 100% van de faalfrequentie van gondelfalen.

Voor $0 \leq r \leq L_{max,gondel}$

$$P_{n,gon} = FF_{gf} \times 100\%$$

Met: FF_{gf} = Faalfrequentie gondelfalen

0 meter tot aan halve rotordiameter

Op deze valafstand kan een vierkante meter ook geraakt worden door de aanwezigheid van de drie vallende rotorbladen.

Voor $L_{max,gondel} < r \leq (\frac{D}{2})$

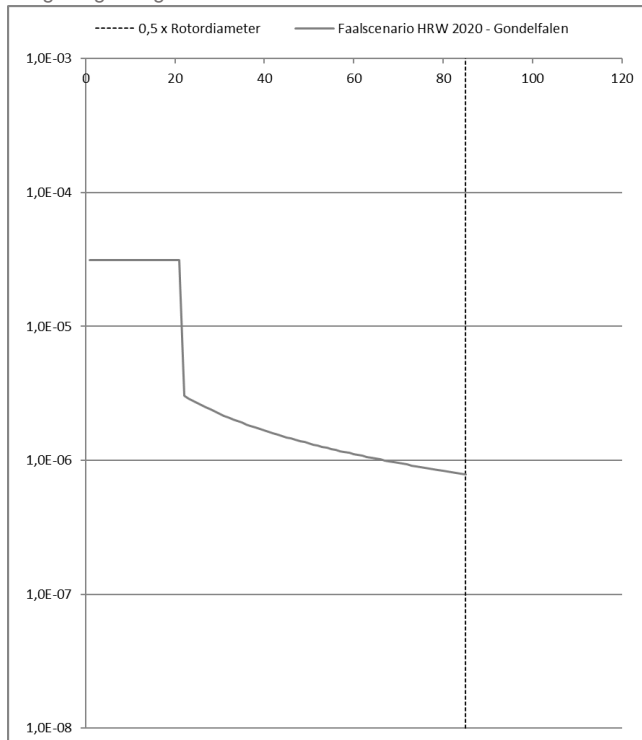
$$P_{r,gon} = FF_{gf} \times \frac{D}{2 \times \pi \times r} \times s$$
$$s \text{ (solidity)} = \frac{3 * A_b}{\pi * (0,5 * D)^2}$$

Met: A_b = Oppervlak van een rotorblad, D = rotordiameter

Weergave van scenario gondelfalen

Bovenstaande berekeningen resulteert in de volgende plaatsgebonden risico verdeling voor het scenario gondelfalen.

Figuur 6.2 Weergave van berekening gondelfaal risico formule module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid



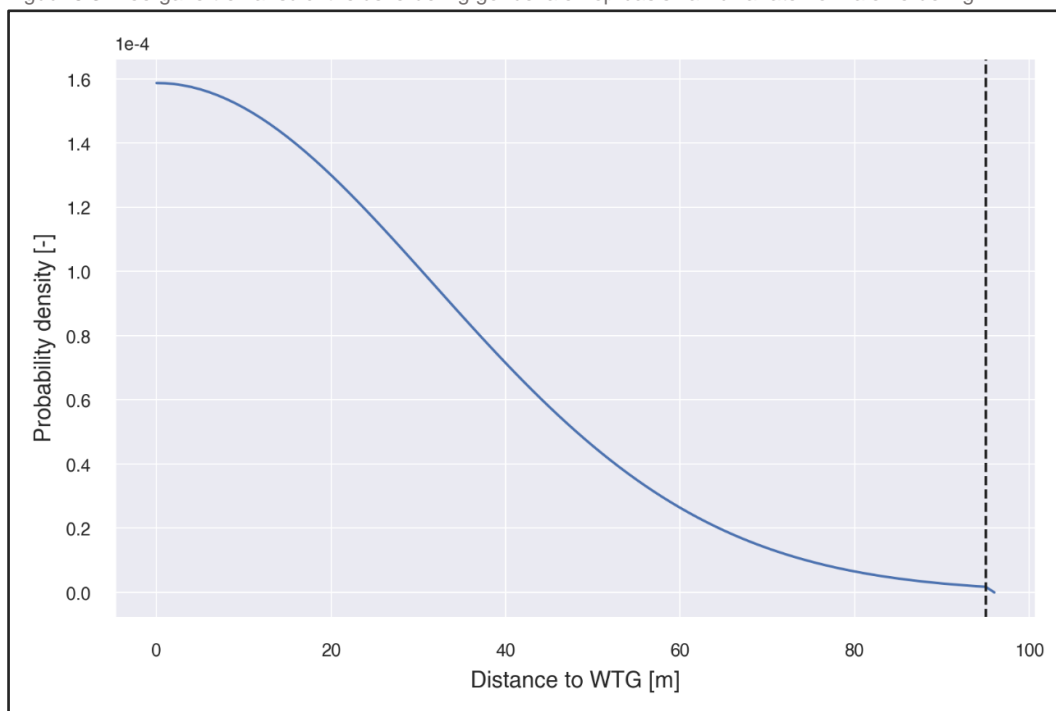
6.2.2 Methodiek G2 – Bivariate normale verdeling - module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid

In module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid is een tweede berekening voor het faalscenario gondelfalen toegevoegd zoals omschreven in paragraaf 5.1.3 van module IV. Deze formule wordt enkel als optie aangegeven voor uitvoering van een berekening van ondergrondse buisleidingen. Hierin wordt aangegeven dat bij een gebrek aan data een bivariate normale verdeling een acceptabele alternatieve keuze is om de trefkanslocatie te bepalen. De methodiek gaat ervan uit dat er één trefkans is van het zwaartepunt van de gondel en rotor. Logischerwijs bevindt deze zich in dit faalscenario op het hart van de gondel / hub en bestaat deze impact maximaal uit het totale gewicht van de gondel plus hub. In de methodiek wordt niet gedefinieerd of je voor het gewicht met of zonder rotorbladen dient te rekenen. Vervolgens wordt gekeken wat de kansdichtheid is van een vierkante meter binnen de zone van een halve rotordiameter. Het gondelgewicht kan dan dus op een afstand van 1x de halve rotordiameter vallen wat fysisch gezien niet mogelijk lijkt bij het faalscenario gondelfalen (de mast dient hiervoor te breken wat dit voorbeeld eigenlijk onder mastfalen laat vallen).

De gebruikte kansdichtheidsverdeling is niet proefondervindelijk vastgesteld en is niet gebaseerd op natuurkundige of fysische verschijnselen en is enkel toegepast om de kans op treffen van het zwaartepunt tot ongeveer maximaal een halve rotordiameter tot nagenoeg nul te laten verlopen. Volgens de methodiek dient de leiding opgedeeld te worden in segmenten waarvan de trefkans kan worden benaderd. Er wordt niet aangegeven of hierbij rekening dient te worden gehouden met een kritische afstand rondom de buisleiding waarbij er sprake kan zijn van falen als de impact van de gondel binnen de kritische afstand valt. Als uitgangspunt wordt de maximale kritische afstand van het gondelgewicht genomen als zone waarbinnen er sprake van schade aan de buisleiding kan zijn.

De bivariate normale verdeling ziet er in één richting uit als grafiek in Figuur 6.3. Een trefkansberekening wordt vervolgens gemaakt door de trefkansen per vierkante meter (pixel) op te tellen om tot een totale trefkans te komen. Deze trefkans kan daarna vermenigvuldigd worden met de kans op gondelfalen.

Figuur 6.3 Weergave trefkansdichtheidsverdeling gondelfalen op basis van bivariate normale verdeling



NB. Voorbeeld van een windturbine met een rotordiameter van 190 meter

6.2.3 Aanpassing G1-A – Valzone en opsplitsing in hub en gondelfalen

Deze rekenmethodiek is gebaseerd op dezelfde uitgangspunten als methodiek G1 waarbij de gondel naar beneden valt maar maakt wel een opsplitsing in faalscenario's van of de gondel meevalt of dat alleen de hub en rotor losraakt en naar beneden valt. Een tweede wijziging is dat gezien de grote toename van het formaat van de gondels van windturbines het benodigd is om de afmetingen van de gondel een rol te laten spelen in de bepaling van de trefkansen van deze faalscenario's. Bij de rekenmethodiek G1 wordt ervan uitgegaan dat de gondel landt op een afstand van $X=0$ meter vanuit het hart van de windturbine. Bij dit faalscenario blijft de mastoren echter rechtop staan. Bij het naar beneden vallen van de gondel en de mast zal de gondel daarom naast de mastoren vallen en gezien de lengte van moderne gondels (tot bijvoorbeeld 25 meter) dient er in de trefkans berekeningen ook rekening te worden gehouden met deze grotere dimensies van de gondelonderdelen.

Deze aanpassingen hebben enkele verschillende gevolgen. Omdat de gondel naast de mast valt kan de tip van een rotorblad ook op een verdere afstand meevallen. De maximale afstand waarbij een object geraakt kan worden neemt dus toe tot een iets grotere afstand dan een halve rotordiameter.

Tevens zal door de opsplitsing van het faalscenario gondelfalen in gondelfalen en hubfalen het risico anders verdeeld worden over het gebied rondom de windturbine. De faalfrequentie van het faalscenario gondelfalen is circa 3x zo klein als het faalscenario hubfalen.

De rekenformule die toegepast kan worden werkt op vergelijkbare manier als de formule in paragraaf 6.1.1 en is opgesplitst in een faalscenario gondelfalen en een faalscenario hubfalen.

Gondelfalen

0 meter tot aan maximale gondellengte

In deze zone is het treffen afhankelijk van de kans op treffen door de gondel die naast de mastoren valt.

Voor $0 < r \leq (L_{max,gondel})$

$$P_{n,gon} = FF_{gf} \times \frac{L_{max,gondel}}{2 \times \pi \times r}$$

NB. Binnen een halve mastdiameter kan bij falen uitgegaan worden van 100% FF_{gf} .

0 meter tot aan de maximale valafstand

De maximale valafstand (r_{max}) van een rotorblad bij gondelfalen is gelijk aan een halve rotordiameter plus een halve gondellengte ($L_{max,gondel}$) plus een halve mastbreedte (d_{mast}). Binnen deze valafstand kan een vierkante meter ook geraakt worden door de aanwezigheid van de drie vallende rotorbladen.

Voor $0 < r \leq (\frac{1}{2} * D + \frac{1}{2} * L_{max,gondel} + \frac{1}{2} * d_{mast})$

$$P_{r,gon} = FF_{gf} \times \frac{D}{2 \times \pi \times r} \times s$$
$$s (solidity) = \frac{3 * A_b}{\pi * (0,5 * D)^2}$$

Met: $A_b =$ Oppervlak van een rotorblad, $D =$ rotordiameter

Hubfalen

Bij hubfalen valt de hub en de rotor naar beneden. Omdat de hub zich bevindt aan de gondel kan de ook de hub vallen tot op maximaal een gondellengte aan afstand. De waarde van de maximale gondellengte is gebaseerd op de waarde inclusief de hub-lengte ($L_{max,gondel}$).

0 meter tot aan maximale gondellengte

In deze zone is het treffen afhankelijk van de kans op treffen door de hub die naast de mastoren valt.

Voor $0 < r \leq (L_{max,gondel})$

$$P_{n, hub} = FF_{hf} \times \frac{L_{max,gondel}}{2 \times \pi \times r}$$

Met: FF_{hf} = *Faalfrequentie hubfalen*, r = *afstand tot hart windturbine*, $L_{max,gondel}$ = *maximale dimensie gondel*

NB. Binnen een halve mastdiameter kan bij falen uitgegaan worden van 100% P_{hf} .

0 meter tot aan de maximale valafstand

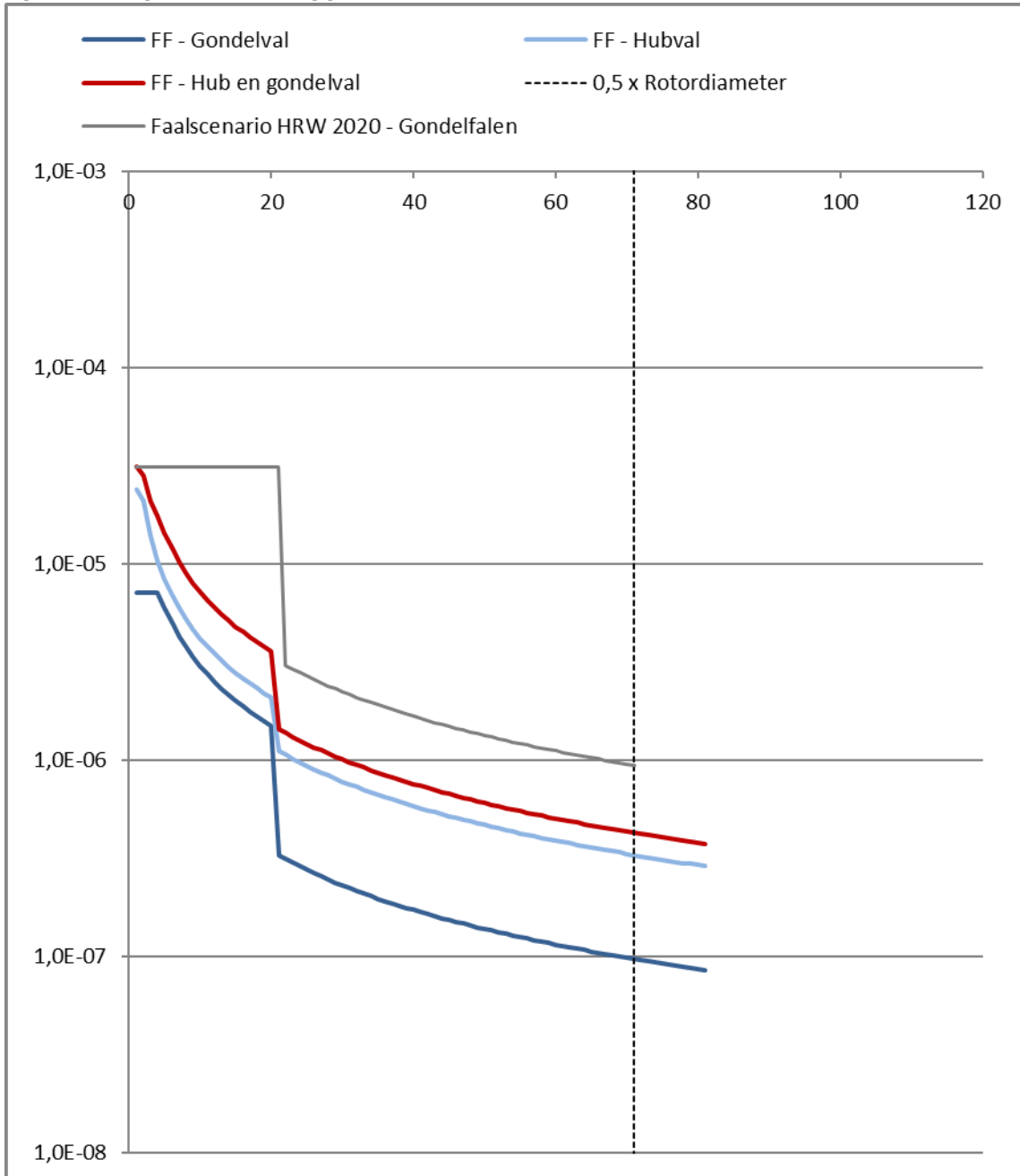
De maximale valafstand (r_{max}) is gelijk aan een halve rotordiameter plus een halve gondellengte ($L_{max,gondel}$) plus een halve mastbreedte (d_{mast}). Binnen deze valafstand kan een vierkante meter geraakt worden door de aanwezigheid van de drie vallende rotorbladen.

Voor $0 < r \leq (\frac{1}{2} * D + \frac{1}{2} * L_{max,gondel} + \frac{1}{2} * d_{mast})$

$$P_{r, hub} = FF_{hf} \times \frac{D}{2 \times \pi \times r} \times s$$
$$s \text{ (solidity)} = \frac{3 * A_b}{\pi * (0,5 * D)^2}$$

Met: A_b = *Oppervlak van een rotorblad*, D = *rotordiameter*

Figuur 6.4 Weergave van berekening gondelfaal en hubfalen methodiek G3



6.3 Bladworp

6.3.1 Methodiek B1 – Kogelbaanmodel zonder luchtkrachten - module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid

In paragraaf 2.3.1 van module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid wordt het kogelbaanmodel zonder luchtkrachten formuletechnisch weergegeven. De formule kan toegepast worden voor elk toerental maar wordt normaliter in het huidige rekenvoorschrift enkel uitgerekend voor het nominale toerental (en het overtoerental) waarbij er vanuit wordt gegaan dat deze toerentallen 100% van

de tijd aanwezig zijn. De zeldzaamheid van de aanwezigheid van het overtoerental komt dan tot uiting in de lage toegepaste faalfrequentie voor dit faalscenario.

De formules gaan uit van een uniform verdeelde windrichting en daarmee van een uniform verdeelde positie van de rotor. De werpkans is in alle windrichtingen daardoor gelijk. Ook het moment van breken en de daarbij horende rotationele positie van de rotorbladen is uniform verdeeld. Het rekenmodel omschrijft de baan van het rotorblad alsof het een vliegende kogel is vanaf het moment van afwerpen. Doordat de rotatie van het windturbineblad een sinusvorm heeft is het relatief aantal worpen dat op de grond valt nabij de maximale werpafstand groter. Ook zijn er relatief veel bladworpen mogelijk die recht omhoog of recht naar beneden worden geworpen. Dit zorgt voor een piek in de trefkansen zowel rond de maximale werpafstand als dichtbij de masttoren.

6.3.2 Methodiek B2 – Kogelbaanmodel met luchtkrachten - module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid

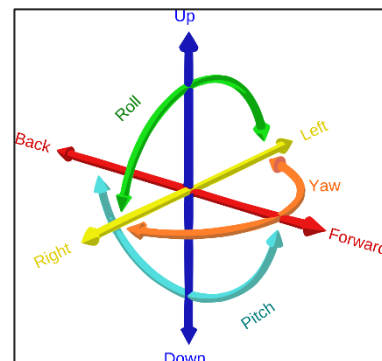
In het kogelbaanmodel met luchtkrachten wordt er naast de berekeningen uit paragraaf 6.3.1 ook rekening gehouden met de luchtkrachten die werken op een rotorblad tijdens de vlucht. Hiermee wordt dus niet bedoeld dat er rekening wordt gehouden met de windsnelheidsverdeling gedurende een jaar. Een geworpen rotorblad ondervindt door de luchtweerstand een tegengestelde kracht tijdens de worp. Deze kracht is groter als het geworpen rotorbladdeel een groter oppervlak heeft. De kracht is ook afhankelijk van de aerodynamische eigenschappen van het geworpen rotorblad welke weer afhankelijk zijn van de positie van het rotorblad tijdens de vlucht en de oriëntatie van het rotorblad tijdens de vlucht (bijvoorbeeld buitelen versus zweven). Het blad zal in de richting van het rotorvlak, door de kwadratisch toenemende luchtweerstand, minder ver komen dan zonder luchtweerstand het geval zou zijn geweest. Bovendien zorgt de wind ervoor dat het blad dwars op de richting van het rotorvlak gaat afwijken van de oorspronkelijke werprichting.

De berekening resulteert in een stelsel niet-lineaire differentiaalvergelijkingen dat numeriek opgelost kan worden. Er dienen hiervoor meerdere inputparameters te worden bepaald zoals de luchtweerstand- of dragcoëfficiënt in richting x of y, de aanwezige windsnelheid tijdens de worp, oppervlakte en massa van het geworpen bladdeel. Indien ook rekening wordt gehouden met overige jaarlijkse variabelen zoals de windrichting, windsnelheid en variabele toerentallen dan zal de berekening nog enkel via simulaties bepaald kunnen worden.

6.3.3 Methodiek B3 – 6-Degrees of Freedom bladworpmodel

In de wetenschappelijke literatuur wordt deels gebruik gemaakt van bladworpmodellen gebaseerd op een 6-degrees of freedom rekenmodel. Dit is een model welke voor een rotorblad tijdens de vlucht niet alleen de richting en eventuele luchtkrachten in kaart brengt maar ook rekening houdt met de tuimeling van het vliegende rotorblad tijdens de vlucht. Er worden dus zes bewegingsrichtingen gemodelleerd zoals weergegeven in naastgelegen figuur.

In het geval van Rogers et al (2011) gaat het om een rekenmodel wat met behulp van Monte Carlo simulaties resulteert in een statistische kansverdeling. Ook het rekenmodel van Slegers et al (2009) gebruikt een computermodel met simulaties om de resultaten te berekenen. Om dergelijke simulatiemodellen bruikbaar te maken om een analyse van de externe veiligheid van de omgeving te maken zijn computersimulaties benodigd per



situatie die beoordeeld wordt. Er is een hoge mate van kennis en grotere hoeveelheid modellering benodigd om de berekening uit te kunnen voeren. De berekening wordt daarmee in grotere mate een black-box systeem waarbij door middel van simulaties resultaten worden verzameld.

6.3.4 Aanpassing B1-A - Partiële bladworpsenario's

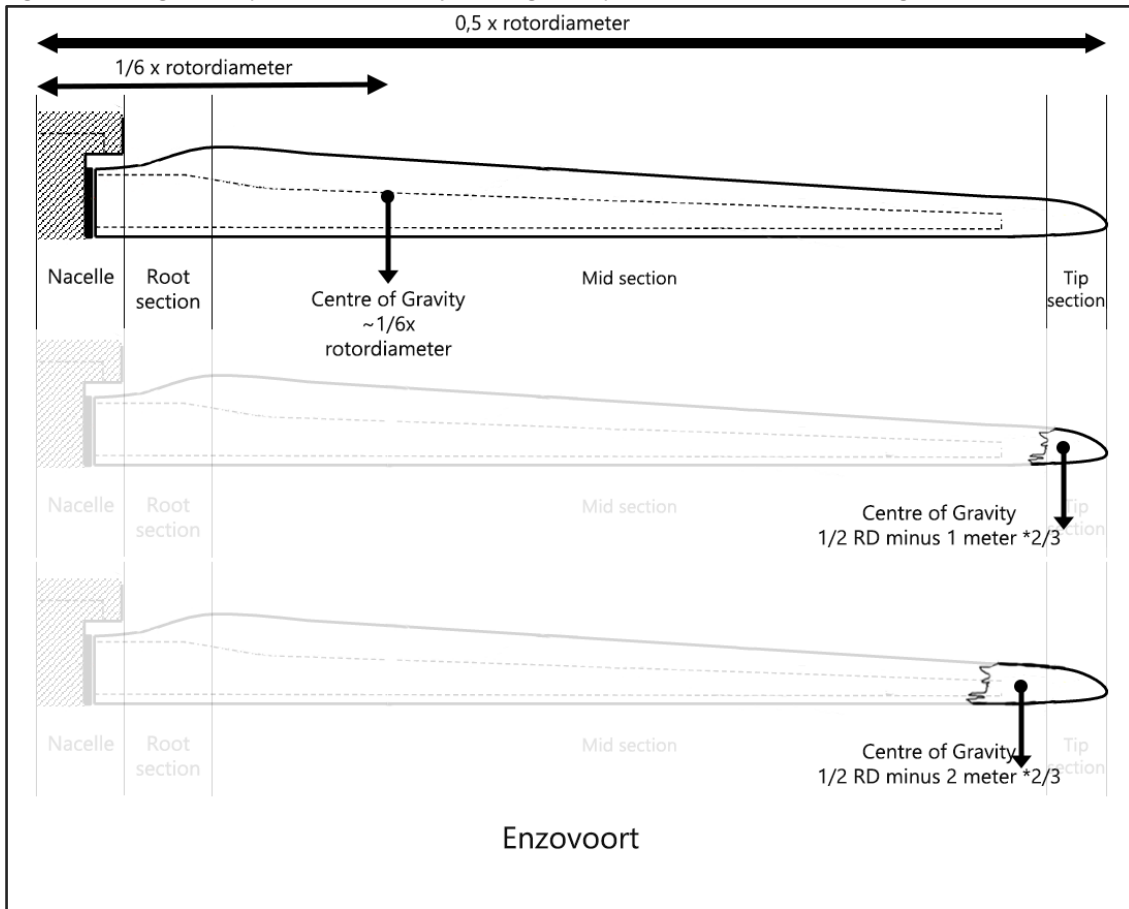
Met de opsplitsing van het faalscenario bladworp in het onderzoek naar de actualisatie faalfrequenties windturbines in twee separate faalscenario's van volledig bladworp en van partieel bladworp dienen ook de rekenmodellen zodanig te worden aangepast dat de gevolgen van een partiele bladbreuk goed worden omschreven. Aangezien de breuk van het blad op elke plaats over de gehele bladlengte zou kunnen plaatsvinden zijn er een tal van situaties met bijbehorende effectafstanden mogelijk. Er ontstaat daarmee een vraag hoe een dergelijk faalscenario van partieel bladbreuk gemodelleerd kan worden.

Indien er vanuit wordt gegaan dat ook partiële rotorbladen zich vergelijkbaar gedragen als omschreven in de voorgaande methodieken B1 t/m B3 dan zijn enkel aanpassingen benodigd aan de bepaling van de locatie van de bladbreuk over het rotorblad. In onderstaande situaties worden enkele mogelijke uitgangspunten beschouwd.

Opsplitsing in delen van 1 meter

In dit faalscenario wordt er van uitgegaan dat de breuk van het rotorblad op elke meter kan plaatsvinden en dat de hoeveelheid breuken uniform verdeeld zijn over het rotorbladoppervlak. Ook is er vanuit gegaan dat de oppervlakte van het rotorblad uniform verdeeld is over de verschillende bladdelen.

Figuur 6.5 Weergave van partiële bladdelen bij verdeling breuk per 1 meter strekkende bladlengte



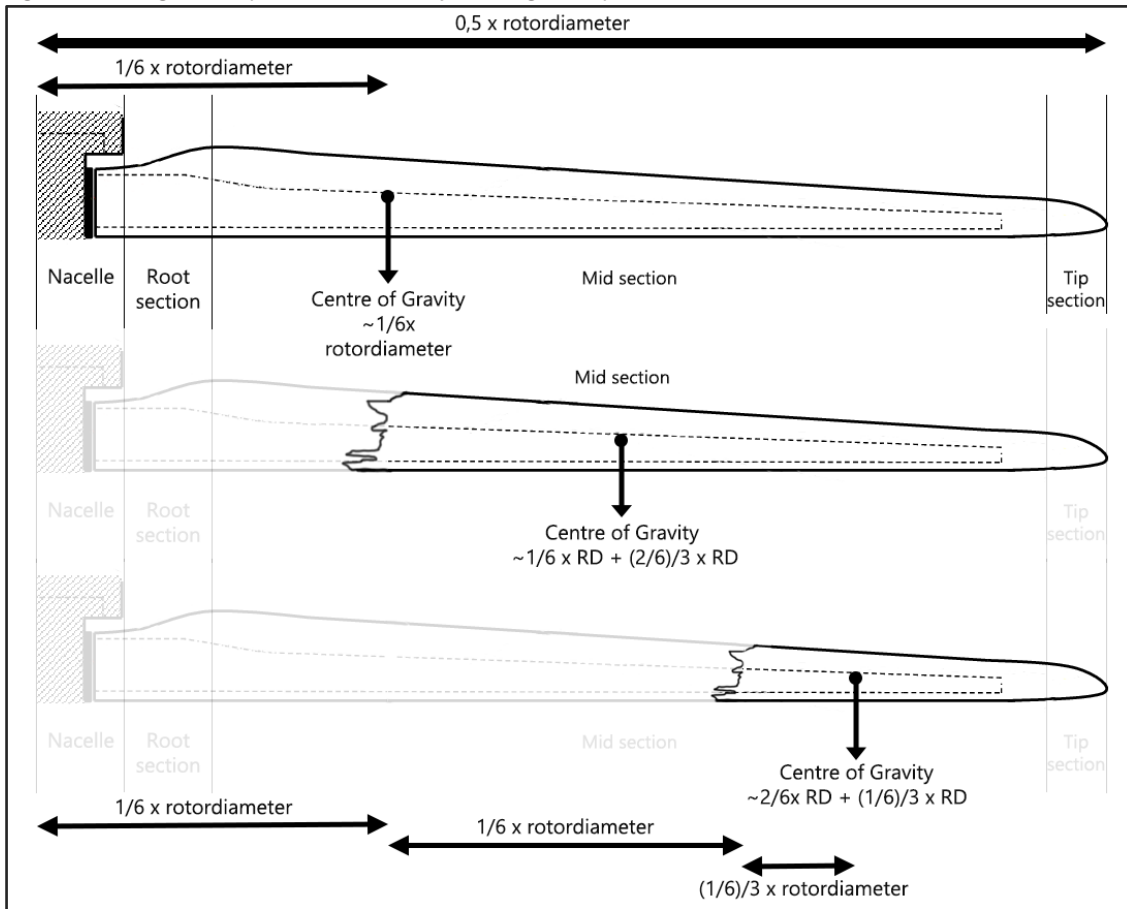
Uitkomst partiële bladbreuk per strekkende meter rotorblad

Het opsplitsen in geworpen partiële rotorbladdelen van één meter zorgt voor een kleine overschatting van de trefrisico's bij de worp van kleinere bladdelen en voor een onderschatting van de trefrisico's voor grote bladdelen. Algemeen geldt ook dat hoe kleiner het geworpen bladdeel is hoe groter de invloed en tegenwerkende werking van luchtkrachten tijdens de vlucht een rol gaat spelen. De geworpen kleine rotordelen worden geworpen met een hogere snelheid wat zorgt voor een grotere wrijving aan luchtkrachten en zullen door hun beperktere massa ook sneller vertragen. De onzekerheid over de betrouwbaarheid van de hieronder theoretische grote werpafstanden van de kleinere onderdelen is dan ook zeer groot (zie Figuur 6.7).

Opsplitsing blad in geworpen delen van een derde

In dit faalscenario wordt er van uit gegaan dat de breuk van het rotorblad op twee plaatsen plaatsvindt op $1/3$ e bladlengte afstand en op $2/3$ e bladlengte afstand. De gevonden faalfrequentie voor partieel bladbreuk wordt gelijk verdeeld over deze twee situaties.

Figuur 6.6 Weergave van partiële bladdelen bij verdeling breuk per derden



Uitkomst partiële bladbreuk per derden rotorblad

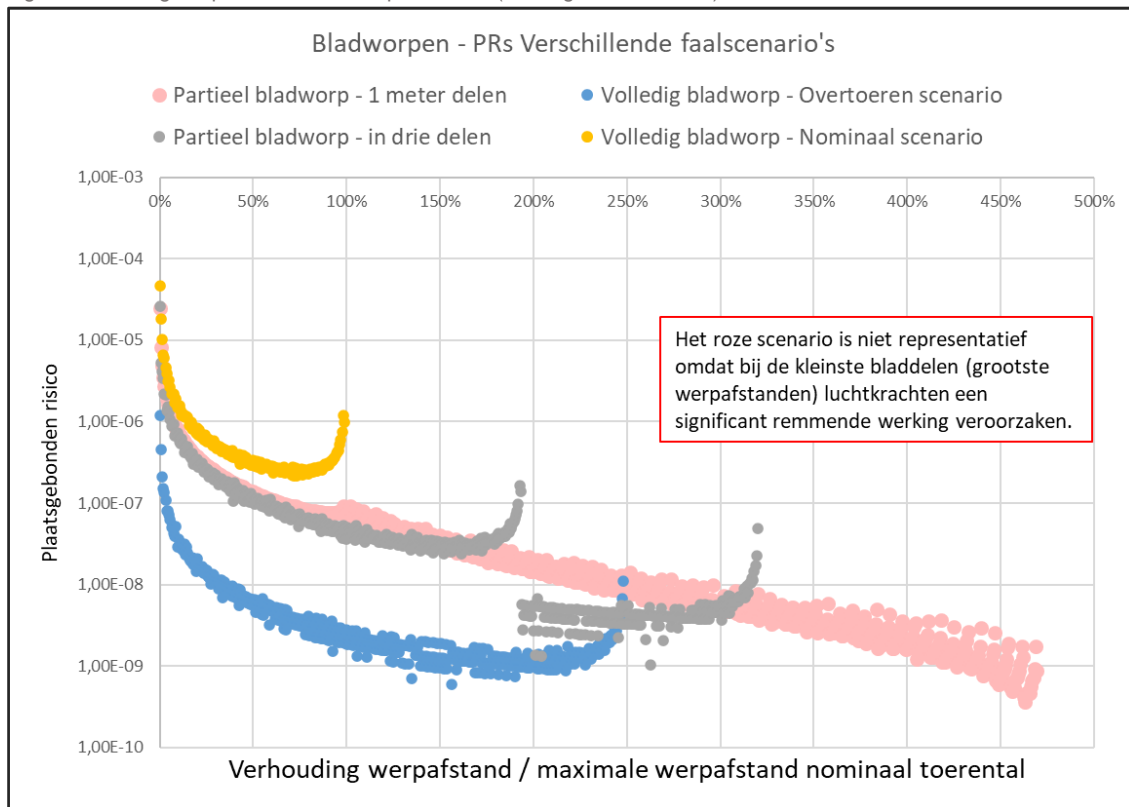
Deze verdeling van het rotorblad in geworpen derden zorgt voor een onderschatting van de maximale effectafstand omdat hierbij er geen effect wordt berekend buiten de maximale effectafstand behorend bij een geworpen rotorblad van $1/3^e$ bladlengte. Voor de werpafstanden binnen de werpafstand van een $1/3^e$ bladdeel zijn de trefrisico's nagenoeg vergelijkbaar en in dezelfde orde van grote. De betrokken maximale effectafstand is groter dan de oorspronkelijke maximale effectafstand van het oorspronkelijk faalscenario bladworp bij overtoeren.

Tevens lijkt het partieel afbreken op afstanden van $2/3^e$ bladlengte en $1/3^e$ bladlengte enigszins overeen te komen met gevonden foto's van gefaalde windturbines waarbij in veel gevallen bij rotorbladschade grote delen van de rotorbladen bevestigd blijven aan de rechtopstaande windturbine en niet op de grond neervallen¹¹. Deze breuklocaties lijken ook overeen te komen met het ontwerp van het gros van de rotorbladen. De rotorbladen zijn het sterkst ontworpen bij de aanhechting met de nacelle waar het moment (kracht x arm) het grootst is. Hoe verder langs de lengte van het rotorblad hoe meer het sterke ontwerp plaatsmaakt voor een ontwerp wat zoveel mogelijk windenergie probeert te 'vangen'. De delen van het rotorblad verderop de lengte van het rotorblad zijn lichter ontworpen en bevatten steeds minder versteviging. De laatste delen van het rotorblad heeft vaak geen specifieke versteviging. Gezien dit

¹¹ Voorbeeld: Zoek op zoekterm "Windturbine failure" op <https://images.google.com/>

generieke ontwerpprincipes is het waarschijnlijk dat bij een incident het zwakste punt van het rotorblad direct na het stoppen van een versterking de locatie is waar het faalt.

Figuur 6.7 Weergave partiële bladbreuk per derden (Plaatsgebonden risico)



NB. afstanden zijn ter voorbeeld. Deze zijn afhankelijk van het berekende windturbintype en zijn eigenschappen.

Benodigde wijzigingen in rekenmethodiek

De berekening voor bladworp weergegeven in paragraaf 2.3.1.1 van Module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid kan ook toegepast worden voor partiële bladworpen. De enige aanpassing, voor het rekenmodel zonder luchtkrachten, die benodigd is, is dat bij het invoeren van de 'zwaartepuntsafstand' waarde = R_z waarde de R_z waarde van het afgebroken bladdeel wordt bepaald in de plaats van de waarde van een geheel rotorblad. De formules zelf omschrijven al de hogere snelheid en de variatie in hoogte op moment van afworp welke van toepassing zijn op partiële bladdelen. Doordat de trefkans per vierkante meter wordt gebaseerd op waar het zwaartepunt van het geworpen blad neerkomt hoeft ook hier geen verandering van formule plaats te vinden. Wel dient bij de bepaling van de trefkans van een object rekening gehouden te worden met het formaat van het geworpen bladdeel. Bij een kleiner bladdeel is de potentiële trefzone rondom een object dus kleiner. Voor een voorstel voor benadering zie hoofdstuk 8.

6.3.5 Faalscenario overtoeren

Het faalscenario overtoeren is omschreven als een scenario waarin de windturbine zodanig buiten zijn normale toerental opereert dat een ongewenst hoog toerental wordt behaald en het optreden van een bladworp tijdens dit moment resulteert in zeer grote werpafstanden. Een dergelijk faalscenario van overtoeren kan enkel optreden indien alle remsystemen op een moderne windturbine falen. In oudere windturbines waren er systemen die bestonden uit 'one point of failure' waarbij een scenario van

overtieren kon ontstaan indien één kritisch systeem faalt wat invloed had op de stand van alle rotorbladen. Bij vrijwel alle moderne windturbines met een recent certificaat zijn per windturbineblad individuele pitchsystemen aanwezig die individueel de benodigde remmende werking van het toerental kunnen veroorzaken door het rotorblad zodanig te draaien dat er een remmende werking ontstaat.

In module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid is het faalscenario overtoeren omschreven als een situatie die optreedt bij een toerental gelijk aan 2x het nominale toerental. De herkomst van deze waarde van 2x het nominale toerental is niet bekend.

In de huidige methodiek wordt voor dit faalscenario het werpen van een volledig rotorblad gemodelleerd. Er zijn geen faalincidenten bekend in de Caithness windfarm database of bij de auteurs van dit rapport waarbij volledige rotorbladen geworpen worden tot aan de werpafstanden die maximaal berekend worden voor dit faalscenario. In vrijwel alle gevallen die bekend zijn bij de auteurs van dit rapport waar er sprake was van grote werpafstanden die vergelijkbaar zijn met de berekende waarde van het faalscenario bladworp bij overtoeren ging het om kleinere onderdelen van een rotorblad. In de artikelen van de Caithness windfarm database worden de werp afstanden veelal niet benoemd.

Tabel 6.1 Beoordeling toepassen faalscenario overtoeren

Ontvankelijkheid	De methode is eenduidig en volledig.	0
Validiteit	Het faalscenario bladworp bij overtoeren is omschreven in wetenschappelijke literatuur als een situatie die optreedt tijdens het overtoeren van de windturbine. Het gebruik van de waarde 2x nominaal toerental en het gebruik van de bijbehorende faalfrequentie van 5×10^{-6} zijn beiden niet herleidbaar tot data, wetenschappelijke gegevens of representatieve wetenschappelijke inzichten. De opname van dit faalscenario zorgt daarmee voor een grotere onzekerheid. Door dit faalscenario te gebruiken als maximale effectafstand en de lage faalfrequentie te gebruiken ontstaat er een schijnnaauwkeurigheid.	-
Betrouwbaarheid – Herleidbaar	Het toepassen van het faalscenario bladworp bij overtoeren is in principe herleidbaar omdat de inputgegevens afkomstig zijn van de beschikbare gegevens over het nominale toerental.	0
Betrouwbaarheid – Reproduceerbaar	Het toepassen van het faalscenario bladworp bij overtoeren is reproduceerbaar in de berekeningen maar de situatie die wordt omschreven blijkt niet uit de praktijkdata.	-
Betrouwbaarheid – Conservatief	De methode is conservatief omdat het volledige rotorblad wordt beschouwd. De gebruikte faalfrequentie is echter niet onderbouwd en niet te herleiden uit data. Het is daarmee onzeker of de berekende waarde zelf ook conservatief is.	0
Toepasbaarheid	Het faalscenario is moeilijk uitlegbaar omdat het onwaarschijnlijk lijkt dat een volledig rotorblad wordt geworpen tot aan afstanden zoals berekend worden. Tevens is de verwachting dat dit faalscenario niet meer van toepassing is op moderne windturbines met individueel pitchende rotorbladen. Deze windturbines beschikken over drie individuele systemen die de rotorbladen uit de wind draaien waardoor de rotatiesnelheid kan worden gereduceerd. Deze systemen zijn vaak onafhankelijk van elkaar werkzaam en effectief en beschikken over eigen accusystemen in het geval van stroomuitval. Het hanteren van het faalscenario bladworp bij overtoeren lijkt daarmee niet relevant en niet uitlegbaar voor moderne windturbines die beschikken over deze systemen. Het is mogelijk wel toepasbaar voor oudere windturbintypes die niet beschikken over individueel pitchende rotorbladen.	-

Het faalscenario bladworp bij overtoeren dient in de huidige risico analyses ook als maximale afstand tot waar theoretisch nog een effect zou kunnen optreden. De maximale werpafstand die behoort bij het

faalscenario bladworp bij overtoeren wordt daarom ook gezien als een onderzoeksafstand of een identificatieafstand. Dit betekent dat binnen deze maximale afstand alle objecten in kaart worden gebracht die theoretisch geraakt zouden kunnen worden. Buiten deze afstand is geen onderzoek benodigd en hoeft de relevante omgeving niet in kaart te worden gebracht. Deze functie zorgt ervoor dat er door de relatief grote werpafstand bij overtoeren er een ruim onderzoek wordt uitgevoerd die de gehele omgeving in kaart brengt. Deze functie is echter niet langer benodigd indien een partieel bladworp faalscenario wordt toegevoegd aan de rekenmethodiek. Dit faalscenario zal daardoor in de meeste gevallen namelijk de grootste effectafstand veroorzaken en zal daarmee de nieuwe maximale onderzoeksgrens van een externe veiligheidsanalyse zijn. Het bladworp scenario overtoeren voegt daarmee geen significant te onderzoeken effect meer toe aan een risico analyse gezien zijn zeer lage faalfrequentie, beperkt risico voor de omgeving per vierkante meter en niet langer de maatgevend zijnde maximale effectafstand.

7 Beoordeling rekenmethodieken

In dit hoofdstuk wordt per gevonden rekenmethodiek in hoofdstuk 6 een beoordeling uitgevoerd per faalscenario.

7.1 Beoordeling mastfalen

7.1.1 Beoordeling methodiek M1 – Geometrische analyse

Rekenmethodiek M1 betreffen de huidige formules waarmee het gevolg van mastfalen wordt bepaald.

Tabel 7.1 Beoordeling toepassen rekenmethodiek mastfalen

Ontvankelijkheid	De methode is eenduidig en volledig.	+
Validiteit	De methodiek is gebaseerd op geometrie en vormt daarmee een valide methodiek om de gevolgen van mastfalen te beschouwen. Er is geen data of wetenschappelijk bewijs beschikbaar die aangeeft dat uniforme verdelingen van de valrichting niet geschikt zijn als uitgangspunt. De methodiek introduceert geen schijnnaauwkeurigheid.	+
Betrouwbaarheid – Herleidbaar	De methodiek is eenvoudig uit te leggen en vindt zijn oorsprong in de geometrie. De berekeningen en formules kunnen goed visueel worden gemaakt met behulp van GIS-systemen. De uitkomsten zijn daarmee goed herleidbaar.	+
Betrouwbaarheid – Reproduceerbaar	De reproduceerbaarheid van de berekeningsmethodiek is goed. Doordat gebruik wordt gemaakt van een berekening van de soliditeit van het bladoppervlak (voor bepaling PR-waarden) dient deze parameter duidelijk en eenduidig te worden bepaald om de uitkomsten volledig reproduceerbaar te maken.	0
Betrouwbaarheid – Conservatief	De huidige berekeningsmethodiek gaat ervan uit dat de mast faalt aan de voet van de maststoren maar valt tot op een maximale afstand gelijk aan een tiphoogte afstand waarmee het kantelpunt in de maststoren dus op $x=0m$ wordt gelegd. Omdat het breekpunt enkel onderaan de mast wordt geplaatst en omdat knikken van de mast wordt beschouwd als volledig omvallen vanaf de voet kan de methodiek gezien worden als een conservatieve benadering ten opzichte van situaties waarbij de mast ook partieel kan falen of in het geheel de grond niet zal raken. In de huidige berekeningsmethodiek wordt geen rekening gehouden met het kantelen van het fundament en wordt er geen extra effectafstand aangehouden voor de breedte van het fundament of voor de breedte van de maststoren om de maximale effectafstand (tiphoogte) te bepalen. Gecombineerd kan de methodiek worden gezien als een conservatieve aanname.	0
Toepasbaarheid	De betrokken methodiek is goed toepasbaar en uitvoerbaar. Er is slechts een beperkte hoeveelheid gegevens benodigd om de risico's op de omgeving te kunnen berekenen.	+

7.1.2 Beoordeling methodiek M1-A + aanpassing valafstanden

Het toevoegen van een fundamentbreedte aan de effectafstand bij het faalscenario mastfalen suggereert dat het fundament kan falen waarmee de gehele windturbine kantelt vanaf de voet van het fundament. In Nederland worden fundamente van onshore windturbines vrijwel altijd voorzien van een geheel fundament. De kans op kantelen of falen van het fundament aan de voet van het fundament wat resulteert in het kantelen van het fundament (zoals zichtbaar in Figuur 4.3) wordt dan ook extreem klein geacht in Nederland. Er zijn ook geen incidenten bekend in Nederland waarbij het fundament is gefaald wat tot

kantelen vanaf de voet van het fundament heeft geleid. Doordat bij de bepaling van de maximale effectafstand reeds rekening is gehouden met de tiphoogte van de windturbine (gerekend vanaf het maaiveld) wordt er reeds een extra conservatieve bepaling van de maximale effectafstand uitgevoerd doordat het fundament ook een hoogte heeft.

Tabel 7.2 Beoordeling toepassen rekenmethodiek mastfalen

Ontvankelijkheid	De methode is eenduidig en volledig.	+
Validiteit	De methodiek is gebaseerd op geometrie en vormt daarmee een valide methodiek om de gevolgen van mastfalen te beschouwen. Er is geen data of wetenschappelijk bewijs beschikbaar die aangeeft dat uniforme verdelingen van de valrichting niet geschikt zijn als uitgangspunt.	+
Betrouwbaarheid – Herleidbaar	De methodiek is eenvoudig uit te leggen en vindt zijn oorsprong in de geometrie. De berekeningen en formules kunnen goed visueel worden gemaakt met behulp van GIS-systemen. De uitkomsten zijn daarmee goed herleidbaar. De toevoeging van een fundamentbreedte aan de maximale effectafstand van mastfalen maakt de berekening complexer en meer variabel omdat deze afhankelijk wordt van het te realiseren fundament formaat.	0 (+)
Betrouwbaarheid – Reproduceerbaar	De reproduceerbaarheid van de berekeningsmethodiek is goed. Doordat gebruik wordt gemaakt van een berekening van de soliditeit van het rotoroppervlak dient deze parameter duidelijk en eenduidig te worden bepaald om de uitkomsten volledig reproduceerbaar te maken.	0
Betrouwbaarheid – Conservatief	De aangepaste berekeningsmethodiek gaat ervan uit dat de mast faalt aan de voet van het fundament en valt tot op een maximum van een tiphoogte afstand plus een fundamentsbreedte. Voor Nederlandse situaties wordt dit als onnodig conservatief gezien omdat de kans op een degelijke scenario bij een geheide fundatie onwaarschijnlijk is. Vrijwel alle windturbines van formaat worden voorzien van een geheide fundatie in Nederland ¹² . Het toevoegen van de effectafstand van fundamente falen aan het faalscenario mastfalen wordt gezien als een onnodig conservatief uitgangspunt.	- (0)
Toepasbaarheid	De betrokken methodiek is goed toepasbaar en uitvoerbaar. Er is slechts een beperkte hoeveelheid gegevens en berekeningen benodigd om de risico's op de omgeving te kunnen berekenen.	+

NB. Tussen haakjes de score zonder aanpassing

In de concept versie van de technische omschrijving van 'IEC TS 61400-31:2023 Wind energy generation systems - Part 31: Siting risk assessment' wordt aangegeven dat er wel rekening kan worden gehouden met de fundatiebreedte of de mastbreedte als het gaat om het bepalen van de valafstand bij mastfalen. Gezien de extra complexiteit en lagere herleidbaarheid wordt het toevoegen van de fundamentbreedte aan de effectafstand van mastfalen niet gezien als een positieve verbetering voor de situatie in Nederland. Gezien het gebruikelijke fundatietype in Nederland en de afwezigheid van bekende faalincidenten wordt de aanpassing van het faalscenario niet als noodzakelijk gezien.

7.1.3 Conclusie mastfalen

Voor het faalscenario mastfalen wordt aanbevolen om gebruik te blijven maken van rekenmethodiek M1. De rekenmethodiek kan verbeterd worden qua reproduceerbaarheid indien de definities van de gebruikte parameters eenduidig worden bepaald. Deze verbetering kan voornamelijk plaatsvinden bij de bepaling van de soliditeit van het rotoroppervlak. De soliditeit kan berekend worden met de formule:

¹² Kleinschalige windturbines kunnen een niet-geheid fundament hebben maar het formaat van deze fundamente is veelal zeer beperkt waardoor ook hier de invloed op de maximale valafstand van de mast klein is.

$$s = \frac{3 * A_b}{\pi * (0,5 * D)^2}$$

Met: A_b = Oppervlakte rotorblad, D = Diameter rotor, s = Solidity rotoroppervlak.

7.2 Beoordeling gondelfalen

7.2.1 Beoordeling methodiek G1 – Geometrische analyse

Methodiek G1 is gelijk aan de methodiek M1 maar dan met het uitgangspunt dat de hoogte 0m is. Hierbij is de maximale effectafstand bij gondelfalen dus beperkt tot een halve rotordiameter afstand. Het centrum van de gondel landt dan ook volgens de berekening op een afstand van $x=0m$.

Tabel 7.3 Beoordeling toepassen rekenmethodiek gondelfalen methodiek G1

Ontvankelijkheid	De methode is eenduidig maar lijkt niet de volledige scope van de gevolgen van moderne windturbines weer te geven.	0
Validiteit	De rekenmethodiek betreft een versimpelde weergave van de faalscenario's die kunnen optreden indien een gondel met rotor of een hub met rotor naar beneden vallen terwijl de mast blijft staan. De uitkomsten lijken niet geheel aan te sluiten bij de incidentrapportages van moderne windturbines waar dit type faalscenario optreedt.	-
Betrouwbaarheid – Herleidbaar	De methodiek voor het bepalen van gondelfalen was sterk gerelateerd aan de methodiek van mastfalen. De huidige methodiek lijkt niet specifiek opgezet te zijn om de effecten van gondelfalen te omschrijven maar is eerder een versimpeling van het faalscenario mastfalen. De basis van de methodiek komt voort uit de geometrie en is goed verklaarbaar. De keuze voor uniforme valrichtingen is verklaarbaar.	0
Betrouwbaarheid – Reproduceerbaar	De versimpelde uitgangspunten voor wat betreft de vallocatie van de gondel maken de methodiek goed toepasbaar en makkelijk reproduceerbaar. Er zijn weinig variabelen die invloed hebben op de uitkomst. Net als bij mastfalen speelt voor de bepaling van de plaatsgebonden risicocontouren de soliditeit van het rotoroppervlak een rol.	+
Betrouwbaarheid – Conservatief	Doordat in de berekeningsmethodiek de vallocatie op $x=0m$ wordt geplaatst worden incidenten waarbij de gondel op grotere afstand naast de mastoren valt niet meegenomen in de bepaling van het risico. Hierdoor is de effectafstand kleiner dan wat verwacht kan worden op basis van de vallocatie van de verschillende gondelonderdelen. Gezien het steeds grotere formaat van gondels is de methodiek daardoor niet conservatief te noemen.	-
Toepasbaarheid	De berekeningsmethodiek dient te worden geüpdatet door de groter wordende windturbineonderdelen. De vergroting van windturbines op land lijkt nog geen limiet te kennen waarmee de methodiek minder toekomstbestendig is. De methodiek geeft ook een onvolledig beeld als het gaat om impact berekeningen omdat het een onderschatting weergeeft van de locatie waar de zware gewichten van de gondel en de hub kunnen neer vallen.	-

7.2.2 Beoordeling methodiek G2 – Bivariate normale verdeling

De methodiek waarbij het gondelfalen wordt bepaald uit een bivariate normale verdeling wordt enkel benoemd als mogelijkheid onder het hoofdstuk buisleidingen om de kansdichtheidsverdeling te kunnen bepalen. De methodiek lijkt toegevoegd te zijn om de foutieve aanname van het landen van het centrum

van de gondel op een afstand van $x=0\text{m}$ die afkomstig is uit de formules van methodiek G1 te kunnen herstellen.

Tabel 7.4 Beoordeling toepassen rekenmethodiek gondelfalen methodiek G2

Ontvankelijkheid	<p>De gegeven formule is in principe eenduidig maar de tekstuele uitleg geeft geen volledige informatie over de toepassing van de methodiek waardoor er sprake is van missende informatie.</p> <p>De methodiek is tevens niet volledig omdat er enkel een trefkans volgt uit de formule waarbij niet duidelijk wordt op welke locaties een element / object of buisleiding getroffen wordt door welk onderdeel. Zo kan bij een dieper liggende leiding de leiding voldoende bescherming hebben om treffen door een rotorblad veilig te kunnen weerstaan. De huidige methodiek is dan niet goed meer van toepassing omdat er geen onderscheid in trefkans wordt gemaakt tussen treffen door een gondелеlement en/of treffen door een rotorbladelement bij het optreden van het faalscenario gondelfalen.</p>	0
Validiteit	De methodiek lijkt gekozen te zijn om een kansdichtheidsverdeling te kunnen bepalen. Er is geen analyse uitgevoerd of deze kansdichtheidsverdeling geschikt is als methodiek. De argumentatie die wordt gegeven voor toepassing van deze methodiek is dat het een verdeling betreft met een grotere kans van treffen nabij de voet van de windturbine dan op een grotere afstand. De formule is zodanig gekalibreerd dat hij nagenoeg stopt bij een halve rotordiameter.	-
Betrouwbaarheid – Herleidbaar	De methodiek is niet goed herleidbaar tot generieke principes en de oorsprong of bron van de methodiek is onbekend. Tevens worden op andere plaatsen in de rekenmethodiek andere principes gebruikt voor de bepaling van het faalscenario gondelfalen. Zo wordt voor bepaling van het plaatsgebonden risico een ander uitgangspunt gebruikt voor de bepaling van waar de windturbineonderdelen neervallen. Het is onduidelijk waarom voor buisleiding een andere benadering zou moeten gehanteerd. De methodiek is daarom ook niet herleidbaar tot de andere gebruikte formules.	-
Betrouwbaarheid – Reproduceerbaar	De reproduceerbaarheid van de berekeningsmethodiek zelf, die uit één formule bestaat, is goed. Wel is er weinig toelichting beschikbaar over hoe de methodiek in specifieke gevallen toegepast dient te worden en in hoeverre de samenhang met de bepaling van de kritische afstanden te bepalen is. Verschillen in de invulling van deze vraagstukken kunnen leiden tot verschillende uitkomsten.	-
Betrouwbaarheid – Conservatief	Uit narekeningen tussen deze methodiek en methodieken zoals G1-A blijkt dat berekeningsmethodiek G2 leidt tot sterk lagere trefkansen. Ook de totale effectafstand wordt afgekapt op exact een halve rotordiameter en het is onduidelijk of een kritische strook rondom een buisleiding nog een rol speelt in de bepaling van de trefkans.	0
Toepasbaarheid	De betrokken methodiek is goed toepasbaar maar er mist informatie over hoe deze toegepast kan worden in berekeningen in de praktijk.	+

7.2.3 Beoordeling methodiek G1-A - opsplitsing gondel en hub falen en valafstand

Uit de foto's die zijn gemaakt nabij windturbines waar de gondel en/of de hub los is geraakt van de masttoren blijkt dat de vallende onderdelen naast de masttoren op de grond vallen. De betrokken onderdelen zijn zodanig zwaar dat er geen sprake is van een significante afstand van verwaaien als gevolg door een aanwezige windsnelheid. De onderdelen vallen dus nagenoeg naar beneden op de locatie waar ze aanwezig zijn. Voor kleinere windturbines was het aannemelijk te maken dat de gondel daardoor zodanig dicht bij de relatieve kleine masttoren valt dat een uitgangspunt van $x=0\text{m}$ zoals gehanteerd in methodiek G1 een relatief goed uitgangspunt is. De afmetingen van de gondel en de hub van moderne windturbines zijn echter zodanig groot dat er een grotere afstand kan zitten tussen het hart

van de masttoren en de daadwerkelijke vallocaties van de gondel. Ook de geïnstalleerde positie van de gondel en/of hub ten opzichte van het centrum van de masttoren is groter bij moderne windturbines wat kan leiden tot een grotere valafstand dan waar in methodiek G1 sprake van is.

De opsplitsing van de faalfrequenties in een hubfalen en een gondelfalen dient ook weergegeven te worden in twee verschillende berekeningen.

Tabel 7.5 Beoordeling toepassen rekenmethodiek gondelfalen methodiek G1-A

Ontvankelijkheid	De methode is eenduidig en volledig en bevat de volledige scope van effecten die verwacht kunnen worden onder het faalscenario gondel- en hubfalen.	+
Validiteit	Er zijn geen wetenschappelijke gegevens beschikbaar over de vallocatie van de gondel en hub onderdelen. Uit het beschikbare visuele anekdotische materiaal (foto's) lijken bij deze faalincidenten de gondel en hub delen direct naast de mast te zijn gelegen. Omdat de voorgestelde rekenmethodiek uitgaat van een uniforme verdeling van de vallende onderdelen in een kleine cirkel rondom de masttoren lijkt de methodiek geschikt om deze faalscenario's te omschrijven.	0
Betrouwbaarheid – Herleidbaar	De methodiek is gebaseerd op geometrie en een uniforme verdeling van valrichtingen. De uitgangspunten zijn daarmee herleidbaar tot basis principes.	+
Betrouwbaarheid – Reproduceerbaar	De berekeningsmethodiek is goed reproduceerbaar en geeft een betere duiding aan niet alleen de trefkans van een onderdeel maar ook over de specifieke vallocaties die kunnen plaatsvinden.	+
Betrouwbaarheid – Conservatief	Door de gondel naast de torenmast te laten neervallen en de meevallende rotorbladen vanaf dit punt te berekenen ontstaat een grotere effectzone waarbinnen een object of persoon geraakt kan worden. Door elke keer uit te gaan van de maximale valafstand (0,5x maximale gondeldimensie) wordt rekening gehouden met een worst-case faalscenario. Het vallen (gooien) van de gondel op een grotere afstand wordt niet waarschijnlijk geacht indien de masttoren intact blijft staan. Als de masttoren faalt is sprake van een mastfaal incident en zal die faalkans en trefkansbenadering behorende bij dat faalscenario gelden. De methodiek voor de bepaling van gondel- en hubfalen is daarmee conservatief te noemen.	+
Toepasbaarheid	De gegevens die benodigd zijn om de berekening uit te voeren zijn goed beschikbaar. De methodiek geeft tevens een eenduidig beeld van de mogelijke effecten en is uitvoerbaar als methodiek om de risico's op de omgeving inzichtelijk te maken.	+

7.2.4 Conclusie gondelfalen

De huidige rekenmethodiek G1 beperkt de effectafstand van het faalscenario gondel en hubfalen tot een maximale afstand van een halve rotordiameter omdat de methodiek ervan uitgaat dat de gondel op een afstand van $x=0m$ op de grond valt. Met het toenemende formaat van gondels en hub onderdelen van windturbines lijkt deze aanname niet overeen te komen met de incidenten die gevonden worden in de faalstatistieken databases en met foto's van incidenten. Door een kleine aanpassing te maken aan de locaties waar de verschillende onderdelen de grond treffen in de berekeningen wordt een situatie berekend die beter overeen lijkt te komen en beter passend is bij moderne windturbineformaten. Door een ring te trekken rondom de masttoren met een breedte van een halve maximale gondelformaat waar het zwaartepunt van de gondel of hub neer kan vallen wordt de berekening van vergelijkbare complexiteit als het mastfaalscenario. Deze extra rekenstap zorgt voor een conservatievere analyse en een beter herleidbaar resultaat. De berekeningsmethodiek zoals genoemd in G2 is daarmee dan ook niet meer benodigd omdat in de berekening G1 met aanpassing (G1-A) nu duidelijk wordt waar de verschillende onderdelen kunnen vallen en welke kansverdeling daarbij kan worden gehanteerd. De trefkans van de verschillende onderdelen kan specifiek worden bepaald. Geadviseerd wordt om de rekenmethodiek van

G1-A over te nemen en daarbij de opsplitsing in twee faalscenario's voor hubfalen en gondelfalen toe te passen.

7.3 Beoordeling bladworp

7.3.1 Beoordeling B1 – Kogelbaanmodel zonder luchtkrachten

Het bladworpmodel zonder luchtkrachten is een model wat resultaten produceert welke gezien kunnen worden als een conservatieve weergave van de verschillende incidenten die kunnen optreden die resulteren in het werpen van een rotorblad. Door een versimpeling van de werkelijke situatie te omschrijven kan een grove indicatie worden gegeven wat de kans is dat een rotorblad op een bepaalde locatie in de omgeving terecht komt. Het model is gebaseerd op de principes van de klassieke mechanica en maakt gebruik van de vergelijkingen om de positie, snelheid en versnelling van het object in de tijd te berekenen.

Het is belangrijk op te merken dat dit model eenvoudige aannames en vereenvoudigingen maakt en geen rekening houdt met realistische windomstandigheden, luchtweerstand en andere factoren die van invloed kunnen zijn op de werkelijke beweging van een rotorblad van een windturbine. De voornaamste vraag voor dit model zonder luchtkrachten is dan ook niet of de uitkomst perfect is en met alle zaken rekening is gehouden maar eerder of een eenvoudiger rekenmodel voldoende inschatting geeft van de risico's en effecten die kunnen optreden.

Tabel 7.6 Beoordeling toepassen rekenmethodiek bladworp methodiek B1

Ontvankelijkheid	De methode is eenduidig en volledig. De inputgegevens kunnen worden verbeterd door de definitie van de parameter nominaal toerental vast te leggen. Ook de definitie van het kritiek bladoppervlak kan worden vastgelegd.	0
Validiteit	Het is een versimpeld rekenmodel waardoor het gebruik maakt van een grotere hoeveelheid aannames. Hiermee dienen de resultaten gezien te worden als een conservatieve benadering van de gevolgen van bladworp. Indien rekening wordt gehouden met bijvoorbeeld luchtkrachten zullen de werpafstanden afnemen en/of zal de impact kleiner worden.	0
Betrouwbaarheid – Herleidbaar	De methodiek is gebaseerd op geometrie en kinematische vergelijkingen en een uniforme verdeling van werprichtingen en één continu toerental. De uitgangspunten zijn daarmee herleidbaar tot de basis principes van de werking van een windturbine. Het rekenmodel zonder luchtkrachten kent een uitgebreide toepassing en lange geschiedenis van toepassing in Nederland.	+
Betrouwbaarheid – Reproduceerbaar	Indien de parameters duidelijker zijn gedefinieerd zal de reproduceerbaarheid van het rekenmodel goed zijn. Het opzetten van het rekenmodel vergt wel de ontwikkeling van een uitgebreide rekentool. De rekenresultaten zijn daarom moeilijker te controleren door derden die niet over een dergelijk rekenmodel beschikken.	0
Betrouwbaarheid – Conservatief	Doordat het rekenmodel geen rekening houdt met de afremmende werking van de luchtweerstand tijdens de worp van een rotorblad zal het rekenmodel de werpafstanden en de energie bij impact overschatten. De methodiek is daarom qua afstand conservatief te benoemen. Omdat er echter ook enkel wordt uitgegaan van de worp van een geheel rotorblad en niet van kleinere bladdelen wordt een deel van de risico's van kleinere bladdelen die mogelijk een grotere werpafstand krijgen niet meegenomen in de berekening. Het rekenmodel is op dit punt niet conservatief ingesteld	0

Toepasbaarheid	De gegevens die benodigd zijn om de berekening uit te voeren zijn goed beschikbaar hoewel de parameters over het zwaartepunt van het rotorblad, het bladoppervlak en het nominale toerental van de windturbine beter gedefinieerd kunnen worden. De berekeningsmethodiek vergt de opzet van een uitgebreidere rekentool (Bijvoorbeeld in Excel / Python / VBA e.a.) waarmee het rekenmodel soms moeilijker toepasbaar is. Een verdere versimpeling is wellicht mogelijk door een enkele formule te gebruiken om de maximale werpafstand te bepalen en vervolgens een standaard uniforme verdeling te gebruiken voor de kans van het treffen van een bepaalde afstand binnen deze zone.	0
-----------------------	--	---

7.3.2 Beoordeling B2 – Kogelbaanmodel met luchtkrachten

De Antea Group heeft een kogelbaanmodel met luchtkrachten (zie “*Scenario (gedeeltelijke) bladafworp Effecten van luchtkrachten*”)¹³ gebaseerd op de formules en uitgangspunten zoals gemeld in paragraaf 6.3.1. Niet alle uitgangspunten en aannames die ten grondslag liggen aan een dergelijk rekenmodel zijn vastgelegd in het huidige rekenvoorschrift omgevingsveiligheid versie oktober 2020 waarmee de uitkomsten van de verschillende rekenmodellen met luchtkrachten die in omloop zijn (mn. bij adviesbureau’s) kunnen variëren.

Het toevoegen van de effecten van luchtkrachten heeft als gevolg dat een afgeworpen turbineblad(deel) minder ver afgeworpen wordt. Dit betekent dat de spreiding van de trefgebieden afneemt en de trefkansdichtheid daarmee toeneemt. De PR 10⁻⁶ contour ligt daarmee dichterbij de turbine. Dit gaat uit van het principe dat de luchtkrachten altijd volledig tegenwerken tijdens de vlucht van het rotorblad. Er wordt in dit rekenmodel in principe geen rekening gehouden met de luchtkrachten haaks op de richting van de windsnelheid tijdens de vlucht van het rotorblad.

Als het gaat over de gevolgen van het toepassen van een kogelbaanmodel met luchtkrachten voor de bepaling van de effecten van partieel bladworp dan zijn er enkele belangrijke constatering te maken.

Ten eerste nemen de effecten (gevolgen) van luchtkrachten toe¹⁴ naarmate het afgeworpen bladdeel kleiner wordt. Bij het gedeeltelijk afwerpen van een turbineblad is de initiële snelheid van het turbinebladdeel hoger ten opzichte van een volledig blad. Dit betekent dat de luchtsnelheid, en daarmee de relatieve luchtkracht, op het bladdeel ook is toegenomen. De massa van het geworpen turbinebladdeel is echter ook afgenomen en het turbineblad wordt dus ook meer beïnvloed door de krachten die werken op het turbineblad.

In de formule is te zien dat snelheid kwadratisch wordt meegenomen in de formule voor luchtweerstand en de massa maar één keer. Dit betekent dat het evenredig toenemen van de snelheid en het afnemen van de massa resulteert in een hogere (relatieve) luchtweerstand.

Dit betekent tegelijk ook dat een kogelbaanmodel zonder luchtkrachten de gevolgen van partiële bladworp van zeer kleine onderdelen sterk overschat. Het is daarom niet aan te bevelen om een rotorblad op te knippen in hele kleine onderdelen bij berekening van een kogelbaanmodel zonder luchtkrachten omdat er dan een grotere overschatting van de daadwerkelijke werpafstand optreedt. Het kogelbaanmodel met luchtkrachten laat ook zien dat niet alleen de werpafstand sterk wordt beïnvloed maar dat ook de energie van de impact op de grond wordt beïnvloed door rekening te houden met de

¹³ Rapport door Antea, projectnummer 0481284.100 van 28 september 2023.

¹⁴ Snelheidsverlies door luchtweerstand: $v_1 = v_0 - (\rho \cdot v_0^2 \cdot A \cdot C_w \cdot \Delta t) / (2 \cdot m)$

luchtweerstand. Het toevoegen van de effecten van luchtkrachten heeft als gevolg dat de energie bij impact afneemt. Het afnemen van deze energie neemt toe naarmate de afwerpafstand toeneemt. Dit heeft als gevolg dat naarmate het percentage afgeworpen bladdeel afneemt, het relatieve energieverlies toeneemt. Dus ook hier geldt dat juist bij toepassing van partieel bladworp dat hoe kleiner het bladdeel is dat wordt beschouwd hoe groter de afname van de impact energie is als rekening wordt gehouden met de werkende luchtkrachten tijdens de vlucht van een bladdeel.

Tabel 7.7 Beoordeling toepassen rekenmethodiek bladworp methodiek B2

Ontvankelijkheid	De methode is gebaseerd op een kogelbaanmodel waarbij een extra modellering plaatsvindt om de werking van de luchtkrachten inzichtelijk te maken. Er is niet één enkel gangbaar model beschikbaar en de gebruikte modellen in de praktijk verschillen daarmee onderling. Er dienen extra parameters te worden bepaald zoals 1) de wrijvingscoëfficiënt, die bij rotorbladen sterk variabel is als gevolg van de hoek van het rotorblad ten opzichte van de windsnelheid. 2) Windrichtingverdelingen. 3) Windsnelheidsverdelingen en anderen. Om een ontvankelijk rekenmodel te verkrijgen dienen deze parameters allen te worden vastgelegd in de rekenmethodiek.	-
Validiteit	Deze complexe modellen trachten met een aanvulling van luchtkrachten een betere weergave van de werkelijkheid te omschrijven maar zijn afhankelijk van meerdere parameters en variabelen die bepaald dienen te worden. De uitkomsten van dit rekenmodel zijn specifiek dan het kogelbaanmodel zonder luchtkrachten. Vooral als het gaat om de bepaling van de gevolgen van partieel bladworp zijn de resultaten beter overeenkomstig met de werkelijkheid omdat een kogelbaanmodel zonder luchtkrachten een grote overschatting van de gevolgen maakt. Daarentegen is het onzeker of de aannames die gemaakt moeten worden om tot een generieke uitkomst te komen valide zijn.	0
Betrouwbaarheid – Herleidbaar	De methodiek is gebaseerd op geometrie, kinematische vergelijkingen en de statistische verdeling van variabelen zoals windsnelheid en windrichting. De formules en gebruikte methodieken zijn afgeleiden van een eenvoudig kogelbaanmodel en bekende gegevens over de werking van luchtkrachten tijdens de vlucht van een object. Op enkele punten wordt extra detail toegevoegd aan het rekenmodel ten opzichte van rekenmodel B1. Het is moeilijk herleidbaar waarom het detailniveau enkel op deze punten wordt aangescherpt terwijl andere bepalende factoren wel worden gebaseerd op grovere aannames en uitgangspunten. In methodiek B3 wordt bijvoorbeeld ook rekening gehouden met de windrichting tijdens de vlucht van een rotorblad. Tevens zijn er meer inputgegevens benodigd om het rekenmodel te kunnen laten rekenen.	0
Betrouwbaarheid – Reproduceerbaar	Door de benodigde kennis, de complexiteit van deze rekenmodellen, de te maken aannames van belangrijke parameters en de grotere variabiliteit van de uitkomsten zijn de uitkomsten moeilijk reproduceerbaar.	-
Betrouwbaarheid – Conservatief	Doordat veel inputgegevens en parameters specifiek dienen te worden vastgesteld is er sprake van minder conservatieve uitkomsten. De berekende risico's zijn daardoor mogelijk anders indien tijdens een vlucht van een rotorblad de hoek van een partieel rotorblad bijvoorbeeld zodanig is dat er sprake is van een zweefvlucht. Door specifieke gegevens te gebruiken vervalt een deel van de conservatieve worst-case benadering waar bij de simpelere rekenmodellen sprake van is.	-

Toepasbaarheid	Gezien de extra laag van complexiteit is de methodiek moeilijker toepasbaar voor de bepaling van trefkansen van infrastructures, objecten en personen. De methodiek wordt moeilijker uitlegbaar en moeilijker controleerbaar omdat er meerdere parameters dienen te worden vastgelegd.	0
	Indien de parameters duidelijk worden voorgeschreven zijn de uitkomsten qua complexiteit vergelijkbaar met het kogelbaanmodel zonder luchtkrachten. Bij een juiste bepaling van de te gebruiken uitgangspunten zou het kogelbaanmodel met luchtkrachten daarmee toepasbaar kunnen zijn.	

7.3.3 Beoordeling B3 – 6-Degrees of Freedom complexer bladworpmiddel

Deze complexere rekenmodellen maken gebruik van een groot aantal variabelen om een gedetailleerder inzicht te verkrijgen in het pad wat een blad aflegt tijdens bladworp. Extra variabelen of parameters betreffen bijvoorbeeld: de windsnelheid tijdens de vlucht, de werpriching, een variabel toerental, draaiing van het rotorblad tijdens de vlucht, positie van landen van een rotorblad en in sommige gevallen ook partiële bladbreuk. Dergelijke modellen zijn complex in de uitvoering en zijn in principe alleen beschikbaar bij onderzoeksinstituten of gespecialiseerde adviesbureau's. De uitkomsten zijn afhankelijk van de gekozen aannames en uitgangspunten voor alle parameters en variabelen door de betrokken opsteller van het rekenmodel. Ook in de literatuur zijn er daardoor uiteenlopende resultaten vindbaar van specifieke rekenmodellen waarbij de uitgangspunten of variabelen verschillend zijn bepaald.

Tabel 7.8 Beoordeling toepassen rekenmethodiek bladworp methodiek B3

Ontvankelijkheid	De methode is gebaseerd op een complex en uitgebreid rekenmodel. Er is niet één enkel gangbaar model beschikbaar en de gebruikte modellen verschillen daarmee onderling.	-
Validiteit	Deze complexe modellen trachten een betere weergave van de werkelijkheid te omschrijven maar zijn afhankelijk van meerdere parameters en variabelen die bepaald dienen te worden. Er zou nader onderzoek uitgevoerd dienen te worden om inzichtelijk te maken welk rekenmodel het meest valide is of het beste de werkelijkheid omschrijft. De validiteit is wel goed als het om de volledigheid van modellering gaat omdat er met meer aspecten rekening wordt gehouden in de bepaling van de risico's. Andere modellen gebruiken hiervoor conservatieve aannames.	0
Betrouwbaarheid – Herleidbaar	De methodiek is gebaseerd op geometrie, kinematische vergelijkingen en de statistische verdeling van variabelen zoals windsnelheid en windrichting. De formules en gebruikte methodieken zijn mede omschreven in wetenschappelijke literatuur waarmee de bron van de rekenmodellen bekend is. Dergelijke rekenmodellen zijn niet goed uitwisselbaar gezien de hogere mate van expertise die benodigd is om het rekenmodel op te bouwen en te gebruiken. Tevens zijn er meer inputgegevens benodigd om het rekenmodel te kunnen laten rekenen dan in de andere methoden. Deze informatie is niet altijd openbaar beschikbaar en de beschikbaarheid van deze detailinformatie kan verschillen per project. Tevens is de hoeveelheid benodigde informatie niet altijd beschikbaar in een vroege planvorming van een windenergieproject.	0
Betrouwbaarheid – Reproduceerbaar	Door de benodigde kennis, de complexiteit van deze rekenmodellen en de variabiliteit van de uitkomsten zijn de uitkomsten moeilijk reproduceerbaar.	-
Betrouwbaarheid – Conservatief	Doordat veel inputgegevens specifiek dienen te worden vastgesteld is er sprake van minder conservatieve uitkomsten. Zo wordt vooraf aan de analyse een windklimaat bepaald met windsnelheden en windrichtingen. De resultaten worden beïnvloed door de ingevulde klimatologische omstandigheden. Voor de locatie kan echter sprake zijn van windrijke jaren of jaren met een andere windrichtingverdeling. De berekende risico's zijn daardoor mogelijk anders.	-

	Door specifieke gegevens te gebruiken vervalt een deel van de conservatieve worst-case benadering waar bij de simpelere rekenmodellen sprake van is.	
Toepasbaarheid	<p>Gezien de complexiteit is de methodiek moeilijker uitlegbaar. De uitkomsten zullen ook meer variabiliteit hebben. Bij andere risicovolle bronnen is de invloed van het weer groter omdat de risico's specifiek gaan over de verspreiding van stoffen in de omgeving. Je krijgt dan bijvoorbeeld risicocontouren met variabele vormen in bepaalde windrichtingen. Bij windturbines is er minder invloed als gevolg van de weersomstandigheden. De methodiek wordt moeilijker uitlegbaar indien de risicocontouren niet meer uniform zijn rondom de windturbine. Er moet dan meer vertrouwen worden gelegd in het rekenmodel zelf omdat de uitkomsten niet altijd conservatief zijn bepaald.</p> <p>Ook is deze complexe methodiek minder geschikt om snel een uitspraak te kunnen doen over de risico's die aanwezig kunnen zijn omdat elke analyse een uitgebreidere exercitie wordt. De rekenmethodiek is daarmee ook minder geschikt voor quickscans of haalbaarheidsscans. Dit wordt versterkt indien de risicocontouren variabel van vorm worden.</p>	-

7.3.4 Beoordeling B1-A – Toevoeging partieel bladworp

Het faalscenario genaamd 'partieel bladworp' wordt gebruikt om de gevolgen van een reeks aan mogelijke faalincidenten te omschrijven. Uit de literatuurstudie blijkt dat een rotorblad op meerdere manieren kan afbreken tijdens de rotatie. Zo kan een klein deel losraken en weg worden geslingerd maar kan ook een rotorblad door de grote rotatie krachten versplinteren waarbij er meerdere kleinere delen over een groter gebied verspreid raken. Tijdens brandincidenten kan sprake zijn van verbranding van bladdelen die deels ook vervliegen of verwaaien. De bedoeling van de toevoeging van het faalscenario genaamd partieel bladworp is om voor al deze situaties een generiek te berekenen methodiek te bepalen die inzicht geeft in de maximale effecten die passend zijn bij deze faalincidenten.

Tabel 7.9 Beoordeling toepassen rekenmethodiek bladworp methodiek B1-A

	Partieel bladworp in derden		Partieel bladworp per meter	
Ontvankelijkheid	De methodiek is vastgelegd in rekenregels en de definities zijn helder.	+	De methodiek is vastgelegd in rekenregels en de definities zijn helder.	+
Validiteit	<p>De methodiek is een verbetering ten opzichte van een rekenmodel zonder partieel bladworp omdat er inzicht kan worden verleend in de mogelijke gevolgen van partiële bladworpen welke ook zichtbaar zijn in de incidenten database.</p> <p>Gegevens over de specifieke locatie van afbreken van het rotorblad zijn veelal niet bekend. De grovere aannames van breuk op een derden zijn gebaseerd op visueel bewijs van incidenten en op aannames over de sterkte van een generiek ontworpen rotorblad.</p>	0	<p>Het rekenmodel resulteert in een groot aantal verschillende bladworpafstanden van verschillende formaten bladdelen. Het geeft daarmee een overzicht van alle situaties die theoretisch kunnen optreden bij het faalscenario partieel bladworp. Vooral de breuk en bladworp van zeer kleine rotorbladdelen op zeer grote afstanden worden niet als faalincident teruggevonden in de incidenten database.</p> <p>De grote werpafstanden die resulteren uit de berekening van een kogelbaanmodel zonder luchtkrachten zijn ook geen goede weergave van de gevolgen in de praktijksituaties waarbij luchtkrachten wel een rol spelen. Het rekenmodel wordt daarmee als niet valide gezien in combinatie met een kogelbaanmodel zonder luchtkrachten</p>	-
Betrouwbaarheid – Herleidbaar	De formules zijn bekend en herleidbaar. Er zijn geen extra gegevens benodigd ten opzichte van het rekenmodel met het uitgangspunt van een volledig rotorblad.	+	De formules zijn bekend en herleidbaar. Er zijn geen extra gegevens benodigd ten opzichte van het rekenmodel met het uitgangspunt van een volledig rotorblad.	+

Betrouwbaarheid – Reproduceerbaar	<p>Het rekenmodel is een uitbreiding van het rekenmodel met volledige bladworp. De rekenregels zijn gelijk en er is geen extra informatie benodigd. Omdat er slechts twee extra scenario's hoeven te worden doorgerekend is de methodiek goed reproduceerbaar.</p>	<p>0</p>	<p>Het rekenmodel is een uitbreiding van het rekenmodel met volledige bladworp. De rekenregels zijn gelijk en er is geen extra informatie benodigd. Omdat er echter een grote hoeveelheid aan scenario's (afhankelijk van de lengte van een rotorblad) dient te worden doorgerekend is de reproduceerbaarheid laag. Bij de bepaling van de trefkansen van objecten of oppervlakten dienen de individuele gevolgen van alle geworpen bladdeelen separaat te worden berekend. De benodigde rekenlast neemt daarmee aanzienlijk toe. Zowel het formaat als het gewicht van elk geworpen bladdeel dient te worden bepaald en te worden berekend.</p>	<p>-</p>
Betrouwbaarheid – Conservatief	<p>De methodiek gaat uit van twee scenario's van partieel breuk op derden van het rotorblad. Hiermee worden grotere werpafstanden als gevolg van kleinere brekende bladdeelen niet beschouwd. Dit is niet een conservatief uitgangspunt. Uit Figuur 6.7 blijkt dat de hoogte van de risico's overeenkomstig is met de uitkomsten van de bepaling van partieel bladbreuk per strekkende meter rotorblad tot aan de maximale effectafstand behorende bij dit scenario.</p>	<p>0</p>	<p>Bij toepassing van partieel bladworp per strekkende meter rotorblad kunnen zeer grote werpafstanden optreden. De risico's worden verspreid over deze grotere effectzone. Omdat de verwachting is dat in de praktijk bladbreuk van grotere partiële bladdeelen waarschijnlijker is wordt er een schijnnaauwkeurigheid geïntroduceerd bij de resultaten van zeer grote werpafstanden van kleine onderdelen. Deze kleinere onderdelen zullen als gevolg van luchtkrachten niet tot dusdanige afstanden worden geworpen.</p>	<p>-</p>
Toepasbaarheid	<p>De methodiek vereist het toepassen van twee extra bladworpfaalscenario's aan de berekening. Dit betekent dat bij trefkansanalyses de trefzones of kritische afstanden van twee extra scenario's dienen te worden doorgerekend. Dit verhoogt de onderzoekslast. Door het beperkt houden van de hoeveelheid scenario's van partieel bladworp blijft een analyse uitvoerbaar en toepasbaar.</p>	<p>-</p>	<p>De rekenmethodiek is toepasbaar voor de bepaling van de risico's per vierkante meter in de omgeving maar wordt complex op het moment dat bij de trefkansanalyses ook het formaat en het gewicht van het geworpen bladdeel een rol gaat spelen. Voor een ondergrondse buisleiding wordt de kritische strook bijvoorbeeld bepaald door een combinatie van het gewicht en de werphoogte van een geworpen bladdeel. Deze kritische strook moet dus bij een 60 meter lang rotorblad voor alle 60 partiële bladdeelen bepaald worden. Dit geldt ook voor eventuele kratervorming bij waterkeringen en/of de trefzones rondom risicovolle installaties. De toepasbaarheid van het toevoegen van een dergelijk groot aantal aan faalscenario's is zeer laag</p>	<p>--</p>

7.3.5 Conclusie bladworp

Op basis van de informatie in deze paragraaf kan geconcludeerd worden dat het hanteren van een bladworpmodel zonder luchtkrachten de meest eenduidige en duidelijke uitkomsten genereert. Ondanks dat het rekenmodel zonder luchtkrachten geen rekening houdt met de effecten van de verschillende krachten die werken op een rotorblad tijdens de worp geeft het een goede indicatie van de mogelijke afstanden tot waar een rotorblad zou kunnen landen in een faalscenario waarbij het rotorblad zonder verlies aan snelheid zou worden geworpen. Het rekening houden met luchtkrachten in de berekeningsmethodiek zorgt ervoor dat het rekenmodel afhankelijk wordt van meerdere variabelen en te kiezen uitgangspunten. De resultaten worden daardoor minder eenduidig, variabel per geografische locatie en meer afhankelijk van de gemaakte keuzes over de uitgangspunten door de specialist die het rekenmodel heeft opgesteld. De reproduceerbaarheid en herleidbaar worden daardoor slechter. Gezien de onzekerheid en onbetrouwbaarheid over ook de uitkomsten van de complexere andere rekenmodellen wordt geadviseerd om de verschillende faalscenario's van bladworp te berekenen met een bladworpmodel zonder luchtkrachten.

Voor het faalscenario waarbij sprake is van partieel bladworp dient te worden bepaald in hoeveel delen het blad geworpen kan worden. Hoe kleiner de mogelijk te werpen bladdelen, hoe groter de rekenlast wordt. Niet alleen veranderen de trefkansen in de omgeving maar ook veranderen per geworpen lengte van een bladdeel de effectzones rondom te raken objecten en de energie waarmee een bladdeel een object of infrastructuur kan raken. Om de berekeningen uitvoerbaar te houden wordt geadviseerd om partieel bladworp op te splitsen in maximaal twee scenario's: Bladworp van $1/3^e$ bladlengte deel en bladworp van $2/3^e$ bladlengte deel. De keuze voor deze opsplitsing lijkt ook overeen te komen met fotobewijs van faalincidenten waarbij een deel van een rotorblad is afgebroken (zie ook paragraaf 4.4). De keuze voor deze bladdelen lijkt ook overeen te komen met het ontwerp van een rotorblad waarbij het eerste deel van een rotorblad nabij het ascentrum ook dikker en steviger uitgevoerd is en steeds dunner (lichter) wordt uitgevoerd richting de tip van een rotorblad. Los van installatiedefecten is een breuk direct na de sterker uitgevoerde delen het meest waarschijnlijk. De foutmarge van het rekenmodel van bladworp zonder luchtkrachten wordt echter wel steeds groter bij hoe kleiner het geworpen bladdeel is, de luchtkrachten die werken op een geworpen bladdeel spelen een grotere rol als het geworpen bladdeel kleiner is. Daarom wordt geadviseerd indien analyse van faalscenario's van bladworp van zeer kleine bladdelen ($<1/3^e$ bladlengte) benodigd is om te werken met een bladworpmodel met luchtkrachten om de totale werpafstanden van kleinere bladdelen niet te overschatten. Aanbevolen wordt om voor de uitwerking van de rekenmethodiek het aantal scenario's van partieel bladbreuk te beperken.

Daarnaast wordt geadviseerd om het faalscenario bladworp bij overtoeren te verwijderen uit de rekenmethodiek. Dit faalscenario van bladworp van een geheel rotorblad op zeer hoge rotatiesnelheden lijkt niet op te treden bij moderne windturbines met individueel pitchende rotorbladen. Het uitgangspunt van dit faalscenario als een situatie van geheel bladworp bij 2x nominaal toerental is niet te herleiden of te onderbouwen vanuit de techniek. In de huidige rekenmethodiek waarbij nog niet gerekend werd met een faalscenario van partieel bladworp gaf het gebruik van dit faalscenario wel inzicht in mogelijke effecten van bladworp die kunnen optreden buiten de nominale werpafstand van een geheel rotorblad waarmee incidenten (van partiele bladdelen) met een grotere werpafstand dan nominaal toerental verklaard konden worden. Indien een faalscenario van partieel bladworp wordt toegevoegd is deze functie van dit faalscenario niet langer nuttig. De trefrisico's en de kans van optreden van het faalscenario bladworp bij overtoeren zijn ook zodanig veel kleiner dan de trefrisico's van het faalscenario partieel bladworp dat voortzetting van dit faalscenario niet als nuttige toevoeging wordt gezien.

8 Onderzoek trefkansbepalingen

8.1 Inleiding

Naast de bepaling van de gevolgen van de verschillende faalscenario's is het belangrijk om een eenduidige rekenmethode aan te geven voor de bepaling van de berekeningen die benodigd zijn voor het raken van specifieke objecten of infrastructuren. In module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid worden meerdere methodieken aangegeven in hoofdstuk 2.5 en hoofdstuk 3 voor personen, objecten en infrastructuren en in hoofdstuk 5 specifiek voor ondergrondse en bovengrondse buisleidingen. De gebruikte formules en aanpak van de berekeningen verschilt enigszins per object.

8.2 Trefkansanalyse versus impactanalyse

De omschreven methodieken beschrijven de algemene trefkans van een object of een oppervlakte. Dit betekent dat elk onderdeel dat fysiek het object kan raken berekend wordt. In sommige gevallen zijn echter de impactlocaties van de zwaartepunten van een onderdeel van belang voor de bepaling of er risico's kunnen optreden aan een object of infrastructuur. Een ondergrondse buisleiding hoeft bijvoorbeeld niet kapot te gaan als de grond boven de buisleiding wordt getroffen. Een impactanalyse laat zien waar de impact van het treffen door het zwaartepunt van een windturbineonderdeel plaatsvindt en berekent de kans dat deze impact dus direct op het te beoordelen object valt.

Uit de praktijk rondom discussies over de externe veiligheid van windturbines blijkt dat niet altijd uit de tekstuele uitleg in module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid duidelijk wordt of er in de berekeningen uitgegaan dient te worden van een trefkansanalyse voor de bepaling van de hoogte van de risico's of dat uitgegaan kan worden van een impactanalyse waarbij enkel naar de impactlocaties van de zwaartepunten van de windturbineonderdelen wordt gekeken. Het verdient aanbeveling om per te beoordelen object of installatie hier duidelijkheid over te verschaffen en om aan te geven in hoeverre berekeningen verschillen tussen een trefkansanalyse en een impactanalyse. Er is per te raken object een advies hiervoor gegeven in paragraaf 8.6.

8.3 Bepaling trefzones bij bladworp rondom objecten / infrastructuren

Bij bladworp spelen de dimensies van het rotorblad en de mogelijke oriëntatie waarin het rotorblad op de grond valt een rol bij het bepalen van de trefkans. Zo is bij het landen van het zwaartepunt van een rotorblad op de rand van een oppervlakte de kans 100% dat het oppervlak ook geraakt wordt maar neemt deze kans af tot 0% op een afstand van $2/3^e$ van de geworpen bladlengte indien het zwaartepunt van het geworpen deel is gelegen op $1/3^e$ afstand van het bladdeel. Tussen deze twee afstanden loopt het risico op. Om inzicht te verlenen in de hoogte van het risico op een bepaalde afstand is in onderstaande grafieken de hoogte van het risico weergegeven van een rotorblad wat valt op afstand X vanaf een object wat is gedimensioneerd als een lijn. Dit verloop is in de praktijk afhankelijk van de relatieve positie van het object ten opzichte van de windturbine, de trefkansverdeling en de dimensies (oppervlak) van het object.

De bepaling van de trefzones¹⁵ voor het faalscenario bladworp kan met behulp van vuistregels worden ingeschat of kan specifiek bepaald worden met formules. Om de verschillen inzichtelijk te maken zijn enkele verschillende vuistregels uitgezet tegenover een specifieke formulebepaling.

Hier een uitleg van elk scenario, met de bijbehorende RMSE¹⁶ ten opzichte van de geometrische formule:

- **Realistisch**

Door middel van goniometrie kan een functie worden gebruikt die de hoek van overlap berekend tussen een plat vallend rotorblad en een dimensieloze lijn. Dit kan vervolgens omgezet worden in een trefkans:

Formule 8.1 Trefkansberekening van geworpen rotorblad t.o.v. dimensieloze lijn.

$$P_{trefken} = \frac{\cos^{-1}\left(\frac{x}{\frac{2}{3} * R}\right) + \cos^{-1}\left(\frac{x}{\frac{1}{3} * R}\right)}{\pi}$$

Met x is de afstand van de landplek van het zwaartepunt tot aan de rand van een rechte lijn.

- **100% trefkans binnen R/3**

Hierbij gaan we er van uit van 100% trefkans voor $x < R/3$, en 0 daarbuiten. De RMSE is 0.050453.

Het grote nadeel van deze methodiek is dat de zone buiten R/3 niet wordt beschouwd en er dus een volledige onderschatting plaatsvindt indien het object direct buiten deze afstand is gelegen tot aan 2/3 R.

- **Gemiddelde binnen 2* R/3**

Het gemiddelde van het realistische scenario voor $0 < x < 2/3 R$. De RMSE is 0.056504.

De afwijking ten opzichte van de formule is het grootst waarmee de trefkans bij landplekken dichtbij het object wordt onderschat en de trefkans bij landplekken ver af van het object wordt overschat.

- **2-stap gemiddelde**

Het gemiddelde in twee stappen: tussen $0 < x < R/3$ en $R/3 < x < 2/3 R$. De RMSE is 0.011352.

Deze methodiek komt qua resultaten een stuk dichtbij de resultaten van de formule en beschouwd alle mogelijke locaties rondom een object. Er kan gekozen worden voor hantering van de gemiddelde trefkans voor deze zones van 73,8% en 21,8%¹⁷ voor R/3 respectievelijk 2/3 R.

- **100%->0% lineair**

Een rechte lijn beginnend op 100% bij $x=0$ en eindigend op 0% bij $x=2/3 R$. De RMSE is 0.002221.

¹⁵ NB: Voor bijzonder gedimensioneerde objecten kan de versimpeling zorgen voor een onderschatting van de resultaten. Denk bijvoorbeeld aan een U-vormig gebouw waarbij niet alleen de kortste afstand tot aan het landpunt van het rotorblad een rol speelt maar ook de ligging van het gebouw rondom het landpunt.

¹⁶ RMSE staat voor de fout in de kwadratische afwijking tussen de aangegeven formule en de versimpelde benaderingen. Een lagere waarde sluit beter aan bij de uitkomsten van de complexere formule.

¹⁷ Volgens de formule zijn de gemiddelde trefkans per afstandsmeter ten opzichte van een lijnobject in deze zones: 73.791992% en 21.848531% (74% en 22%)

Een lineaire lijn sluit qua uitkomsten nog beter aan bij de aangegeven formule maar voegt wel een extra complexere berekeningsstap toe voor de bepaling van de trefzones rondom gebouwen. Dit voegt een extra rekenlaag toe aan de modellering wat voor elk te raken object in de omgeving uitgevoerd dient te worden.

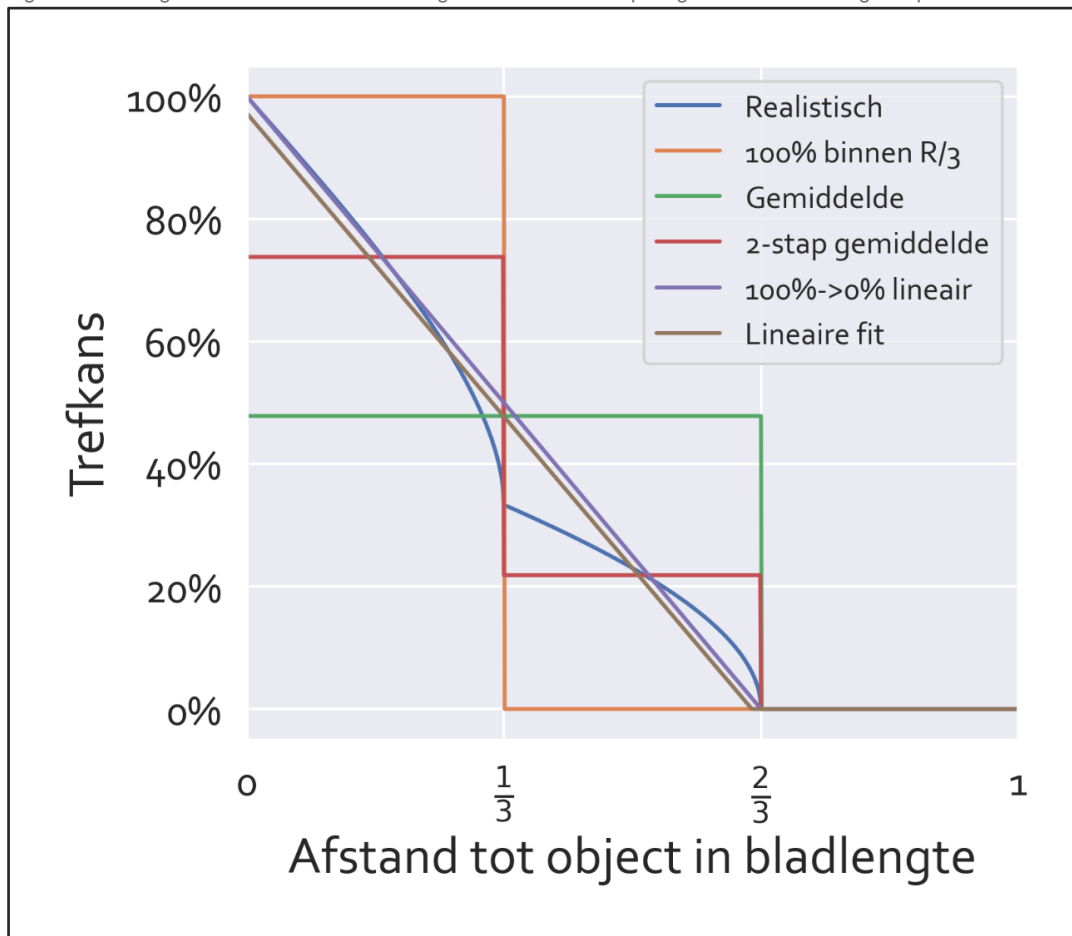
• **Lineaire fit**

Een lineaire fit, dus de best passende rechte lijn. De RMSE is 0.001870.

Een lineaire fit waarbij de lijn niet door de waarde van $y=100\%$ en de waarde van $x=2/3 * R$ snijdt vormt een nog iets betere lineaire voorspelling. De winst is echter minimaal ten opzichte van de $100\% \rightarrow 0\%$ lineaire benadering.

Uitgezet in een grafiek kunnen de benaderingen worden weergegeven zoals in Figuur 8.1. De blauwe lijn is hierbij de mathematisch correcte kansverdeling. Het oppervlak onder de grafiek vermenigvuldigd met de specifieke trefkansverdeling van het zwaartepunt die per vierkante meter berekend is geeft de totale trefkans van de trefzone rondom het object weer. De methodiek passende bij de oranje lijn (100% binnen $R/3$) is de meest versimpelde vuistregel. Het grote nadeel van deze vuistregel is dat een deel van de zone tussen $1/3^e$ en $2/3^e$ bladlengte afstand als nul risico wordt beschouwd wat afhankelijk van de locatie van zowel het object als de windturbine het verschil kan zijn tussen wel of geen berekend trefrisico.

Figuur 8.1 Weergave verschillende benaderingsmethoden voor bepaling trefzone van een geworpen rotorblad



8.3.1 Advies bepaling trefzone

Geadviseerd wordt om enkel voor het faalscenario bladworp de trefkans van een object te benaderen door trefzones vast te stellen met vaste raakkansen per gehele trefzone. Dit betekent dat voor elke vierkante meter rondom het gebouw de trefkans van die vierkante meter kan worden vastgesteld met behulp van een werpmodel waarna de trefkansen worden opgeteld en worden vermenigvuldigd met een vast percentage per zone als reductie die rekening houdt met de landoriëntatie van een rotorblad (2-stap gemiddelde). Dit is een versimpelde methodiek die goed na te rekenen is, alle locaties beschouwd qua trefkansen, en in de buurt komt van complexere benaderingen. Indien een uitgebreid rekenmodel wordt gebruikt wat de exacte trefkansen geografisch kan berekenen gebaseerd op bladoriëntatie dan kan een dergelijk complexer model worden gebruikt. Een dergelijk rekenmodel kan alleen specifiek toegepast worden in een complex GIS-systeem¹⁸ met toepassing van complexere modellering.

8.4 Aanpassingen aan rekenmethodieken - Gevolgberekening / Gevolgschade

8.4.1 Kans op schade bepaling -- beschermingsfactoren

In paragraaf 2.5.3.3 van de huidige module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid staat een formule opgenomen waarmee aan de hand van de verschillende trefkansen van directe inslag (impact van het zwaartepunt van een object) en indirecte inslag de kritische faalfrequentie kan worden berekend. De kritische faalfrequentie is dan de waarde die aangeeft wat de kans is dat er ook daadwerkelijk een bepaalde schade optreedt aan de installatie of het object. Zo kan een opslagtank onder druk bijvoorbeeld sterk genoeg zijn om de impact van een deel van een rotorblad te weerstaan. Ook kan een kwetsbare installatie zich bevinden binnenin een gebouw waarmee indirecte impact de installatie in het gebouw mogelijk niet beschadigt. De toepassing van beschermingsfactoren geeft ruimte om met dergelijke bescherming rekening te houden. Indien het niet mogelijk is een redelijke inschatting te maken van de beschermingsfactoren dient een conservatieve aanpak te worden gehanteerd waarbij de beschermingsfactoren gelijk aan nul worden gesteld.

De aangegeven methodiek in de huidige rekenmethodiek (formule 2.46) is een geschikte manier om de risico's beter inzichtelijk te maken en is een goede aanvulling op de conservatieve benadering van 100% treffen = 100% schade. De verhoudingen en reductie van de kans op schade dient door experts te worden ingeschat op basis van de eigenschappen van de installatie en de windturbineonderdelen.

8.5 Beoordeling methodieken trefkansbepaling

In deze paragraaf worden de verschillende trefkansberekeningen die in het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid Module IV staan omschreven beoordeeld en wordt een eventuele aanpassing omschreven.

8.5.1 Methodiek T1 - Raakfrequentie: Vereenvoudigde aanpak (§ 2.5.3.2 en § 3.1.3)

Mastfalen / Gondelfalen (§ 3.1.3)

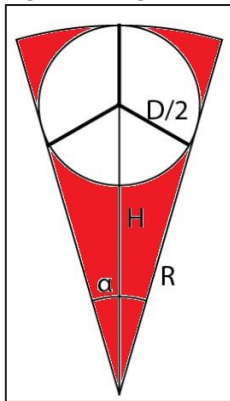
Om de trefkans van een object of terrein te bepalen wordt een formule gebruikt.

¹⁸ Voor simpel gevormde objecten (lijnen / blokken) kunnen berekeningen ook zonder GIS-systeem worden uitgevoerd.

$$P_{object} = FF_{mb} * \frac{1}{2 * \pi} * [\beta + 2 * \frac{\alpha}{2}]$$

Met: β = de hoek van een cirkel van een tifoogteafstand tot aan de fysieke rand van het object en α = de hoek van een cirkelsegment van een liggende windturbine naast het object. Het cirkelsegment is gemodelleerd als volgt:

Figuur 8.2 Segment

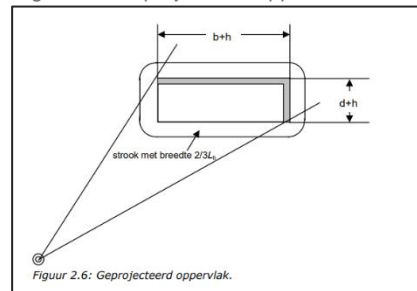


Door het modelleren van de trefkans als cirkelsegment ontstaat een overschatting indien een object zich met een deel van de rand van een gebouw bevindt binnen de rode zone zoals weergegeven in het figuur hiernaast. Ook voor het raken van infrastructuur is een formule (Formule 3.6) opgesteld die gebaseerd is op bovenstaande formule. Deze formule gaat er naast bovenstaande overschatting ook vanuit dat de infrastructuur altijd een rechte lijn is die getrokken wordt door de cirkel die wordt gevormd door de valzone van de windturbine. Dit betekent dat er bij een kromme weg een grote overschatting of onderschatting van de optredende trefkans kan plaatsvinden.

Bladworp (§ 2.5.3.2)

Voor bladworp is de vereenvoudigde aanpak zoals omschreven in formule 2.42 beschikbaar. Hierbij wordt uitgegaan van een oppervlakte die gelijk is aan het oppervlakte van het te beoordelen object. Dit oppervlakte wordt vergroot met een afstand gelijk aan de hoogte van het object aan de achterkant van het object ten opzichte van de aanwezigheid van de windturbine (schaduwhoogte). Vervolgens wordt om dit vergrote oppervlak, waarin er sprake is van 100% treffen door het zwaartepunt van een rotorblad, nog een zone getrokken van 2/3^e bladlengte waarbij er sprake is van indirect treffen als het zwaartepunt van een rotorblad in deze grotere zone valt. Dit is weergegeven in naastgelegen figuur. De trefkans van P_{zwpt} wordt uitgerekend voor deze vlakken en wordt voor beide zones opgeteld. De formules die gebruikt worden geven geen indicatie hoe om moet worden gegaan met niet-rechthoekige objecten. In de tekst wordt aangegeven dat het verloop van de kans op treffen in de strook van 2/3^e bladlengte loopt van 0% naar 100% op de locatie van het gebouw. In het voorbeeld in dit hoofdstuk wordt aangegeven dat de trefkans voor elke x en y van het oppervlak gelijk wordt geacht. Vervolgens wordt met gemiddelde trefkans waarden gerekend in plaats van met de berekende trefkansverdeling per meter uit methodiek B1 (§ 6.3.1) van een kogelbaanmodel. In module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid wordt aangegeven dat de methode niet geschikt is voor 'hele grote objecten'.

Figuur 8.3 Geprojecteerd oppervlak



Beoordeling T1

Tabel 8.1 Beoordeling toepassen rekenmethodiek T1 - Raakfrequentie: Vereenvoudigde aanpak

Ontvankelijkheid	De methodiek is slechts beperkt geschikt voor de uit te voeren berekening en is enkel toegepast op een rechthoekig object. Er wordt geen indicatie gegeven over hoe omgegaan moet worden met afwijkend gevormde objecten en infrastructuren. De methodiek is daarmee niet volledig.	-
Validiteit	De methodiek is niet valide als het gaat om de berekening van de trefkansen voor anders gevormde infrastructuren.	-
Betrouwbaarheid – Herleidbaar	De methodiek is gebaseerd op enkele basis principes van geometrie en ruimtelijke analyses.	0
Betrouwbaarheid – Reproduceerbaar	De methodiek is voor versimpelde situaties goed reproduceerbaar maar er is geen aanpak beschikbaar voor complexere situaties. De methodiek is niet volledig uitgewerkt. Dit betekent in de praktijk dat bij de uitvoering ruimte ontstaat voor interpretatie van de bedoeling van de rekenmethodiek. Verschillende berekeningen kunnen dan leiden tot verschillende resultaten.	-
Betrouwbaarheid – Conservatief	De methodiek is conservatief.	+
Toepasbaarheid	De methodiek is snel toepasbaar als het gaat om eenvoudige situaties. De methodiek is niet toepasbaar als rekenvoorschrift in zijn huidige vorm.	0

8.5.2 Methodiek T2 - Raakfrequentie: algemene aanpak (§ 2.5.3.1)

Mastfalen / Gondelfalen

Voor mastfalen en gondelfalen is de algemene aanpak gelijk aan de vereenvoudigde aanpak zoals omschreven in paragraaf 8.5.1 van dit rapport.

Bladworp

Voor berekening van de trefkans voor bladworp is een uitgebreider model omschreven in § 2.5.3.1 van module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid. Hierin wordt een trefkansmodel van een dak en een gevel omschreven. Hierbij wordt getracht om geometrische situaties te vatten in enkele algemene formules. In de praktijk zal je bij de uit te voeren berekening van de trefkans niet veel hebben aan deze complexe formules. Uiteindelijk gaan de formules om de berekening van de trefkans van geprojecteerde oppervlakten op de grond waarbij er specifiek in deze algemene aanpak voor de verwerking van de hoogte van de objecten gewerkt wordt met twee te berekenen trefkansverdelingen op verschillende 'ashoogten'. Naast de berekening van de trefkans van de gevels van een gebouw wordt er ook nog een berekening gedaan van het dakoppervlak. Alle vlakken en geprojecteerde vlakken optellend wordt er een totale trefkans van een object gegeven. De uit te voeren berekening is reeds uitvoerig voor een blokvorm maar wordt in zijn geheel niet goed toepasbaar voor anders gevormde objecten. De methodiek is zodanig complex dat deze in de praktijk vrijwel nooit wordt gebruikt voor de berekening van de trefkans van objecten.

Beoordeling T2

Tabel 8.2 Beoordeling toepassen rekenmethodiek T2 - Raakfrequentie: Algemene aanpak

Ontvankelijkheid	De methodiek is formule technisch uitgewerkt voor het voorbeeld van een blokvorm. De methodiek geeft niet aan hoe omgegaan moet worden met anders gevormde objecten. Ook wordt niet aangegeven op welke manier rekening moet worden gehouden met de landing van het zwaartepunt naast het object. Er wordt enkel gesteld dat uitgegaan is van een lineair verband maar los van de problematiek bij de formules is dit lineaire verband ook niet	-
-------------------------	---	---

	toepasbaar voor anders gevormde objecten. De methodiek is niet volledig voor toepassing in de praktijk.	
Validiteit	De methode lijkt door de complexe manier van opschrijven een uitgebreide complexe berekening van de verschillende onderdelen van een object (meerdere gevels + dak) maar de berekening is enkel gebaseerd op het raken van oppervlakten of het raken van geprojecteerde oppervlakten. De berekening houdt geen rekening met de daadwerkelijke vlucht die een rotorblad aflegt in de lucht. De complexiteit van de berekening suggereert dat er een complexe berekeningsmethodiek uitgewerkt kan worden. De methodiek is onnodig complex omschreven maar is inhoudelijk gezien geen verbetering van de vereenvoudigde methodiek. Voor de verwerking van hoogteverschillen dienen meerdere trefkansverdelingen van bladworp vanaf verschillende ashoogte te worden berekend. Het is de vraag of dit een valide methodiek is om een hoogte effect weer te geven.	-
Betrouwbaarheid – Herleidbaar	De berekening is gebaseerd op basissystemen van de geometrie en is daaruit herleidbaar. Als inputgegevens zijn meerdere trefkansverdeling van bladworp op verschillende ashoogten benodigd.	0
Betrouwbaarheid – Reproduceerbaar	De methodiek is reproduceerbaar voor blokvormige objecten. Voor andersgevoormde objecten dienen nadere aannames te worden gemaakt. Zo wordt niet duidelijk hoe met Pzwpt dient te worden gerekend. In de formules wordt uitgegaan van een constante waarde wat een grote onbetrouwbaarheid introduceert. Tevens wordt niet aangegeven hoe omgegaan moet worden met de trefkans indien het object zich net binnen de maximale effectafstand van bladworp bevindt waardoor delen van het oppervlakte niet getroffen kunnen worden.	-
Betrouwbaarheid – Conservatief	Door de opsplitsing in verschillende raakvlakken is de methodiek iets specifiekier als de vereenvoudigde aanpakken. De methodiek is zowel conservatief als niet-conservatief te gebruiken afhankelijk van hoe Ph wordt gedefinieerd en hoe Pzwpt(x,y) wordt berekend. In de berekening wordt Pzwpt(x*,y*) constant geacht wat in de praktijk zowel een grove overschatting als grove onderschatting kan betekenen. Gezien de onvolledigheid is niet eenduidig te zeggen of de uitkomsten conservatief zijn.	-
Toepasbaarheid	De toepasbaarheid van de methodiek is laag. Het rekenmodel omschrijft een complexe berekening voor een dakvlak en een gevelvlak terwijl in de praktijk objecten vaak anders vormig zijn als een kubus. Tevens benodigd het toepassen van meerdere ashoogten om de trefkansen op hoogte te berekenen voor een vergroting van het aantal keren dat het meest complexe deel van de berekening opnieuw moet worden uitgevoerd.	-

8.5.3 Methodiek T1-A – Voorstel vereenvoudigde aanpak – met aanpassing voor uniformiteit en reductie van complexiteit

De verschillende weergegeven rekenmethodieken voor het bepalen van trefkansen zijn allen berekeningen die zijn te herleiden tot het optellen van de trefkans van een oppervlakte als gevolg van ofwel mastfalen en gondelfalen en anderzijds bladworp. Afhankelijk van of het object ook schade kan ondervinden van indirect treffen wordt er een raakzone rondom het object getrokken waar de trefkans berekend wordt. In de vereenvoudigde aanpak (T1) wordt deze aanpak sterk versimpeld en in de algemene aanpak (T2) wordt getracht een 3D-object te projecteren naar meerdere individueel te beoordelen oppervlakten. Voor zowel aanpak T1 als T2 geldt dat deze enkel formule technisch is uitgewerkt voor een blokvormig object.

Om rekening te houden met anders gevormde objecten wordt een voorstel gedaan om de rekenmethodiek niet formule-technisch te omschrijven voor een blokform maar in plaats daarvan een stappenplan te

introduceren waardoor wel gerekend kan worden aan alle anders gevormde objecten. Dit vereist twee noodzakelijke inputgegevens van de uitvoerder van het onderzoek:

- Een geografische laag met daarin de te beoordelen oppervlakten van de objecten of infrastructuren inclusief een eventuele hoogte aanduiding van het object.
- De trefkansverdeling van bladworp van het te beoordelen windturbintype ($P_{ZWPT}(x,y)$) geografisch geprojecteerd als een cirkel rondom de windturbine. Deze trefkansverdeling is het gevolg van het uitvoeren van de berekeningen uit de rekenmethodiek zoals omschreven in paragraaf 7.3.

Voor de uitvoering dient gebruik te worden gemaakt van een Geografisch Informatie Systeem (GIS) of andersoortige systeem wat de oppervlakten van objecten kan relateren aan de trefkansverdeling rondom de windturbine. Dit voorstel voor een vereenvoudigde berekening kan toegepast worden op alle vormen van objecten en infrastructuren. Er is dan geen behoefte meer aan separate methodieken voor berekeningen voor daken, gevels, infrastructuren en/of waterkeringen omdat alle vormige objecten herleid kunnen worden tot dezelfde vereenvoudigde aanpak gebaseerd op de oppervlakten, geprojecteerde oppervlakten (hoogte) en raakzones rondom bij indirect treffen. De methodiek gaat uit van één basisvergelijking:

$$P_{Area} = \int_{Area} P_{ZWPT}(x,y) dArea$$

Het grote verschil met bovenstaande uitwerkingen is dat het oppervlakte van *Area* vooraf wordt bepaald in een GIS aan de hand van de werkelijke vorm van het oppervlakte van een object + een eventuele schaduwhoogte bij bladworp + een eventuele raakzone voor indirect treffen. Een voorstel voor de uitvoering van de methodiek is in onderstaande paragrafen omschreven per faalscenario aan de hand van enkele visuele voorbeelden.

Mastfalen

Voor de bepaling van de trefkans bij mastfalen kan een trefzone worden aangebracht rondom het object. Het formaat van deze trefzone is 0,5 x rotordiameter bij indirect treffen en zwaartepuntsafstand rotorblad (Z_p) (of 1/6x rotordiameter) voor direct treffen door het zwaartepunt van het meevallende rotorblad. Indien benodigd kan direct treffen door het gondelgewicht berekend worden door de trefzone op 0 meter te stellen en dus enkel te rekenen met het oppervlakte van het object. Dit komt neer op:

- Trefzone indirect treffen rotorblad = 0,5 x rotordiameter;
- Trefzone direct treffen bladgewicht = Zwaartepuntsafstand rotorblad of 1/6 x rotordiameter;
- Trefzone direct treffen gondel (en mast) gewicht = 0m.

Om de trefkans te bepalen wordt een schijf als cirkel met een ashoogte afstand (H) getrokken rondom de windturbine. De hoek in radialen tussen de cirkel en het geprojecteerde oppervlak van het object is R_H . Dit is vergelijkbaar aan formule 3.7 uit module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid waarbij het deel van de formule '(2*(a/2))' echter al verwerkt is in het te beoordelen oppervlak *Area*. De trefkans bij mastfalen wordt dan:

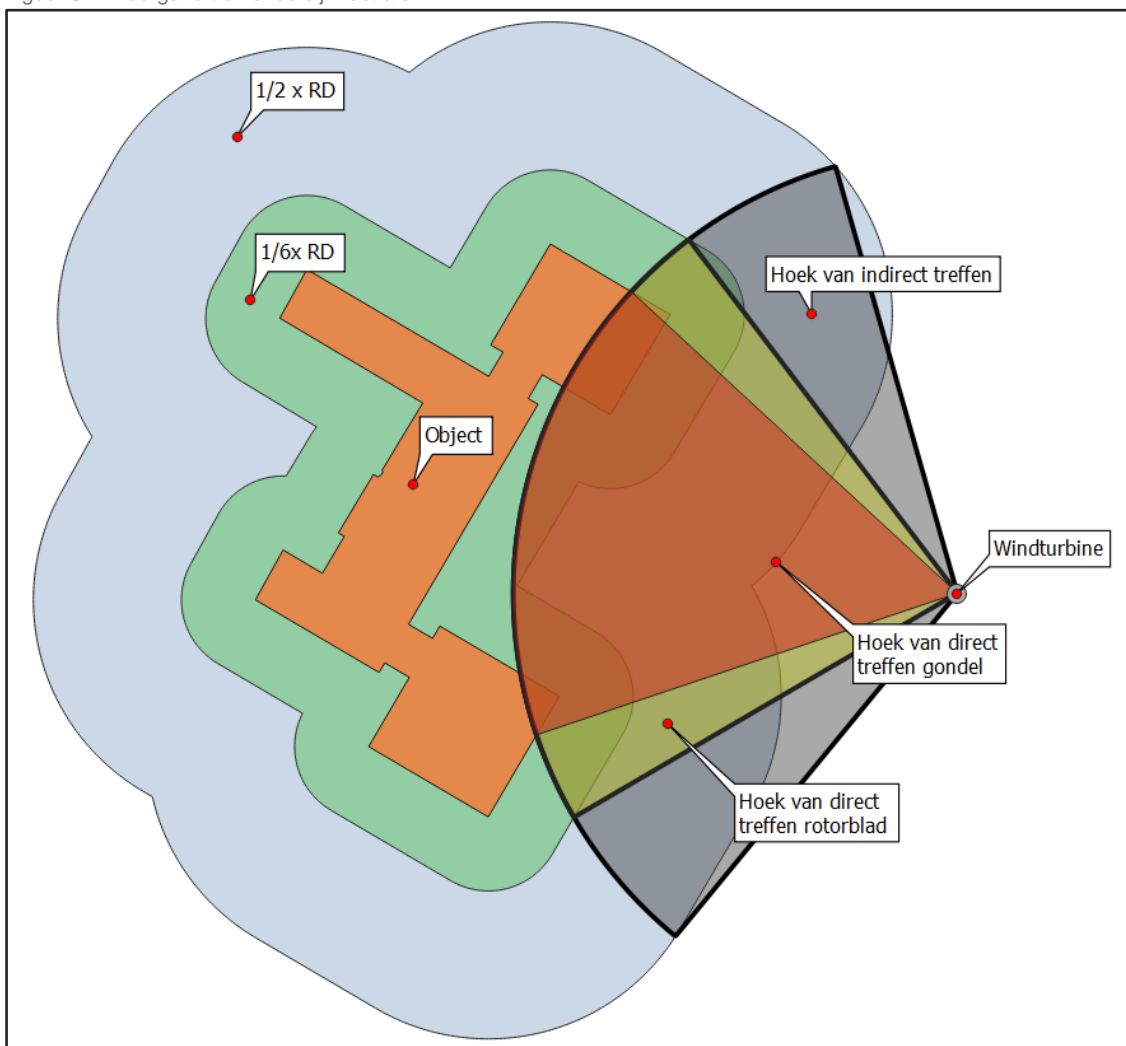
$$PO_{mb} = FF_{mb} * \frac{1}{2 * \pi} * R_H$$

Met: PO_{mb} = Trefkans bij mastfalen, FF_{mb} = faalfrequentie mastfalen en R_H = hoek van overlap in radialen op afstand ashoogte (H).

PO_{mb} kan berekend worden voor zowel:

- indirect treffen $PO_{mb,i}$
- direct treffen door bladgewicht $PO_{mb,b}$
- direct treffen door gondelgewicht $PO_{mb,g}$
- of mastgewicht $PO_{mb,m}$

Figuur 8.4 Weergave trefzones bij mastfalen



Gondelfalen

Voor gondelfalen worden de trefzones rondom het object op gelijke manier bepaald als voor mastfalen.

Dus:

- Trefzone indirect treffen rotorblad = $0,5 \times$ rotordiameter
- Trefzone direct treffen bladgewicht = Zwaartepuntsafstand rotorblad of $1/6 \times$ rotordiameter
- Trefzone direct treffen gondelgewicht = $0m$;

De cirkel waarbinnen de gondel valt kan worden bepaald op een afstand van een '0,5 * maximale gondeldimensie ($L_{max,gondel}$) + 0,5 * halve mastbreedte (d_{mast})' in plaats van een cirkel op ashoogte. De hoek in radialen tussen de cirkel en het geprojecteerde oppervlak van het object is R_{gf} .

De trefkans bij gondelfalen wordt dan:

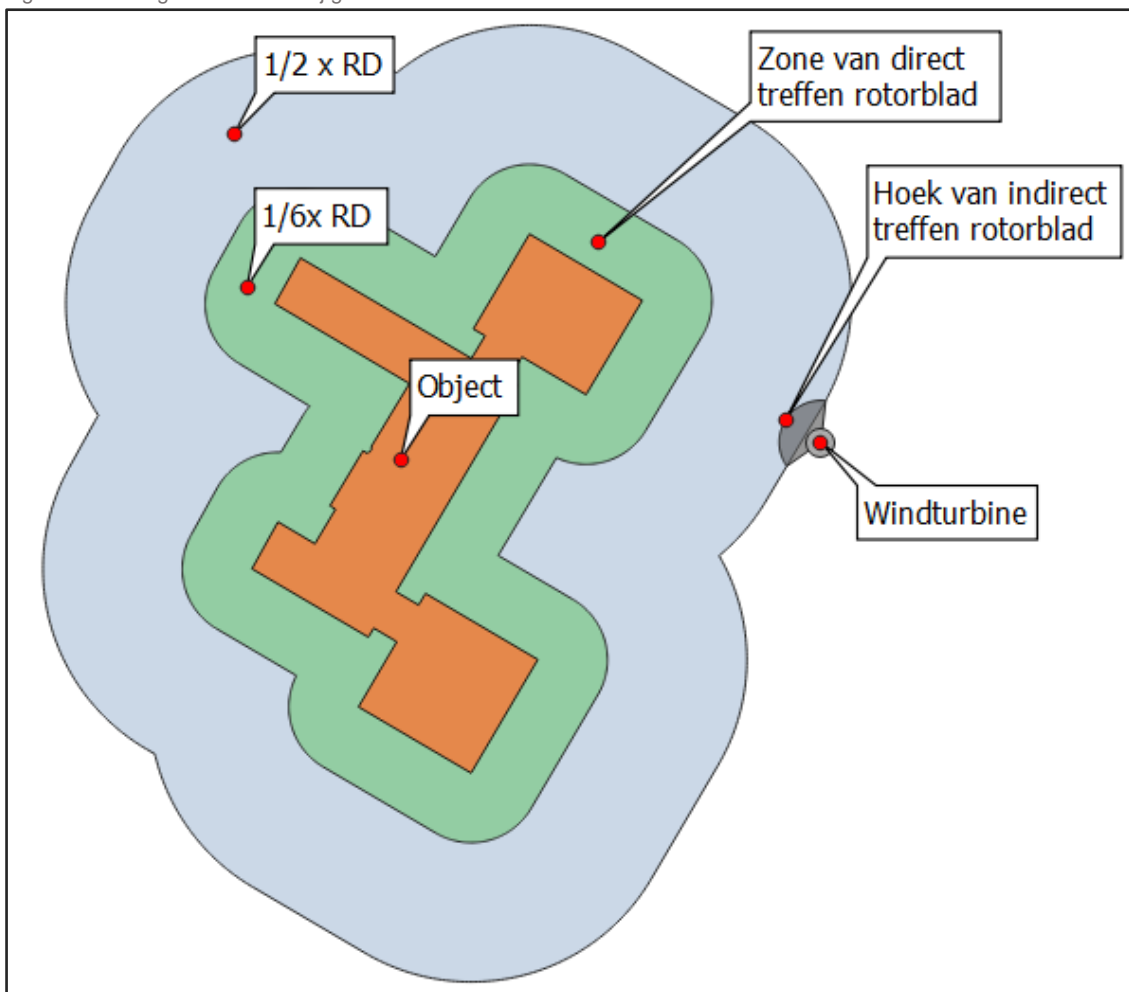
$$PO_{gf} = FF_{gf} * \frac{1}{2 * \pi} * R_{gf}$$

Met: PO_{gf} = Trefkans bij gondelfalen, FF_{gf} = faalfrequentie gondelfalen en R_{gf} = hoek van overlap in radialen op afstand $L_{max,gondel}$.

PO_{gf} kan berekend worden voor zowel:

- indirect treffen $PO_{gf,i}$
- direct treffen door bladgewicht $PO_{gf,b}$
- of direct treffen door gondelgewicht $PO_{gf,g}$

Figuur 8.5 Weergave trefzones bij gondelfalen en hubfalen



Hubfalen

Voor hubfalen geldt een gelijke aanpak als voor gondelfalen.

Dus voor de trefzones rondom het object geldt:

- Trefzone indirect treffen = 0,5 x rotordiameter
- Trefzone direct treffen bladgewicht = Zwaartepuntsafstand rotorblad of 1/6 x rotordiameter
- Trefzone direct treffen hubgewicht = 0m

De cirkel waarbinnen de hub valt kan worden bepaald op een afstand van een '0,5 * maximale gondeldimensie ($L_{max,gondel}$) + 0,5 * halve mastbreedte (d_{mast})' gelijk aan gondelfalen. De hoek in radialen tussen de cirkel en het geprojecteerde oppervlak van het object is R_{hf} .

De trefkans bij hubfalen wordt dan:

$$PO_{hf} = FF_{hf} * \frac{1}{2 * \pi} * R_h$$

Met: PO_{hf} = Trefkans bij hubfalen, FF_{hf} = faalfrequentie hubfalen en R_h = hoek van overlap in radialen op afstand $L_{max,gondel}$.

PO_{hf} kan berekend worden voor zowel:

- indirect treffen $P_{hf,i}$
- direct treffen door bladgewicht $P_{hf,b}$
- of direct treffen door hubgewicht $P_{hf,h}$

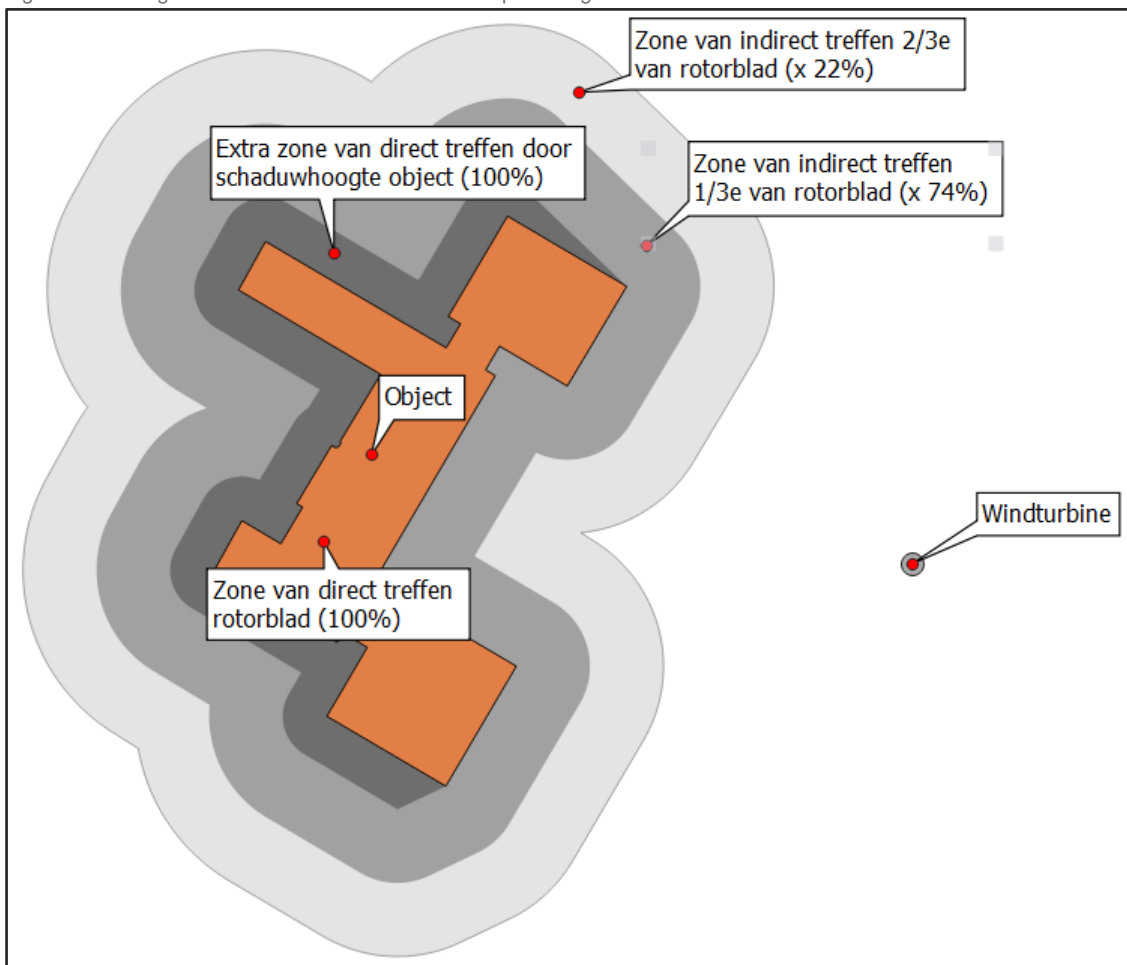
Voor een visuele weergave zie Figuur 8.5

Bladworp

Voor het faalscenario bladworp is de verdeling van de trefkansen van het zwaartepunt van een rotorblad in een cirkel rondom de windturbine benodigd. Deze kansverdeling $P_{ZWP}(x, y)$ is de uitkomst van de berekeningen uit de toegepaste rekenmethodiek zoals omschreven in paragraaf 7.3. Voor bladworp is het van belang dat er rekening dient te worden gehouden met de hoogte van een object omdat het rotorblad een boog aflegt door de lucht en daarmee dus ook de hoogte van een object kan treffen terwijl het zwaartepunt achter het object wel op een grotere afstand dan 2/3^e bladlengte land. Dit effect kan ingeschat worden door rekening te houden met een extra oppervlak te bepalen achter het object ten opzichte van de locatie van de windturbine met een breedte gelijk aan de hoogte van het object. Dit is vergelijkbaar met de methodiek van formule 2.39 en Figuur 2.6 uit module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid¹⁹. Vervolgens wordt rondom dit geprojecteerde oppervlakte inclusief schaduwhoogte een trefzone getrokken waarbinnen sprake kan zijn van indirect treffen. In onderstaand figuur is weergegeven hoe deze schaduwhoogte bepaald kan worden.

¹⁹ NB. De schaduwhoogte kan ook exact worden bepaald waarbij de lengte van de 'schaduwafstand' bepaald wordt door de hoek die het object maakt in vergelijking met de windturbine. Een standaardbuffer met een breedte gelijk aan de hoogte van het object is een versimpeling van het projecteerde oppervlak.

Figuur 8.6 Weergave zones van treffen door bladworp volledig rotorblad

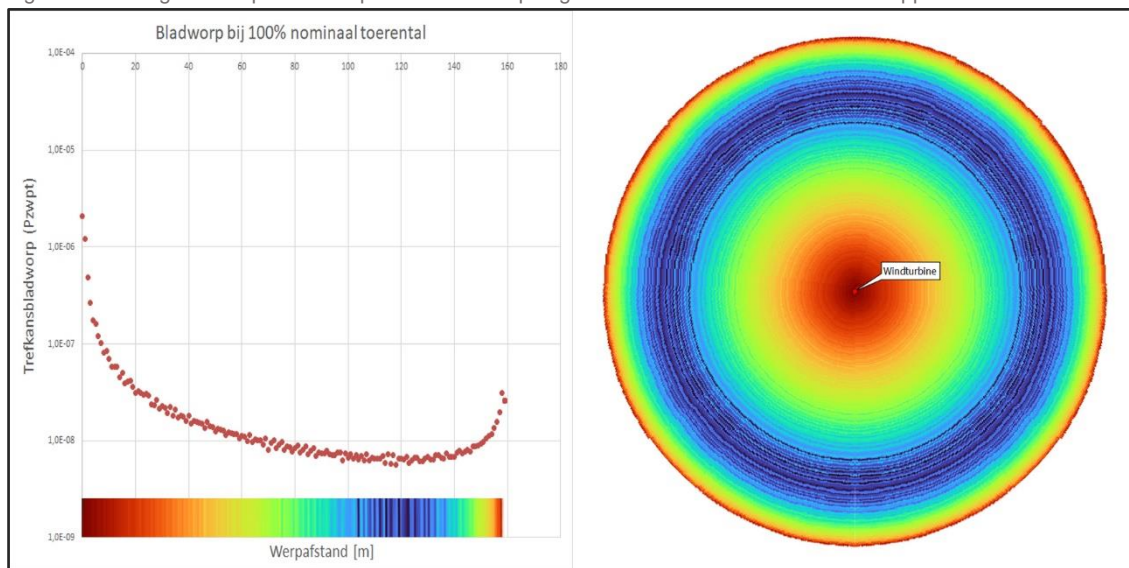


Voor dit faalscenario is ook relevant dat de oriëntatie van de landing van het rotorblad een rol speelt in de beoordeling. In paragraaf 8.3 van deze rapportage is inzicht gegeven op welke manieren de oriëntatie van het neerkomen van een rotorblad ingeschat kan worden voor een dimensieloos punt. Voor de uitwerking van het voorbeeld hieronder wordt uitgegaan van trefzones van 1/3^e en 2/3^e bladlengte met een potentiële trefkans van 74% en 22%. Deze uitwerking kan aangepast worden indien een andere keuze voor de trefkansbepaling van de trefzones worden gehanteerd uit paragraaf 8.5.

Voor bladworp wordt een sommatie gedaan van alle optredende P_{zwpt} waarden²⁰ voor alle x,y punten binnen het te beoordelen oppervlak. Deze trefkansen worden verkregen uit de berekeningen voor het faalscenario bladworp. Visueel kan dat zowel in een grafiek worden uitgezet zoals het figuur aan de linkerkant als over een cirkeloppervlak weergegeven zoals aan de rechterkant op de volgende pagina.

²⁰ Indien de exacte kansverdeling niet per m² beschikbaar is kan een gemiddelde waarde genomen worden van de kans op een werpafstand voor de minimale en maximale afstand tot aan het object. Voor afstanden buiten de maximale werpafstand van het zwaartepunt is de trefkans nul. Dit effect is reeds verrekend in de bepaling van het te beoordelen oppervlakte.

Figuur 8.7 Weergave Pzwpt – Kans op treffen bladworp in grafiek vorm en bovenaanzicht als oppervlakte.



Hierbij kan uitgegaan worden van de volgende trefzones (zie Figuur 8.6):

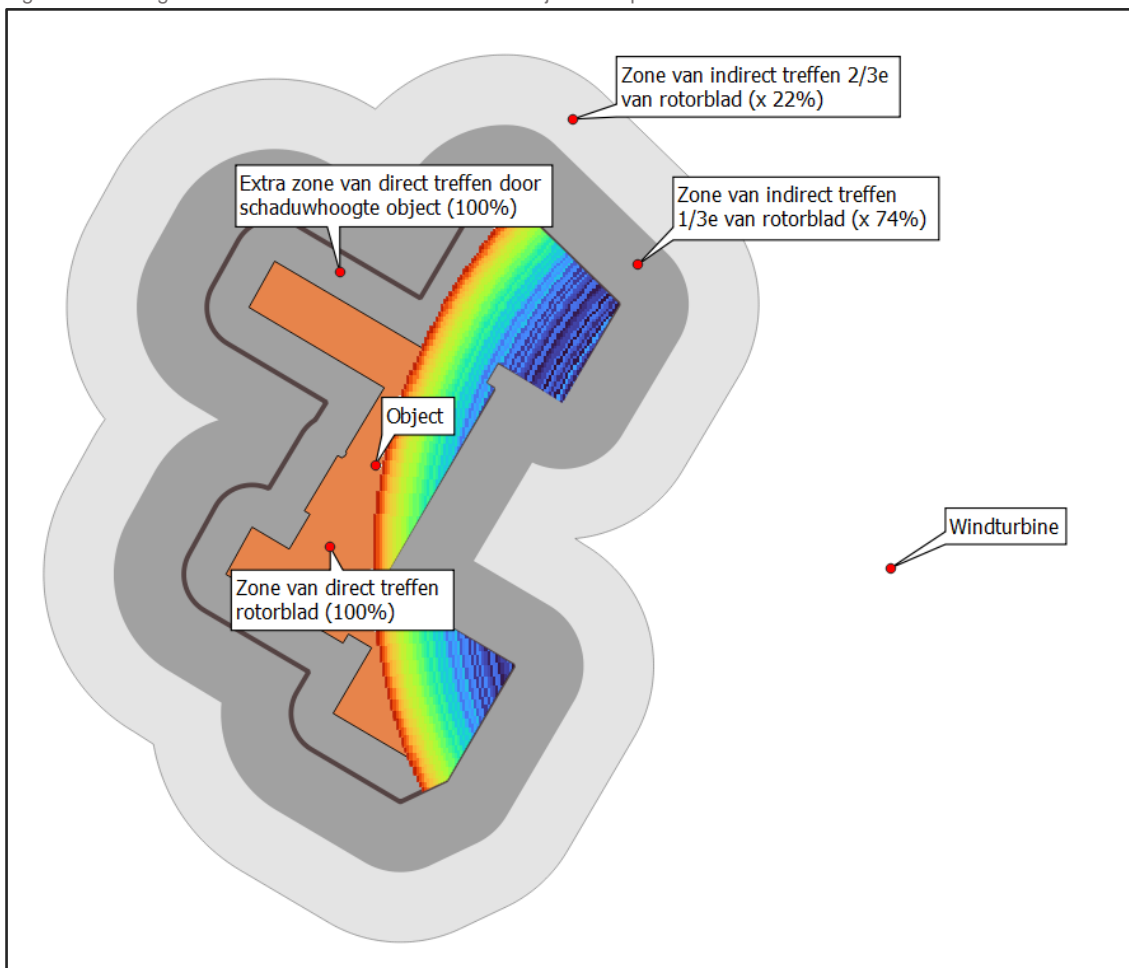
- Trefzone A indirect treffen rotorblad = 2x zwaartepuntsafstand rotorblad of 2/6x rotordiameter met een trefkans van $22\% \cdot \sum P_{zwpt}(x,y)$
- Trefzone B indirect treffen rotorblad = 1x Zwaartepuntsafstand rotorblad of 1/6 x rotordiameter met een trefkans van $74\% \cdot \sum P_{zwpt}(x,y)$
- Trefzone C direct treffen bladgewicht = 0m met een trefkans van $100\% \cdot \sum P_{zwpt}(x,y)$

De totale trefkans door direct treffen is gelijk aan Trefzone C (zie Figuur 8.8)

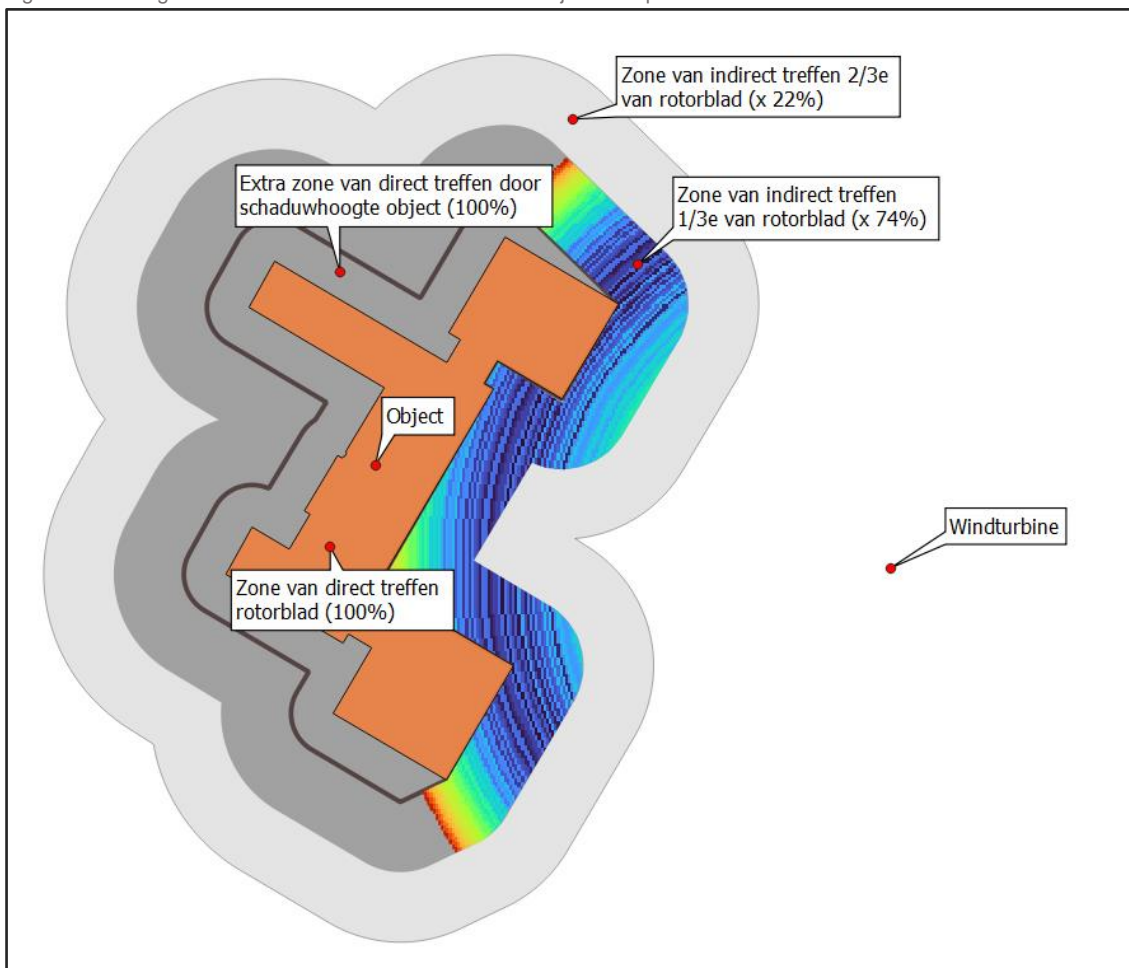
De totale trefkans door indirect treffen is een sommatie van Trefzone A (zie Figuur 8.9) + Trefzone B (zie Figuur 8.10).

In onderstaande figuren is de trefkansverdeling van bladworp weergegeven in kleuren.

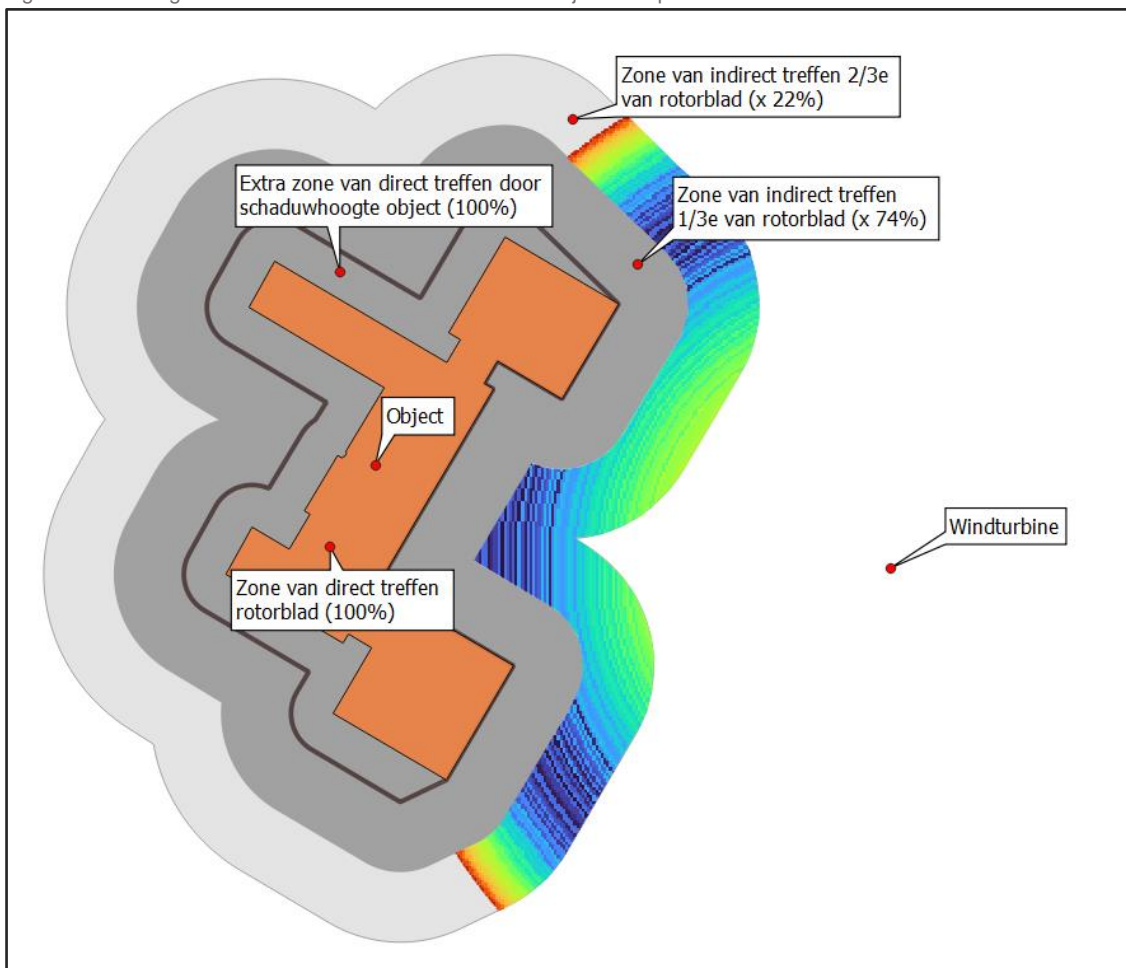
Figuur 8.8 Weergave trefzone C direct treffen rotorblad bij bladworp



Figuur 8.9 Weergave trefzone B indirect treffen rotorblad bij bladworp



Figuur 8.10 Weergave trefzone A indirect treffen rotorblad bij bladworp



Alternatief kan als grovere inschatting ook een gemiddelde trefkans per vierkante meter worden bepaald welke wordt vermenigvuldigd met de oppervlakten van de verschillende zones. Het is dan wel belangrijk dat de oppervlakte enkel wordt meegeteld tot aan de cirkel van maximale werpafstand.

Partieel bladworp

Partieel bladworp gaat op een gelijke manier als gewoon bladworp. De te bepalen trefzones rondom het object zijn echter afhankelijk van het formaat van het geworpen bladdeel. Hiervoor kunnen bijvoorbeeld de bepalingen van het formaat van bladdelen uit Figuur 6.6 uit dit rapport opnieuw gebruikt worden.

Voor het faalscenario partieel bladworp is de verdeling van de trefkansen van het zwaartepunt van een partieel rotorblad in een cirkel rondom de windturbine benodigd. Deze kansverdeling $P_{ZWPT}(x, y)$ is de uitkomst van de berekeningen uit de toegepaste rekenmethodiek zoals omschreven in paragraaf 7.3 maar dan uitgevoerd voor partiële bladworpdelen. Ook voor partieel bladworp is het van belang dat er rekening dient te worden gehouden met de hoogte van een object. Dit effect kan ingeschat worden door rekening te houden met een extra oppervlak te bepalen achter het object ten opzichte van de locatie van de windturbine met een breedte gelijk aan de hoogte van het object. Dit is vergelijkbaar met de methodiek

van formule 2.39 en Figuur 2.6 uit module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid²¹. Vervolgens wordt rondom dit geprojecteerde oppervlakte inclusief schaduwhoogte een trefzone getrokken waarbinnen sprake kan zijn van indirect treffen. In Figuur 8.6 is weergegeven hoe deze schaduwhoogte bepaald kan worden.

Voor dit faalscenario is ook de oriëntatie van de landing van het rotorblad relevant. Ook hier kan de trefkans van de trefzones bepaald worden voor $1/3^e$ en $2/3^e$ bladlengte van het geworpen bladdeel met een potentiële trefkans van 74% en 22%²². Deze uitwerking kan aangepast worden indien een andere keuze voor de trefkansbepaling van de trefzones worden gehanteerd uit paragraaf 8.5.

Voor partieel bladworp wordt een sommatie gedaan van alle optredende Pzwpt waarden voor alle x,y punten binnen het te beoordelen oppervlak per partieel bladworpsscenario²³. Hierbij kan uitgegaan worden van de volgende trefzones:

- Trefzone A = 2x zwaartepuntsafstand partieel rotorblad of $2/3x$ lengte partieel blad voor indirect treffen bladgewicht met een trefkans van $22\% * \sum Pzwpt(x,y)$
- Trefzone B = 1x Zwaartepuntsafstand partieel rotorblad of $1/3 x$ lengte partieel blad voor indirect treffen bladgewicht met een trefkans van $74\% * \sum Pzwpt(x,y)$
- Trefzone C = 0m voor direct treffen bladgewicht met een trefkans van $100\% \sum Pzwpt(x,y)$

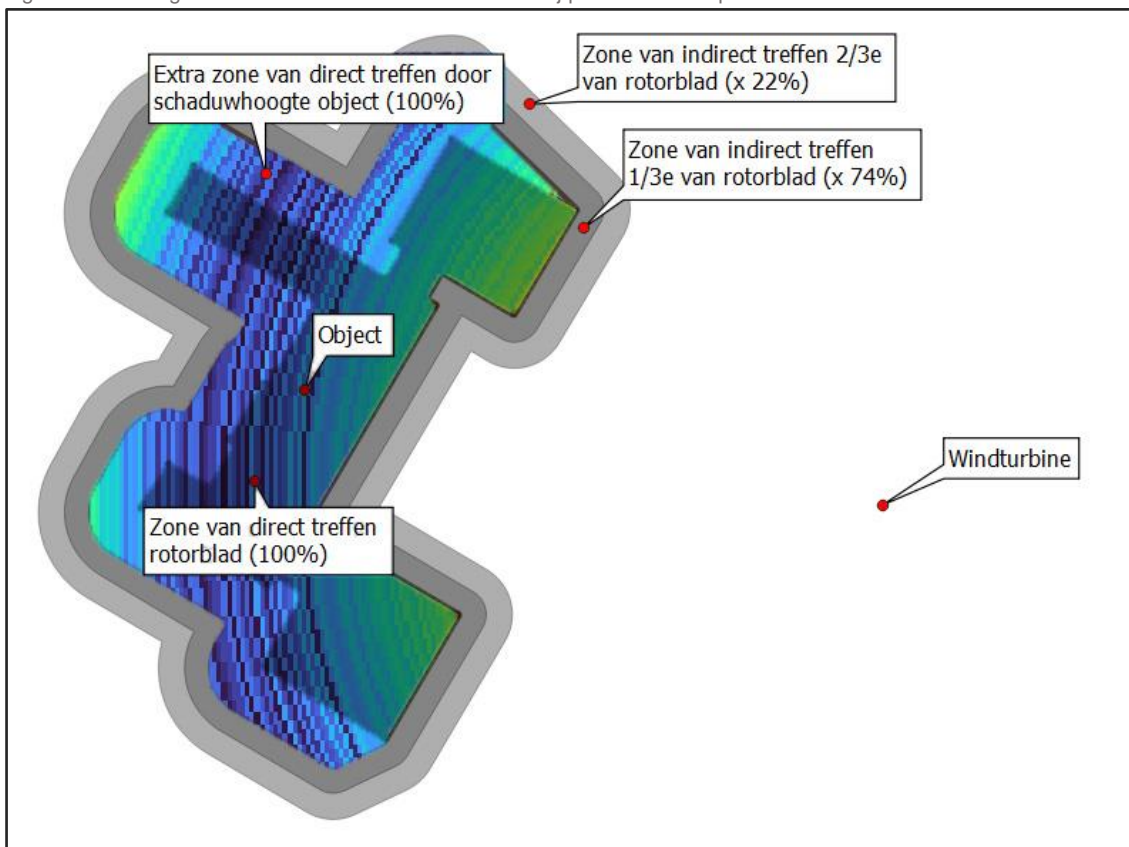
De totale trefkans door indirect treffen is een sommatie van Trefzone A + Trefzone B. Het gewicht van het partiele blad is lager. Als conservatief uitgangspunt voor de bepaling van het gewicht van het partiele rotorblad kan het volledige rotorblad worden vermenigvuldigd met de verhouding tussen de lengte van het partieel geworpen rotorblad en een halve rotordiameter.

²¹ NB. De schaduwhoogte kan ook exact worden bepaald waarbij de lengte van de 'schaduwafstand' bepaald wordt door de hoek die het object maakt in vergelijking met de windturbine. Een standaardbuffer met een breedte gelijk aan de hoogte van het object is een versimpeling van het projecteerde oppervlak.

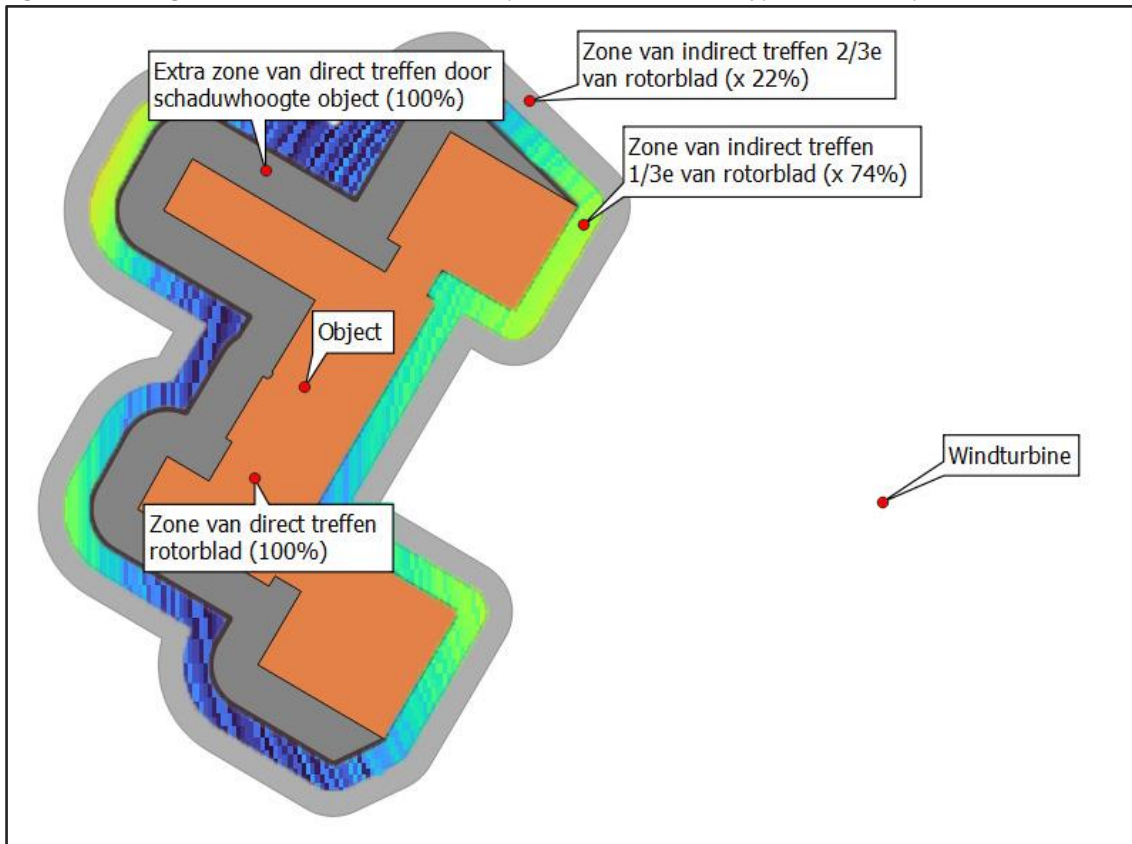
²² Dit gaat er dus vanuit dat de geworpen bladdelen ondanks de partiele bladbreuk nog steeds een driehoekige vorm hebben waardoor het zwaartepunt rond $1/3^e$ bladdeelafstand zal liggen.

²³ Als het rotorblad wordt opgesplitst in twee te werpen bladdeelsecties als faalscenario's dan dienen deze zones dus 2 maal bepaald te worden.

Figuur 8.11 Weergave trefzone C direct treffen rotorblad bij partieel bladworp



Figuur 8.12 Weergave trefzone B indirect treffen tot op afstand 1/3° rotorblad bij partieel bladworp



Figuur 8.13 Weergave trefzone A indirect treffen tot op afstand 2/3e rotorblad bij partieel bladworp



Beoordeling

Tabel 8.3 Beoordeling toepassen rekenmethodiek T1-A - Raakfrequentie: Vereenvoudigde aanpak

Ontvankelijkheid	De opgestelde methode is eenduidig en volledig. Dit maakt hem toepasbaar op een veelvoud aan situaties. De berekening is daarmee consistent en toepasbaar. Als nadeel is voor de uitvoerbaarheid wel enige kennis van het gebruik van een geografisch informatie systeem (GIS) benodigd. Een dergelijk systeem wordt reeds actief gebruikt bij Milieudiensten en omgevingsdiensten, bevoegde gezagen, adviesbureaus en andere kennisinstellingen. Er zijn openbare softwarepakketten beschikbaar met voldoende functionaliteit waarmee ook een niet-professionele gebruiker tot een berekende uitkomst kan komen.	0
Validiteit	De methodiek T1-A is een verbeterde methodiek die duidelijker omschrijft hoe omgegaan moet worden met complex gevormde objecten. De methodiek is ook sterk versimpeld door de geometrie van het te raken object niet te omschrijven in algemene formules, er ontstaat daarmee geen schijnnaauwkeurigheid.	+
Betrouwbaarheid – Herleidbaar	De methodiek is gebaseerd op herleidbare geometrische principes. De benodigde inputgegevens zijn openbaar en beschikbaar in bijvoorbeeld het BAG ²⁴ en het AHN ²⁴ .	0
Betrouwbaarheid – Reproduceerbaar	Bij gebruik van een gelijke trefkansverdeling voor bladworp is het niet mogelijk om tot andere uitkomsten te komen zonder fouten te maken ten opzichte van het voorgestelde stappenplan. Alle uitgangspunten zijn helder geformuleerd	+

²⁴ Basisregistratie Adressen en Gebouwen (BAG) en Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN)

	en eenduidig. Om de resultaten te kunnen reproduceren is wel enige kennis van een geografisch informatie systeem benodigd.	
Betrouwbaarheid – Conservatief	Daar waar complexe zaken vereenvoudigd zijn is gekozen voor een conservatieve aanpak. Zo wordt de schaduwhoogte bepaald op een vaste afstand en kan de trefkansverdeling specifiek per m ² gebruikt worden. Op bepaalde punten is de aanpak minder conservatief dan de huidige aanpak omdat er minder onzekerheid bestaat over de uitkomsten van methodiek T1-A.	0
Toepasbaarheid	De methodiek T1-A is beter uitlegbaar dan de huidige methodiek. De techniek is daardoor passend voor een groot aantal te beoordelen objecten en situaties. De methodiek is daarmee ook meer geschikt om in de toekomst in een openbaar rekenmodel aan te bieden. Zo zou een online generator van kansdichtheidsverdelingen kunnen worden ontworpen waardoor het meest complexe deel van de rekenmethodiek voor iedereen toegankelijk is.	+

8.6 Verschillende type objecten en infrastructuren

8.6.1 Gebouwen en objecten, hoogspanningslijnen, bovengrondse buisleidingen, risicovolle installaties

Voor beperkt kwetsbare en kwetsbare objecten vindt toetsing plaats aan de ligging van de plaatsgebonden risicocontouren. Een nadere trefkansanalyse per gebouw is niet benodigd.

Overige bovengrondse gebouwen en objecten kunnen schade ondervinden als gevolg van indirect treffen. Van indirect treffen is sprake als het zwaartepunt van een windturbineonderdeel het gebouw niet raakt maar een ander deel van het vallende object het gebouw wel raakt. Conservatief kan uitgegaan worden van indirect treffen = 100% kans op schade.

Indirect treffen

Voor gondelfalen, hubfalen en mastfalen wordt een zone genomen van een halve rotordiameter rondom de rand van het object. Voor mastfalen bepaalt men dan de hoek waarmee deze zone overlapt met een ashoogteafstand waar de gondel zal landen. Voor gondelfalen bepaalt men dan de hoek waarmee deze zone overlapt met een afstand van de maximale gondeldimensie plus een halve mastbreedte. De gevonden hoeken worden gedeeld door 360 graden om de kans op de valrichting met een kans op treffen te bepalen.

Voor bladworp wordt het object vergroot met een afstand gelijk aan de hoogte van het object georiënteerd vanaf de windturbine (schaduwhoogte). Vervolgens wordt rondom deze nieuwe zone een afstand van een derde halve rotordiameter en twee derde halve rotordiameter getrokken om de trefzones te bepalen. De trefkansen van bladworp ($P_{z_{wpt}}$) binnen deze zones mogen worden vermenigvuldigd met respectievelijk 100% voor de oppervlakte van het gebouw zelf plus de schaduwhoogte zone, 74% voor de zone van $1/3^e$ van een halve rotordiameter en 22% voor de zone van $2/3^e$ van een halve rotordiameter²⁵. De totale trefkans wordt gevonden door de waarden van alle zones inclusief correctiefactoren cumulatief op te tellen.

Zie de visuele voorbeelden in paragraaf 8.5.3.

Direct treffen

Voor gondelfalen en mastfalen wordt een gelijke methodiek toegepast als voor indirect treffen maar de zone rondom het gebouw wordt verkleind van een halve rotordiameter tot $1/3x$ een halve rotordiameter om enkel treffen door het zwaartepunt te berekenen.

Voor bladworp wordt enkel de trefkans van het zwaartepunt van een geworpen rotorblad voor de oppervlakte van het gebouw zelf plus de zone van de schaduwhoogte berekend.

Zie de visuele voorbeelden in paragraaf 8.5.3.

²⁵ De gemiddelde trefkans van deze zones loodrecht ten opzichte van een lijn bedragen 73,792% en 21,849%. Er kunnen andere waarden of een andere opsplitsing van trefzones worden gekozen.

Hoogspanningslijnen en transformatorstations, bovengrondse buisleidingen, risicovolle installaties en terreinen

Voor hoogspanningslijnen, transformatorstations, bovengrondse buisleidingen en bovengrondse risicovolle installaties wordt geadviseerd om een gelijke berekeningsmethodiek te hanteren als voor overige gebouwen en objecten. Dit zorgt voor een eenduidige berekeningsmethodiek van verschillende objecten.

Zie de visuele voorbeelden in paragraaf 8.5.3.

8.6.2 Ondergrondse buisleidingen en waterkeringen

Voor ondergrondse buisleidingen en waterkeringen is vooral de directe impact van belang voor de bepaling van de risico's. In beide gevallen gaat het niet enkel om de trefkans van de grond of een object maar vooral ook om de impact die wordt veroorzaakt waarmee schade kan ontstaan aan de waterkerende functie van de waterkering of aan de buisleiding onder de grond. Voor beide objecten dienen de oppervlakten te worden bepaald waar er kans op schade kan ontstaan. Voor ondergrondse buisleidingen kunnen de kritische afstanden worden bepaald waarbij er sprake kan zijn van schade indien het zwaartepunt van een object hierbinnen valt. Zo gauw het zwaartepunt van een windturbine deze zone kan treffen is sprake van potentiële schade aan de ondergrondse buisleiding.

De huidige formules in het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid Module IV kunnen worden toegepast om de kritische stroken te bepalen rondom buisleidingen. Deze formules staan omschreven in paragraaf 5.1.1 t/m 5.1.2. De methodiek voor bovengrondse buisleidingen in paragraaf 5.2 van Module IV kan vervangen worden door een algemene trefkans aanpak zoals omschreven in paragraaf 8.6.1 van deze rapportage.

Voor waterkeringen kunnen in afstemming met de betrokken beheerder de verschillende onderdelen van een waterkering worden bepaald zoals: "Beschermingszones A en B, Binnen- en buiten talud en teen, kruin en of eventuele andere zones van belang". De trefkans kan per zone worden uitgerekend maar dient niet cumulatief te worden beschouwd omdat de trefkans van meerdere zones kunnen overlappen bij één incident. Het is van belang om het maatgevend incident te bepalen en van daaruit de berekeningen nader te specificeren. Er is afstemming benodigd tussen de opsteller van de trefkansanalyse en de risicoanalyse van de waterkering om de trefkansanalyse goed te specificeren. Voor de bepaling van de trefkans kan gekeken worden naar de kans op directe impact volgens de aanpak zoals omschreven in paragraaf 8.6.1 van deze rapportage.

8.6.3 Transporten

Voor de bepaling van het individueel passanten risico en het maatschappelijk risico in relatie tot transport of vervoersbewegingen op een verkeersader (weg, water en spoor) zijn momenteel separate berekeningsmethodieken beschikbaar die enigszins afwijken van de berekeningsmethodieken voor bijvoorbeeld gebouwen en terreinen (zie Toelichting Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid paragraaf 7.2.4.1 t/m 7.3.2). Er wordt geadviseerd om deze berekeningen te uniformeren zodat de bepaling van de trefkans van een oppervlakte van een weg hetzelfde is als de bepaling van de trefkans van bijvoorbeeld een buisleidingstrook op gelijke afstand en van gelijk formaat. Het verschil in uitkomsten blijft dan voortkomen uit enkel de verblijfstijd van personen en voertuigen op een infrastructuur.

Voor de bepaling van de trefkans van een weg kan het verharde deel van de rijbaan op gelijke manier worden bepaald als voor een oppervlakte zoals omschreven in 8.6.1. Omdat rondom de rijbaan waar het

voertuig zich bevindt al extra breedte als trefzone wordt aangehouden hoeft er geen extra hoogte te worden toegevoegd aan de analyse. De hoogte van voertuigen valt daarmee reeds binnen het totale te raken oppervlakte van de rijbaan. De verblijfstijd van een object kan vervolgens bepaald worden door de gehele infrastructuur binnen de effectafstand plus een remweg behorende bij de snelheid van het object te bepalen. De tijd die het een object kost om door deze zone te rijden is de verblijfstijd van een enkele passage.

8.6.4 Personen

De formules voor het bepalen van het plaatsgebonden risico staan voor mastfalen, gondelfalen en hubfalen reeds vermeld in hoofdstuk 6. Voor bladworp dient nog een omzetting te worden gemaakt van de trefkans per vierkante meter van het zwaartepunt (P_{ZWPT}) naar het plaatsgebonden risico. Het effect op het plaatsgebonden risico is afhankelijk van het oppervlakte van het rotorbladdeeltje wat geworpen wordt. In de huidige rekenmethodiek (module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid) staat vermeld dat je het plaatsgebonden risico van het faalscenario bladworp kan uitrekenen met de formule 2.18:

$$P_p(x^*, y^*) = 1,5 * A_c * P_{ZWPT}(x^*, y^*)$$

De constante waarde van 1,5 staat voor de schaduwfactor. Deze schaduwfactor brengt in rekening dat een persoon een zekere hoogte heeft en het rotorblad schuin naar beneden komt. Dit wordt gecombineerd met een berekening volgens formule 2.25a (met een persoonsbreedte van 0,3m) om zo een factor te bepalen die de trefkans per vierkante meter omzet naar het plaatsgebonden risico. Formule 2.25a wordt in de praktijk niet vaak gebruikt om A_c te bepalen. In plaats daarvan wordt in de praktijk een generieke formule gebruikt die het totale oppervlakte van het rotorblad benaderd (zie paragraaf 5.1). Indien het totale oppervlakte van het rotorblad wordt gebruikt als kritiek oppervlak van het rotorblad dan wordt in principe een analyse gedaan van de trefkans van 1 vierkante meter in plaats van een persoon van 0,3 meter. Dit betekent dat er een overschatting plaatsvindt van het daadwerkelijke trefrisico van een persoon. Deze overschatting wordt verder versterkt door het gebruik van de 1,5x als extra factor voor de schaduwfactor.

Om de berekeningsmethodiek te vereenvoudigen en meer overeenkomstig te maken met de praktijk wordt geadviseerd om in plaats van de bepaling van het kritische oppervlak via formule 2.25a de berekening te vereenvoudigen tot de trefkans per vierkante meter (P_{ZWPT}) maal het totale fysieke oppervlakte van het rotorblad. Om overschatting van effecten te voorkomen wordt geadviseerd om de schaduwfactor (1,5x) te verwijderen uit de berekening. De resulterende formule voor de bepaling van het plaatsgebonden risico bij bladworp wordt daarmee beter uitvoerbaar, meer geschikt voor automatisering, beter controleerbaar en beter herleidbaar tot de ingevoerde parameters. De resulterende formule is daarmee meer geschikt als rekenvoorschrift omdat er minder afhankelijkheid is van de expertise van de auteur van de risico analyse.

De nieuwe formule wordt dan:

$$P_p(x^*, y^*) = A_b * P_{ZWPT}(x^*, y^*)$$

Met: A_b = Oppervlakte van het rotorblad, $P_p(x^*, y^*)$ = Plaatsgebonden risico per vierkante meter en $P_{ZWPT}(x^*, y^*)$ = Trefkans zwaartepunt rotorblad per vierkante meter.

8.7 Bepaling treflocatie zwaartepunt onderdelen (impact)

Gondelfalen

Bij gondelfalen treft het gondelgewicht inclusief het hubgewicht het middelpunt van de plek waar de gondel de grond raakt. Dit is dus een cirkel met een straal gelijk aan de helft van de maximale gondelafmeting ($0,5 \times L_{max,gondel}$). Het zwaartepunt van de rotorbladen treft de grond op een afstand vanaf dit punt gelijk aan de zwaartepunt afstand van een rotorblad (of $1/6 \times$ rotordiameter).

Hubfalen

Bij hubfalen treft het hubgewicht het middelpunt van de plek waar de hub de grond raakt. De hub bevindt zich aan de rand van de gondel als hij naar beneden valt en valt dus ook op een afstand nagenoeg gelijk aan een $0,5 \times L_{max,gondel}$. Dit is dus een cirkel met een straal gelijk aan de helft van de maximale gondelafmeting ($0,5 \times L_{max,gondel}$). Het zwaartepunt van de rotorbladen treft de grond op een afstand vanaf dit punt gelijk aan de zwaartepunt afstand van een rotorblad.

Mastfalen

Bij mastfalen wordt tot aan de ashoogte de grond getroffen door het gewicht van de mastoren. Uit de analyse van faalincidenten blijkt dat dit gewicht in de praktijk bij een incident vaak over een groter gedeelte van de grond verdeeld is. Er is dus niet direct sprake van een enkele locatie van impact. Het is daarom aannemelijk om de impact van het gewicht van een mast te verdelen over een lijnelement met een lengte gelijk aan de ashoogte. Vervolgens valt de gondel inclusief het hubgewicht op een maximale afstand gelijk aan de ashoogte waarbij het zwaartepunt op een ashoogte-afstand terecht komt. Uit analyse van faalincidenten blijkt dat op deze plek de grootste kratervorming ofwel impact wordt veroorzaakt. Het zwaartepunt van de rotorbladen treft vervolgens de grond op een afstand vanaf dit punt op ashoogte op een afstand gelijk aan de zwaartepunt afstand van een rotorblad.

9 Advisering vuistregels

9.1 Inleiding

In module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid staan vuistregels opgenomen die aangeven tot waar de PR-contouren van windturbines maximaal zijn gelegen. Deze vuistregels zijn gebaseerd op de uitkomsten van de rekenregels en de faalfrequenties van één van de eerdere versies van het handboek uit 2005.

De vuistregels kunnen worden gebaseerd op de effectafstanden behorende bij bepaalde faalscenario's. Zo gold voor de situatie met toepassing van de oude faalfrequenties en faalscenario's dat de PR10-05 contour nooit verder gelegen was dan een halve rotordiameter afstand vanaf de windturbine. De PR10-06 contour was nooit verder gelegen dan het maximum van ofwel een tiphoogteafstand ofwel van de bladworpafstand bij nominaal toerental. Herziening van deze vuistregels kan relevant zijn indien de faalfrequenties significant wijzigen waardoor de bijbehorende PR-contouren maximaal gezien op andere afstanden komen te liggen of als de te onderzoeken faalscenario's zodanig wijzigen dat de effectafstanden zelf ook wijzigen.

Vuistregels dienen om de maximale situaties inzichtelijk te maken. Omdat de vuistregels veelal in een vroegtijdig stadium van project ontwikkeling als beoordelingsinstrument worden gebruikt is het van belang dat de daadwerkelijke effecten niet onderschat worden door de toepassing van de vuistregels. De vuistregels dienen dus per definitie conservatief te worden ingestoken en dienen de maximale mogelijke zones tot waar een bepaald risico kan optreden weer te geven.

Om te bepalen welke vuistregels voldoende robuust zijn om alle windturbintypen en formaten te omvatten wordt een analyse uitgevoerd van de Pondera WTG database om te beschouwen of alle bekende windturbineformaten kunnen voldoen aan de vuistregels. Door deze potentiële vuistregels uit te zetten tegenover de betrokken dimensies van de windturbines kan gekeken worden of er een verwachting is dat bij het groter worden van de windturbines de vuistregels nog toepasbaar zijn.

9.2 Maximale effectafstanden

De vuistregels kunnen gebaseerd worden op de maximale effectafstanden van de verschillende faalscenario's. Daarbij is het van belang of alleen naar de locatie van treffen van het zwaartepunt van een windturbineonderdeel of naar de afstand behorende bij het treffen van een gedimensioneerd windturbine onderdeel dient te worden gekeken. In de versie van de handleiding uit 2005 werd voor gondelfalen en mastfalen gekeken naar de trefkans van een gedimensioneerd windturbine onderdeel (nl. rotoroverdraai voor gondelfalen en tiphoogte voor mastfalen). Voor bladworp wordt echter alleen gekeken naar de afstand behorende bij het zwaartepunt van een rotorblad en wordt de dimensie van het geworpen rotorblad niet beschouwd voor de bepaling van de effectafstand (zie paragraaf 5.3).

De effectafstanden kunnen per faalscenario worden bepaald:

Tabel 9.1 Maximale effectafstanden per faalscenario

Faalscenario	Mastfalen	Gondelfalen	Hubfalen	Bladworp
Maximale Effectafstand (Indirect)	Tiphoogte	$\frac{1}{2} * \text{maximale gondeldimensie} + \frac{1}{2} * \text{mastbreedte} + \frac{1}{2} * \text{Rotordiameter}$	$\frac{1}{2} * \text{maximale gondeldimensie} + \frac{1}{2} * \text{mastbreedte} + \frac{1}{2} * \text{Rotordiameter}$	Bladworpafstand + $\frac{2}{3}^{\text{e}}$ geworpen bladdeel*
Maximale impactafstand (direct)	Ashoogte + Zwaartepunt rotorblad	$\frac{1}{2} * \text{maximale gondeldimensie} + \frac{1}{2} * \text{mastbreedte} + \text{Zwaartepunt rotorblad}$	$\frac{1}{2} * \text{maximale gondeldimensie} + \frac{1}{2} * \text{mastbreedte} + \text{Zwaartepunt rotorblad}$	Bladworpafstand

* $\frac{2}{3}^{\text{e}}$ geworpen bladdeel kan ook specifiek bepaald worden als bladlengte min zwaartepunt rotorblad.

Voor de bepaling van de plaatsgebonden risico's en de trefkansen van objecten wordt er in de praktijk vaak vanuit gegaan dat buiten een afstand gelijk aan de bladworpafstand er geen sprake meer is van een risico afkomstig van het faalscenario bladworp. Theoretisch kan een object buiten deze afstand nog indirect geraakt worden door het rotorblad afhankelijk van wat de oriëntatie van het rotorblad is als deze land. Het verdient aanbeveling om duidelijk te stellen in de rekenregels of voor de berekening van de trefkansen dit wel of niet benodigd is. In de huidige formules in module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid de voorgestelde formules in deze rapportage voor bepaling van het plaatsgebonden risico zit een vermenigvuldiging met de waarde P_{zwpt} . Deze waarde bedraagt nul op een afstand buiten de bladworpafstand waardoor er geen risico wordt berekend als gevolg van een bladworpscenario buiten de maximale werpafstand van het zwaartepunt van het rotorblad bij bepaling van het plaatsgebonden risico. In de voorgestelde aanpak van de berekening van de indirecte trefkansen van objecten wordt echter wel rekening gehouden met deze extra trefafstand. Beheerders van infrastructuur bepalen in hun aangegeven beleid over de adviesafstanden voor windturbines vaak ook of er wel of geen rekening wordt gehouden met deze extra trefafstand bij het faalscenario bladworp.

9.3 PR10-5 contouren

Voor de ligging van de PR10⁻⁵ contour wordt momenteel een vuistregel aangehouden van maximaal een halve rotordiameter. In de huidige geldende situatie ligt de PR10-5 contour soms precies op deze vuistregel afstand (bij grote windturbines op lage ashoogten) of ligt de berekende PR10-5 contour tientallen meters binnen deze vuistregel (ca. 25 tot 65 meter) afhankelijk van de dimensies van de windturbine.

De berekende ligging van de PR10-5 contour neemt aanzienlijk af als gevolg van de toepassing van de nieuwe faalfrequenties zoals bekend uit het onderzoek van 2022. De ligging van de PR10-5 contour wordt bepaald door een combinatie van alle faalscenario's samen. Door het afnemen van de faalfrequenties van alle faalscenario's neemt het risico binnen deze zone aanzienlijk af tot in veel gevallen circa -60% (zie paragraaf 4.6). Het toepassen van de geadviseerde aanpassingen aan de rekenformules zoals omschreven in deze rapportage zorgen voor een verdere afname van de optredende risico's. Dit betekent dat voor een gros van het aantal doorgerekende windturbines²⁶ de PR10-5 contour komt te liggen op een afstand van 10 tot 25 meter. Deze afstanden komen niet overeen met een duidelijke effectafstand of specifieke dimensie van de windturbine. De eerstvolgende generieke eigenschap van de windturbine welke als vuistregel zou kunnen gelden blijft daarmee een halve rotordiameter. In toekomstige wetgeving veranderd de normstelling voor beperkt kwetsbare objecten van een grenswaarde van PR10-5 naar een

²⁶ Huidig (2023) beschikbare windturbintypes en afmetingen

standaardwaarde van PR10-6. Het gebruik van een vuistregel voor de bepaling van de ligging van de PR10-5 contour is daarmee minder relevant. Om verwarring te voorkomen kan het geschikt zijn om de vuistregel voor de bepaling van de PR10⁻⁵ contour niet te gebruiken in de rekenvoorschriften en in plaats daarvan voor de bepaling van de risico's te verwijzen naar de berekende waarden. Binnen een afstand van een halve rotordiameter gelden mogelijk ook andere aandachtspunten voor de projectontwikkeling op het gebied van ijsval of benodigde afstemming over het recht van overdraai.

9.4 PR10-6 contouren

Voor de ligging van de PR10⁻⁶ contour wordt momenteel een vuistregel aangehouden van het maximum van ofwel een tiphoogteafstand ofwel de werpafstand bij nominaal toerental. In de huidige geldende situatie ligt de PR10-6 contour soms precies op de tiphoogteafstand als vuistregel afstand (bij kleinere windturbines²⁷) of ligt de berekende PR10-6 contour tientallen meters binnen de tiphoogteafstand op de maximale werpafstand bij nominaal toerental.

De berekende ligging van de PR10-6 contouren neemt als gevolg van alleen de aangepaste faalfrequentie enkel af doordat de berekende PR10-6 contour eerder komt te liggen op de werpafstand bij nominaal toerental en minder vaak op een tiphoogteafstand. Dit gebeurt daarmee ook bij kleinere windturbines als bij toepassing van de oude faalfrequenties. De ligging van de PR10-6 contour wordt enkel bepaald door de faalscenario's mastfalen, volledig bladworp bij nominaal toerental en eventueel bladworp bij overtoeren of partieel bladworp bij nominaal toerental.

Uit een berekening van een aantal doorgerekende windturbines²⁸ blijkt de PR10-6 contour vaak komt te liggen op een afstand binnen een tiphoogte afstand. De berekende PR10-6 contour ligt daarmee vaak op de werpafstand bij nominaal toerental of enigszins binnen de werpafstand bij nominaal toerental tot een minimum van de ashoogte + maximale gondeldimensie. De precieze ligging varieert per windturbine onder andere door een veelvoud aan eigenschappen zoals:

- Het formaat geworpen rotorblad;
 - groter oppervlak rotorblad is groter PR
- de maximale werpafstand;
 - grotere maximale werpafstand is een relatief kleiner PR per vierkante meter;
- Grotere ashoogte;
 - grotere ashoogte is een relatief kleiner PR per vierkante meter;

De toevoeging van het faalscenario partieel bladworp zorgt niet voor een verschuiving van de PR10⁻⁶ of PR10⁻⁵ contouren. Het optredend plaatsgebonden risico van het faalscenario is in de orde van grote van PR10-8 en PR10-9.

Omdat afhankelijk van het type windturbine de PR10-6 contour op verschillende afstanden kan liggen variërend van een bladworpafstand tot nominaal toerental een tiphoogte afstand of een kleinere afstand dan beiden wordt er geen andere vuistregel geadviseerd. De huidige vuistregel kan blijvend gebruikt worden.

²⁷ Bijvoorbeeld kleiner dan een tiphoogte van 160 meter.

²⁸ Huidig (2023) beschikbare windturbinetypes en afmetingen

9.5 Effectafstand ten aanzien van risicovolle installaties, infrastructuren en andere objecten

Voor objecten zoals risicovolle objecten, infrastructuren en andere objecten is de ligging van de PR-contour niet relevant. Het gaat hierbij immers om het treffen van een oppervlakte van een installatie of terrein en niet om de specifieke trefkans van een onbeschermd persoon. Dit betekent dat voor de bepaling of er sprake van een significant effect op een installatie, infrastructuur of terrein de vuistregels voor de bepaling van de ligging van de PR-contouren niet geschikt zijn. Kort gezegd is het afhankelijk van het te raken object welke effectafstand relevant is. Geadviseerd wordt om voor alle objecten binnen de maximale effectafstand te analyseren of er kan worden voldaan aan de door beheerders van de installaties of infrastructuren gestelde adviesafstanden en/of te berekenen wat de trefkansen zijn. Een beoordeling van de verwaarloosbaarheid van het toegevoegde risico, afkomstig van de windturbine, is afhankelijk van het formaat en de eigenschappen van het te raken object of infrastructuur.

De maximale effectafstand komt voort uit het faalscenario partieel bladworp als dit faalscenario wordt toegevoegd aan de rekenmethodiek.

10 Adviezen en conclusies

In deze rapportage wordt geanalyseerd welke rekenmethodieken er beschikbaar zijn om de risico's op het gebied van externe veiligheid voor de omgeving van een windturbine in kaart te kunnen brengen. De verschillende beschikbare rekenmethodieken worden beoordeeld op de criteria: Ontvankelijkheid, Validiteit, Toepasbaarheid en Betrouwbaarheid (Herleidbaar, reproduceerbaar en conservatief). Het doel is om een rekenmethodiek te ontwikkelen die toepasbaar en bruikbaar is als een eenduidige rekenmethodiek. Tevens dienen de adviezen het mogelijk te maken dat de in 2022 nieuw afgeleide faalscenario's hubfalen en bladworp van een partieel rotorblad opgenomen kunnen worden in de rekenregels. In deze rapportage worden adviezen gegeven over mogelijke aanpassingen die toegepast kunnen worden met daarbij een omschrijving van de gevolgen en analyse van mogelijke geschikte rekenmethodieken. Voor de specifieke uitwerking in een rekenvoorschrift is het van belang om eenduidige grootheden en eenheden te hanteren en toe te passen en de rekenregels te uniformeren tot één rekensysteem.

De adviezen in deze rapportage gaan uit van advisering over aanpassing van de huidige module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid en sluit daardoor zoveel mogelijk aan bij de huidige beschikbare rekenregels.

10.1 Rekenmethodieken

Voor het faalscenario mastfalen worden geen specifieke wijzigingen voorgesteld. Wel wordt aanbevolen om duidelijkheid te creëren over de toepassing van de factor solidity en het te gebruiken bladoppervlak en hoe deze factoren eenduidig bepaald dienen te worden.

Voor het faalscenario gondelfalen wordt geadviseerd om specifieke rekenregels vast te stellen in de plaats van enkel te verwijzen naar de berekening van het faalscenario mastfalen. Hierbij kan voor de bepaling van de effecten gekeken worden naar de landingslocaties van een vallende gondel in een kleine cirkel rondom de masttoeren ($0,5 \times L_{max,gondel} + 0,5 \times d_{mast}$). Dit is benodigd door het aanzienlijk groter worden van de gondeldimensies van moderne windturbines waarbij het formaat van de gondel zelf niet langer als niet-significant kan worden gezien. Hierdoor komt de bepaling van de gevolgen beter overeen met de gevonden incidenten behorende bij dit faalscenario en wordt meer rekening gehouden met het formaat van moderne windturbines. De maximale effectafstand van dit faalscenario neemt daarmee ook toe met deze extra valafstand. Tevens wordt geadviseerd om de alternatief beschikbare trefkansmethode van een bivariate normale verdeling voor de bepaling van het gondelfaalscenario te schrappen uit de rekenregels.

Voor het nieuwe faalscenario hubfalen wordt geadviseerd om een gelijke berekening te hanteren als voor het faalscenario gondelfalen waarbij rekening gehouden kan worden met een lager vallend gewicht bij impactberekeningen.

Ook voor het faalscenario gondelfalen en hubfalen is duidelijkheid over de toepassing van de factor solidity en het te gebruiken bladoppervlak gewenst.

Ten aanzien van het te gebruiken rekenmodel voor bladworp zijn er meerdere opties beschikbaar die variëren in complexiteit en specificiteit. Om de rekenregels algemeen toepasbaar, toegankelijk, uitvoerbaar en consistent te houden wordt geadviseerd om rekenregels te baseren op een eenvoudig kogelbaanmodel. Hiermee worden de gevolgen van dit faalscenario deels overschat maar wordt een

rekenbaar en controleerbaar rekenmodel toegepast. Het toevoegen van meer complexiteit in het rekenmodel zorgt voor een grotere potentiële afwijking tussen rapporten van verschillende adviseurs door het moeten toepassen van een groter aantal variabelen. Het is niet duidelijk dat de winst in nauwkeurigheid van een complexer rekenmodel opweegt tegen het verlies aan toepasbaarheid als rekenregel. De betrouwbaarheid van de beoordeelde rekenmodellen is niet eenduidig te bepalen door een tekort aan mogelijkheden voor validatie of simulatie. Zowel de versimpelde rekenmodellen als de complexere rekenmodellen hebben een hoge mate van onbetrouwbaarheid. Een eenvoudig kogelbaanmodel is daarmee de meest toepasbare en voldoende conservatieve aanname voor de bepaling van de effecten.

Voor de uitwerking van het faalscenario bladworp van een volledig rotorblad bij nominaal toerental wordt geadviseerd om eenduidig vast te stellen hoe het toerental bij nominaal toerental bepaald dient te worden. Hierbij is het van belang om een eenduidige definitie van deze parameter toe te passen die niet openstaat voor interpretatie en niet variabel is.

Voor de toepassing van het faalscenario partieel bladworp wordt geadviseerd om een representatief scenario te bepalen wat een indicatie geeft van de maximale effecten van dit faalscenario. De uitvoering van een rekenmethodiek welke rekening houdt met een groot aantal breekpunten over de lengte van een rotorblad is niet goed uitvoerbaar als rekenmethodiek. Een theoretische berekening van de werpafstand van zeer kleine bladdelen is ook niet representatief voor praktijksituaties indien geen rekening wordt gehouden met de remmende werking van luchtkrachten op kleine bladdelen. Er vindt daardoor een grote overschatting plaats van de daadwerkelijke werpafstand. Als representatief faalscenario zou gekeken kunnen worden naar het breken van het rotorblad op 1/3^e bladlengte en/of op 2/3^e bladlengte als representatieve scenario's voor het verwerpen van een kleiner bladdeel aan het uiteinde van het rotorblad en een groter bladdeel nabij het sterkste ontworpen deel van het rotorblad. Er is geen data of literatuur beschikbaar die richting geeft aan wat de keuze voor het formaat van de bladdelen specifiek zou moeten zijn. De keuze voor een te klein bladdeel zorgt voor een aanzienlijke overschatting van de mogelijke gevolgen terwijl de keuze voor een te groot bladdeel de maximale effectafstand van een geworpen kleiner bladdeel kan onderschatten. Hoe kleiner het te beoordelen bladdeel, hoe kleiner het risico op schade aan een object of kans op overlijden voor een persoon. Uit de berekeningen blijkt dat de trefkansen van deze partiële faalscenario's een factor 10x tot 15x lager zijn dan het faalscenario bladworp bij nominaal toerental. Dit is als gevolg van het kleiner wordende oppervlakte van het geworpen bladdeel en de grotere risicozone waarbinnen het rotorblad kan landen (kans is verspreid over groter oppervlak).

De rijksoverheid, betrokken beheerders van infrastructures en andere belanghebbende beheerders van objecten en installaties dienen in hun advisering en beleid over de gevolgen ten aanzien van de plaatsing van windturbines nabij hun eigen objecten, infrastructures en installaties af te wegen of ze de risico's als gevolg van dit faalscenario willen meewegen in hun plaatsingsadviezen en bij de bepaling van hun toetsafstanden. Dit leidt mogelijk tot benodigde aanpassingen van het door de beheerders aangegeven beleid in de Handreiking risicozonering windturbines.

10.2 Advies vervolgonderzoek

Deze rapportage heeft nog geen nadere analyse uitgevoerd voor de bepaling van eventueel gevolgschade. Voor de bepaling van de effecten is aansluiting gezocht bij het principe van 'kans op treffen = 100% kans op schade of dodelijk letsel'. Voor de gevolgen van gondelfalen, hubfalen en mastfalen is dit uitgangspunt geschikt voor de berekening van grote formaten windturbines. Vooral bij het faalscenario

partieel bladworp is het sterk de vraag of geworpen kleinste bladdelen voldoende energie bevatten om significante schade aan versterkte installaties kunnen veroorzaken. De remmende luchtkrachten zullen ook de snelheid van kleinere geworpen bladdelen aanzienlijk vertragen ten opzichte van de berekende waarden in een kogelbaanmodel.

Voor de toepassing van de rekenformules als vastgestelde rekenregels kan het aanbeveling verdienen om een vastgesteld rekenmodel beschikbaar te stellen waarmee de verschillende berekeningen eenduidig zijn uit te voeren. Door de rekenregels te versimpelen kan een stappenplan worden gerealiseerd wat automatisch uitgevoerd kan worden in bijvoorbeeld een Python script. Hierdoor is de uitvoering van een risico analyse bij windturbines niet langer beperkt tot gespecialiseerde adviesbureaus en wordt het uitvoeren van een analyse toegankelijker. Een dergelijk systeem is mogelijk alleen goed uitvoerbaar indien ook tegelijkertijd een openbare database met windturbineparameters wordt bijgehouden zodat de benodigde input parameters eenduidig vastgesteld kunnen worden. De aanzienlijke kosten die gemoeid kunnen gaan met het ontwikkelen van een eenduidig, toepasbaar en algemeen te gebruiken geautomatiseerd rekenmodel wegen mogelijk niet op tegen de voordelen van een dergelijk systeem.

10.2.1 Schadebepaling ondergrondse buisleidingen, ondergrondse hoogspanningslijnen en waterkeringen

Specifiek voor het onderwerp ondergrondse buisleidingen is de bepaling van de kritische stroken in deze rapportage niet geanalyseerd. De kritische stroken worden bepaald om aan te geven tot op welke afstand een windturbineonderdeel met een bepaald gewicht kan neervallen waarbij er nog sprake kan zijn van schade aan de ondergrondse buisleiding. Dit is afhankelijk van de diepteligging van de buisleiding, de energie van impact van het windturbineonderdeel op de grond en de eigenschappen van de buisleiding.

De formules zijn afkomstig uit oude analyses van explosies nabij ondergrondse buisleidingen waarbij de kracht van de explosie wordt gelijk gesteld aan de energie van de impact van een windturbineonderdeel²⁹. De formules staan vermeld in module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid in paragraaf 5.1.1. De formules houden geen rekening met doorsnijding van een buisleiding door een windturbineonderdeel. Het verdient aanbeveling om nader te onderzoeken of de toepassing van deze formules geschikt zijn.

Ook voor de bepaling van de schade aan waterkeringen zijn geen eenduidige formules beschikbaar en is nader onderzoek benodigd. De huidige formules die worden gebruikt geven een inschatting van de kraterdiepte die ontstaat als de gevolg van de impact van een gewicht van een windturbineonderdeel. Er zijn meerdere formules voor de bepaling van de kraterdiepte in omloop.

Voor bovengrondse hoogspanningslijnen kan een oppervlakte worden bepaald waarbij er een mogelijke kans op treffen is als gevolg van een falende windturbine. Voor ondergrondse hoogspanningslijnen is momenteel geen methodiek beschikbaar voor de bepaling van de mogelijke kans op schade. Dit betekent dat in de praktijk de kritische stroken rondom ondergrondse hoogspanningslijnen worden bepaald op basis van expert judgement en in nader overleg met de netbeheerders worden vastgesteld. Deze aanpak is daarmee afhankelijk van de expertise van de betrokkenen.

²⁹ Gebaseerd op "Pipeline response to buried explosive detonations, volume I + II, ed. P.S.W. Esparza, A. B. Wenzel. August 1981: Southwest Research Institute.